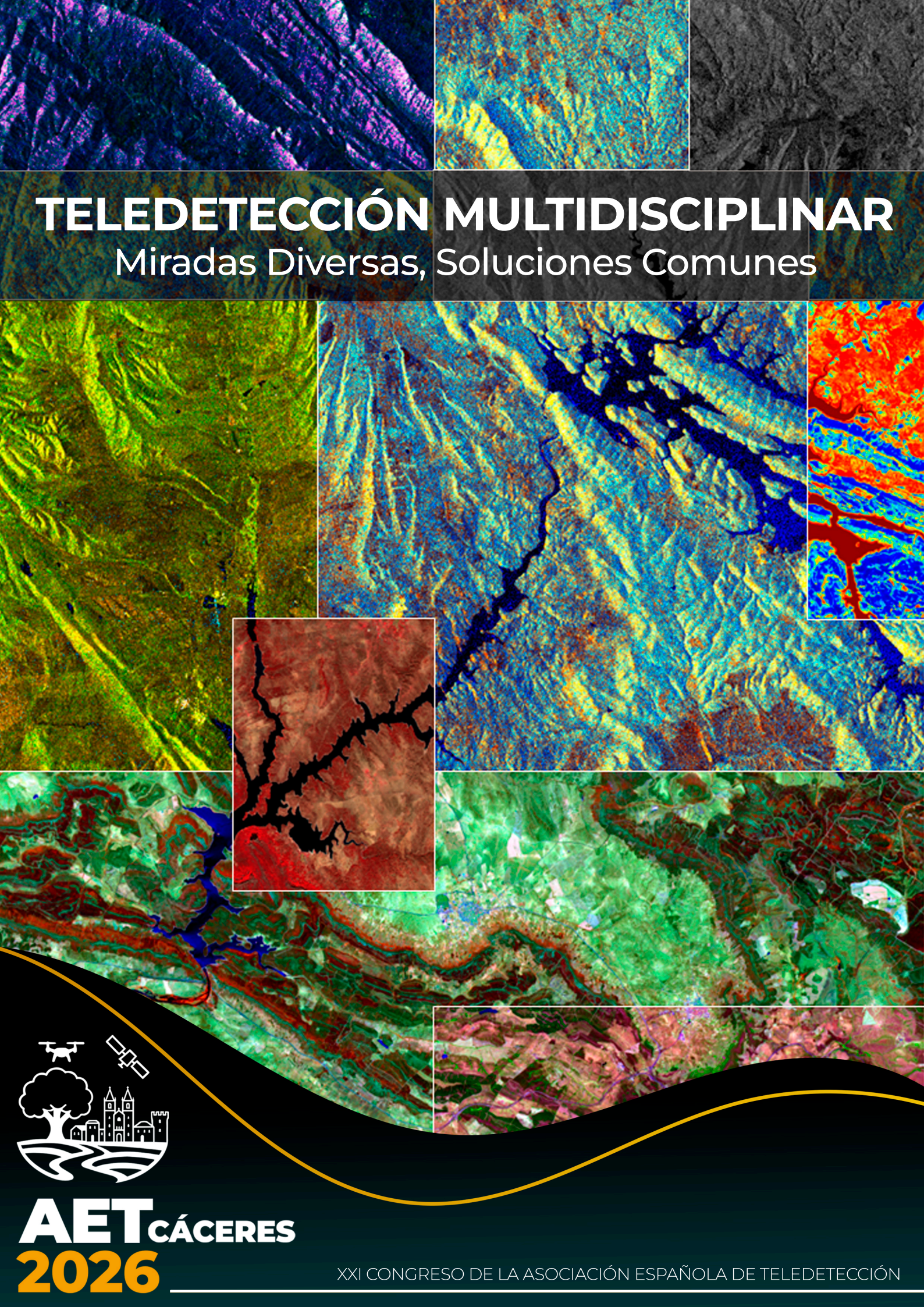


TELEDETECCIÓN MULTIDISCIPLINAR

Miradas Diversas, Soluciones Comunes

AET CÁCERES 2026

XXI CONGRESO DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE TELEDETECCIÓN

XXI CONGRESO DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE **TELEDETECCIÓN**

Teledetección Multidisciplinar: Miradas Diversas, Soluciones Comunes

LIBRO DE ACTAS

EDITORES

Elia Quirós
Laura Fragoso Campón
Alicia Antolín Salazar

Universidad de Extremadura

2026

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

TÍTULO XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
Teledetección Multidisciplinar: Miradas Diversas, Soluciones Comunes

IMAGEN DE PORTADA Mosaico Sentinel-1/Sentinel-2 de los embalses del Cíjara y García Sola en la provincia de Badajoz (España).
Créditos: Laura Fragoso-Campón, Elia Quirós y Alicia Antolín Salazar.
Elaboración propia a partir de datos Copernicus Sentinel-1 y Sentinel-2 (2026).

MAQUETACIÓN José Antonio Vargas Lebrón, Invisual Diseño Editorial.
Elia Quirós, Universidad de Extremadura.
Laura Fragoso-Campón, Universidad de Extremadura.
Alicia Antolín Salazar, Universidad de Extremadura.

1ª edición, 2026

Edita:
Universidad de Extremadura. Servicio de Publicaciones
Plaza de Caldereros, 2. 10003 Cáceres (España)
Tel. 927 257 041
publicac@unex.es
http://publicauex.unex.es/

E-ISBN: 978-84-9127-367-7 (edición digital)

Dehesa Repositorio Institucional

Acceso abierto en el Repositorio Institucional de la Universidad de Extremadura

CC BY NC ND

Prólogo

Es un placer prologar las Actas del XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección, celebrado en Cáceres entre los días 8 y 11 de junio de 2026 y organizado por el Instituto de Investigación de la Dehesa de la Universidad de Extremadura.

Bajo el lema "Teledetección multidisciplinar: Miradas diversas, soluciones comunes", el congreso ha querido destacar el carácter transversal de la observación remota como un campo científico idóneo para el estudio e interpretación de sistemas ambientales y territoriales complejos. Retos como el cambio climático, los incendios forestales, las sequías, la degradación ambiental, la expansión urbana o la gestión de los recursos hídricos requieren enfoques diversos y complementarios, así como la colaboración entre distintas especialidades y áreas de conocimiento. La teledetección constituye, en este contexto, una disciplina fundamental para avanzar en el análisis y la comprensión de estos procesos y para aportar información útil a la toma de decisiones.

Estas Actas recogen una muestra representativa del trabajo desarrollado por investigadores, técnicos y estudiantes vinculados al ámbito de la teledetección. En sus contribuciones se presentan nuevos enfoques metodológicos, aplicaciones innovadoras y resultados que reflejan el dinamismo y la evolución de este campo científico ante problemas cada vez más complejos. Al mismo tiempo, evidencian la creciente integración de datos, técnicas y perspectivas de análisis orientadas al estudio del territorio, el medio ambiente y los recursos naturales.

El Congreso constituye, además, uno de los principales espacios de encuentro de la Asociación Española de Teledetección y una oportunidad para compartir experiencias, fortalecer colaboraciones y poner en común avances científicos y técnicos. Estas Actas son también testimonio del compromiso de nuestra comunidad con el desarrollo del conocimiento y con la mejora de las herramientas de observación y análisis de la Tierra, en un momento en el que disponer de información rigurosa y de calidad resulta especialmente necesario.

Quisiera, por ello, felicitar a los organizadores del congreso, a los miembros del comité científico y a todos los autores que han contribuido con sus trabajos a esta publicación, agradeciendo su esfuerzo y dedicación, y animándolos a continuar impulsando el avance de la teledetección en los próximos años.

Luis Ángel Ruiz Fernández

Presidente de la Asociación Española de Teledetección

Introducción

El **XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección (AET)**, que se celebra en **Cáceres del 8 al 11 de junio de 2026**, se destaca como un punto de encuentro para la comunidad científica, institucional y empresarial interesada en la Teledetección. Con el lema **"Teledetección Multidisciplinar: Miradas Diversas, Soluciones Comunes"**, el evento es organizado por el **Instituto Universitario de Investigación para el Desarrollo Territorial Sostenible (INDEHESA)** de la **Universidad de Extremadura**, en colaboración con la **Asociación Española de Teledetección** y el respaldo de diversas instituciones académicas, centros de investigación y empresas del sector.

En un momento en que la observación de la Tierra se ha consolidado como una herramienta indispensable para abordar los grandes retos ambientales, sociales y económicos de nuestro tiempo, la Teledetección reafirma su papel como disciplina transversal, capaz de tender puentes entre áreas de conocimiento históricamente separadas. Su capacidad para monitorizar de forma continua, sistemática y a múltiples escalas ofrece una perspectiva muy valiosa para comprender el funcionamiento de nuestro planeta, anticipar los efectos del cambio climático y orientar políticas públicas más eficaces y sostenibles. Este encuentro reúne a los principales actores implicados en la Teledetección para reflexionar sobre los desafíos y oportunidades que plantea su carácter multidisciplinar, promoviendo la integración de miradas diversas en la búsqueda de soluciones comunes a problemas compartidos, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La totalidad de los trabajos científicos que se recogen en este libro se han sometido a una revisión por pares realizada por los miembros del Comité Científico, especialistas en las distintas áreas temáticas del congreso. Estos expertos han contribuido a mejorar y organizar la calidad de las contribuciones presentadas, distribuidas entre comunicaciones orales y comunicaciones en formato póster a lo largo de las sesiones programadas. Las comunicaciones científicas abarcan un amplio espectro de temáticas que refleja la riqueza y diversidad de la teledetección actual: desde la agricultura de precisión y la gestión forestal hasta la oceanografía y el estudio de la atmósfera, pasando por la cartografía, la geología, el LiDAR, los incendios forestales, el análisis SAR, las nuevas misiones satelitales, la espectrorradiometría y las metodologías basadas en inteligencia artificial y procesado masivo de datos.

Para concluir, deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todos los autores por su valiosa contribución. Extendemos nuestro reconocimiento a los miembros del Comité Científico por su dedicación en la revisión de los trabajos, a los ponentes invitados por compartir su visión y conocimiento, y a las instituciones y empresas patrocinadoras y colaboradoras por su generoso apoyo, sin el cual la celebración de este congreso no habría sido posible. Agradecemos asimismo a la AET y a su Junta Directiva la confianza depositada en la Universidad de Extremadura para la organización de esta vigesimoprimera edición.

Elia Quirós, Laura Fragoso-Campón,
Alicia Antolín Salazar

Comité Organizador del XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección

Cáceres, junio de 2026

Comité organizador

Quirós, Elia
Universidad de Extremadura. Instituto Universitario de Investigación INDEHESA

Fragoso-Campón, Laura
Universidad de Extremadura. Instituto Universitario de Investigación INDEHESA

Antolín Salazar, Alicia
Universidad de Extremadura. Escuela Politécnica

Comité científico

Coordinadoras

Quirós, Elia
Universidad de Extremadura

Fragoso-Campón, Laura
Universidad de Extremadura

Antolín Salazar, Alicia
Universidad de Extremadura

Miembros

Amparo Gilabert, María
Universitat de València

Arbelo Pérez, Manuel
Universidad de La Laguna

Barbero González, Luis
Universidad de Cádiz

Borra Serrano, Irene
Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC)

Caballero, Isabel
ICMAN-CSIC

Calera Belmonte, Alfonso
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA

Calle Montes, Abel
Universidad de Valladolid

Camps, Adriano
Universitat Politècnica de Catalunya

Castañeda, Carmen
EEAD-CSIC

Chuvieco, Emilio
Universidad de Alcalá

Cristóbal Rosselló, Jordi
Universitat Autònoma de Barcelona

De Castro Megíías, Ana Isabel
INIA-CSIC

Delegido Gómez, Jesús
Universitat de València

Domingo Ruiz, Dario
Universidad de Valladolid

Durán Barroso, Pablo
Universidad de Extremadura

Erena Arrabal, Manuel
IMIDA

Fernández Sarría, Alfonso
Universitat Politècnica de València

Fragoso Campón, Laura
Universidad de Extremadura

Franch, Belen
Universitat de Valencia

Franquesa Fuentetaja, Magí
Instituto Pirenaico de Ecología(CSIC)

García, Mariano
Universidad de Alcalá

García Pérez, Miguel Ángel
Universidad de Sevilla

García-meléndez, Eduardo
Universidad de León

Garrote De Marcos, Luis
Universidad Politécnica de Madrid

Gonzalo Martín, Consuelo
Universidad Politécnica de Madrid

González De Audícana Amenábar, María González
Universidad Pública de Navarra

González Dugo, María Patrocinio
IFAPA

Gómez Almaraz, Cristina
Universidad de Valladolid

Jiménez Michavila, Marcos
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)

Jiménez Muñoz, Juan Carlos
Universitat de València

Julien, Yves
Universidad de Valencia

Lamelas Gracia, María Teresa
Universidad de Zaragoza

Martín Isabel, María Pilar
Laboratorio de Espectro-radiometría y Teledetección Ambiental (SpecLab-CSIC)

Mayoral Herrera, Victorino
Instituto de arqueología-Mérida CSIC

Merino De Miguel, Silvia
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Montorio Llovería, Raquel
Universidad de Zaragoza

Morales Rodrigo, Sara
Universidad de Extremadura

Navarro Almendros, Gabriel
Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAC-CSIC)

Nieto Masot, Ana
Universidad de Extremadura

Oliva Pavón, Patricia
Universidad de Alcalá

Parcero Oubiña, César
INCIPIT-CSIC

Peña Barragán, José Manuel
Instituto de Ciencias Agrarias, CSIC

Plaza Miguel, Antonio
Universidad de Extremadura

Polo García, María Eugenia
Universidad de Extremadura

Pons Fernández, Xavier
Universitat Autònoma de Barcelona

Pérez Pintor, José Manuel
Universidad de Extremadura

Pérez-cabello, Fernando
Universidad de Zaragoza

Quirós, Elia
Universidad de Extremadura

Recondo González, Carmen
Universidad de Oviedo

Roca Mora, Mar
ICMAN-CSIC

Rodríguez Galiano, Víctor
Universidad de Sevilla

Rolo Romero, Víctor
Universidad de Extremadura

Sapena Moll, Marta
Universitat de València

Schmid, Thomas
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)

Serra Ruiz, Pere
Universitat Autònoma de Barcelona

Sobrino Rodríguez, José Antonio
Universitat de València

Tomé Morán, José Luis
AGRESTA S.CCOP.

Torralba Pérez, Jesús
Universitat Politècnica de València

Verger, Aleixandre
CIDE, CSIC-UV-GVA

Zabala Torres, Alaitz
Universitat Autònoma de Barcelona

AET CÁCERES 2026
Teledetección Multidisciplinar:
Miradas Diversas, Soluciones Comunes

La Asociación Española de Teledetección (AET)

La Asociación Española de Teledetección (AET) es fruto del interés por generar una red científica y profesional entre las personas interesadas en los fundamentos y aplicaciones de esta tecnología. Nació en marzo de 1986 como Grupo de Trabajo en Teledetección (GTT). Posteriormente en septiembre de 1988, este grupo se convierte en la Asociación Española de Teledetección, tras inscribirse en el registro de Asociaciones del Ministerio de Interior. Ha realizado, desde entonces, XXI congresos científicos y múltiples reuniones técnicas, convirtiéndose en la asociación profesional de referencia en este campo. Además, ha publicado ininterrumpidamente desde 1993 la Revista Española de Teledetección, con periodicidad semestral.

Congresos y reuniones

1986	I Reunión Científica de la AET · Barcelona
1987	II Reunión Científica de la AET · Valencia
1989	III Reunión Científica de la AET · Madrid
1991	IV Reunión Científica de la AET · Sevilla
1993	V Reunión Científica de la AET · Las Palmas de Gran Canaria
1995	VI Reunión Científica de la AET · Valladolid
1997	VII Congreso Nacional de Teledetección de la AET · Santiago de Compostela
1999	VIII Congreso Nacional de Teledetección · Albacete
2001	IX Congreso Nacional de Teledetección · Lleida
2003	X Congreso Nacional de Teledetección · Cáceres
2005	XI Congreso Nacional de Teledetección · Puerto La Cruz, Tenerife
2007	XII Congreso de la AET · Mar del Plata, Argentina
2009	XIII Congreso de la AET · Calatayud
2011	XIV Congreso de la AET · Asturias
2013	XV Congreso de la AET · Madrid
2015	XVI Congreso de la AET · Sevilla
2017	XVII Congreso de la AET · Murcia
2019	XVIII Congreso de la AET · Valladolid
2022	XIX Congreso de la AET · Pamplona
2024	XX Congreso de la AET · Cádiz
2026	XXI Congreso de la AET · Cáceres

Índice

iv Prólogo
vi Introducción
viii Comité Organizador y Comité Científico
x Presentación AET
xii Índice

PONENCIAS PLENARIAS

3 Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus (CEMS) Componente On-Demand Mapping para respuesta inmediata (Rapid Mapping)
Oliva Martín Sánchez — Copernicus Emergency Management Service (CEMS), Joint Research Centre

5 La misión FLuorescence EXplorer (FLEX) de la Agencia Espacial Europea: cuantificación a escala global de la variabilidad en la actividad fotosintética de la vegetación
José Moreno — Laboratorio de Observación de la Tierra (LEO), Universidad de Valencia

7 Challenges and Opportunities for Generating Global High-Resolution Land-Cover Maps in the Era of Foundation Models
Lorenzo Bruzzone — Remote Sensing Laboratory, University of Trento

Sesión 1. Riesgos Naturales

11 Análisis global de las zonas quemadas para la evaluación climática: experiencias del proyecto FireCCI
Emilio Chuvieco

17 Detección automática de cambios en la superficie de la Comunidad Valenciana con datos de Sentinel 2
Yves Julien, José A. Sobrino, Rafael Llorens, Sergio Gimeno Crespo

23 Cartografía de severidad del fuego mediante imágenes Sentinel-2 en los incendios de Cáceres y Ourense (2025)
Rafael Llorens, José A. Sobrino, Belén Franch, Cristina Fernández, Ana Novo

29 Rendimiento del Normalized Radar Burn Ratio para la cartografía de áreas quemadas: más allá de índices ópticos
Yonatan Tarazona Coronel, Vasco Mantas

35 Clasificación de tipos de combustibles forestales empleando la tercera cobertura del PNOA LIDAR en la Depresión del Ebro
María Teresa Lamelas Gracia, Antonio Luis Montealegre Gracia, Santiago Patricio Romero Medina

41 Estimación de la biomasa consumida y del factor de eficiencia de quemado utilizando datos LiDAR aéreos y de satélite multitemporales
Mariano García, Patricia Oliva, Andrea Carbone, Adrián Baissero, Emilio Chuvieco

47 Uso de la evapotranspiración derivada de Observación de la Tierra para mejorar la detección temprana de sequías en pastizales semiáridos
Vicente Burchard-Levine, Abebe Mohammed Ali, Hector Nieto, Tinebeb Yohannes, Elias Cherenet Weldemariam, Ana Andreu, M.Pilar Martin, Nora Sharaf, M.Dolores Raya-Sereno

53 Dinámica de la vegetación en la región de Pirizal (Pantanal-MT, Brasil) mediante análisis temporal con datos PlanetScope
Vaniele Santana de Almeida, Segundo Durval Pereira Rezende, Gustavo Manzon Nunes

59 Análisis de la continuidad vertical del combustible forestal mediante descomposición gaussiana de nubes de puntos TLS
Jesús Torralba, Luis Á. Ruiz, Pablo Crespo-Peremarch, Marina Simó-Martí, Juan Pedro Carbonell-Rivera

65 Análisis de la incertidumbre espacial en modelos de susceptibilidad a movimientos en masa mediante Procesos Gaussianos
Sandra Cobos-Mora, Víctor Rodríguez-Galiano, José Guamán Aucapiña

71 Análisis de imágenes ante una catástrofe natural a diferentes escalas. El caso de la DANA en Valencia el 29 de octubre de 2024.
Libertad Chapinal Cervantes, Celia Gil Martín, Catalina Escudero Muñoz, Elena Mazón Ibáñez

77 Seguimiento de la humedad del combustible vivo mediante imágenes Sentinel-2 en la isla de Tenerife
Esther Peña Molina, Maria Luz Guillen Climent, Eva Marino del Amo, Ana Monedero de Andrés, Gustavo Adolfo Medina Méndez, Jose Luis Tomé Morán, Pedro Pablo Ranz Vega, Stéfano Arellano Pérez

83 Aplicación de la teledetección y los modelos de aprendizaje automático para la detección y seguimiento de daños causados por la banda marrón (Lecanosticta acicola) en masas de Pinus radiata en Euskadi
David Martín-Molina, Tomás Pugni-Stanek, Silvia Merino-de-Miguel

89 Ampliación del Gemelo Digital del Mar Menor al Territorio Regional: Metodología y Resultados Iniciales
Alvaro Navarro Frutos, Manuel Erena Arrabal, Marina Cabrera Díez, Francisco Javier López Andreu, Juan Antonio Lóez Morales, Marta Sanchez Alcaraz

95 Creación de una base de datos de incendios extremos a escala global (2003-2022)
Erika Solano-Romero, Carlota Segura-Garcia, M. Lucrecia Pettinari, Amin Khairoun, Miguel Ángel Torres-Vázquez, Emilio Chuvieco

101 Detección de períodos severos de sequía en zonas forestales protegidas mediante análisis del balance hídrico estimado mediante Teledetección
Jordi Cristóbal Rosselló, Mahsa Bozorgi, Vicent Altava-Ortiz

107 Caracterización de las descargas eléctricas que provocan incendios forestales en la Comunitat Valenciana
Daniel Orozco Bagou, Maria Jesús Barberà Bisbal, José Luis Soriano Sancho, Agustín Cervera Montero, Raúl Botella Bou, Miguel Estefano Olaiz, Concepción Verdú López, Mario Romero Vivó

113 Estimación del peligro de incendio con índices de humedad y de sequía meteorológica: experiencias de los grandes incendios de 2025
Miguel Ángel Torres-Vázquez, Patricia Oliva, Erika Solano-Romero, Valerio Pampanoni, Magí Franquesa, emilio Chuvieco

119 Simulación de la evolución del riesgo de incendio basado en LiDAR multitemporal: efecto de la gestión de la madera quemada a escala de paisaje en masas de Pinus pinaster
Eva Marino del Amo, Stefano Arellano Pérez, Olmo Villegas Ranera, Cristina Carrillo García, Santiago Martín Alcón, José Luis Tomé Morán, Javier Madrigal Olmo, Mercedes Guijarro Guzmán

125 Influencia del diseño muestral en la estimación del peligro de incendio forestal mediante XGBoost en el oeste de la Península Ibérica
Francisco Manuel Martínez García, José Jiménez Romanillos, Jorge Juan García Ramajo, Elia Quirós

131 Estudio de la umbralización de imágenes SAR en un episodio de inundación en el Río Gévora
Pablo Durán-Barroso, Laura Fragoso-Campón, Elia Quirós

137 Análisis de la potencia radiativa de grandes incendios forestales en la Comunitat Valenciana
Maria Jesús Barberà Bisbal, Daniel Orozco Bagou, José Luis Soriano Sancho, Agustín Cervera Montero, Raúl Botella Bou, Miguel Estefano Olaiz, Concepción Verdú López, Mario Romero Vivó

143 Integración de cartografía geológica de campo y seguimiento con drones para el asesoramiento en emergencias: deslizamientos activos en Alcalá del Valle (Cádiz)
Gabriel Navarro Almendros, Raquel Martín Banda, Jose Antonio Fernández Merodo, Jose Antonio Serrano Reina, Roberto Sarro Trigueros, Francisco Javier Fernández Naranjo, Juan Carlos Garcia Davalillo, Inés Galindo Jiménez

Sesión 02. Instrumentación, Procesado de Datos y Sistemas de Datos en Geociencias

151 Misiones de Observación de la Tierra de la Agencia Espacial Española: Constelación Atlántica Española (ESCA) y ESCA+
Ricardo Díaz-Delgado, Nicolás Martín, José María Pérez

157 Evaluación de sensores hiperespectrales para UAV dentro del proyecto SpaFLEXImp en Doñana
David Aragonés Borrego, Pedro J. Gómez-Giráldez, Gabriela P. Romero, Luis Barbero, Joaquín Cobos

163 Actualización del sistema de recepción y procesado de datos Meteosat de la Unidad de Cambio Global de la Universidad de Valencia
Yves Julien, José A. Sobrino, Juan-Carlos Jiménez-Muñoz, Guillem Sòria, Skokovic Drazen, Rafael Llorens

169 Reestructuración y estandarización del catálogo de datos de teledetección del PNT (IGN), mediante STAC, para la creación del Geonodo Español de Imágenes Satelitales (GNEIS)
Elena Aragoneses, José Luis Bermejo Priego, Agustín Tamés Noriega

175 Comparación de LST entre medidas in situ y productos satelitales de MODIS, SLSTR y VIIRS en la Base Antártica Marambio
Javier Gatón Herguedas, Abel Calle Montes, Roberto Román Diez, Ramiro González Catón, Daniel González Fernández, Celia Herrero del Barrio, Bruno Longarela Fuente, Sara Herrero Anta, David Mateos Villán, Juan Carlos Antuña Marrero, Carlos Toledano Olmeda, Victoria Eugenia Cachorro Revilla, Ángel Máximo de Frutos Baraja

181 Intercomparación espectral, radiométrica y de ángulo sólido “indoor” de los espectrorradiómetros FloX en el proyecto SpaFLEX
Óscar Gutiérrez de la Cámara Ara, Felix Muñoz Sanchéz, Jimmy A. Muela Pillajo, Adrián Moncholi Estornell, Pedro Gómez Giraldez, Miguel Gómez del Rio, Juan José Peón Garcia, Marcos Jiménez Michavila, Ricardo Díaz-Delgado, Mª Pilar Cendrero-Mateo, Joaquín Campos Acosta

187 Explotación de datos hiperespectrales aeroportados como sensores de oportunidad: captura, procesado y aplicaciones
Ramón Alamus, Anna Tardà, Luca Pipia, Fernado Perez

193 Clasificación Avanzada de Nube de Puntos LiDAR con Inteligencia Artificial: el caso práctico de Extremadura
Alejandro Redondo, Javier Becerra, Aurelio García, Luis Ángel Ruiz, Pablo Crespo, Juan Pedro Carbonell-Rivera

199 Lanzamiento y características de nuevos productos de vegetación de LSA SAF: el Data Record EPS VEGA-R
Adrián Jiménez-Guisado, F. Javier García-Haro, Manuel Campos-Taberner, Beatriz Martínez, Sergio Sánchez-Ruiz, María Amparo Gilabert, Fernando Camacho, Jorge Sánchez-Zapero, Enrique Martínez-Sánchez

205 Aplicación de los principios FAIR en el desarrollo de una plataforma de datos de teledetección: aprendizaje del proyecto GOYAS
Fernando Aguilar Gómez, Cristina González-Haro, Aina García-Espriu, Isabel Caballero de Frutos, Daniel García-Díaz, Diego García Díaz, Isabel Afán, Eva Flo, Antonio López

211 Obtención de mapas de altura de las nubes mediante una red de cámaras de todo cielo
Celia Herrero del Barrio, Roberto Román Diez, Sara Herrero-Anta, Daniel González-Fernández, Rogelio Carracedo, Ramiro González, Bruno Longarela, Javier Gatón, David Mateos, Abel Calle, Carlos Toledano, Victoria Eugénia Cachorro, Ángel de Frutos

217 FLEX-E, el simulador end-to-end de la misión FLuorescence EXplorer (FLEX)
Antonio Ruiz-Verdú, Carolina Tenjo, Ana Amelia Martín, António Falcão, Adrián Jacinto, Claudia Isola, José Moreno

223 Intercomparación “outdoor” de espectrorradiómetros de campo dentro del plan de calibración y validación SpaFLEX
Jimmy A. Muela Pillajo, Marcos Jiménez Michavila, Juan J. Peón Garcia, Óscar Gutiérrez de la Cámara Ara, Félix Muñoz Sánchez, Mª Pilar Cendrero-Mateo, Adrián Moncholí-Estornell, Cynthia Chardi-Raga, Pedro J. Gómez-Giraldez, David Aragonés

229 Estrategia de muestreo espacial multiescala para el diseño de campañas de validación dentro del proyecto SpaFLEX
Pedro Jesús Gómez Giráldez, David Aragonés, Marcos Jiménez, Mª Pilar Cendrero-Mateo, Jimmy Muela, Adrián Moncholi-Estornell, José Moreno, Joaquín Cobos

235 SpaFLEX: estrategia Cal/Val del producto Fluorescencia y Reflectancia de la misión FLEX-S3 en test-sites de variadas formaciones vegetales y gradientes de heterogeneidad
Marcos Jiménez, M.ª Pilar Cendrero-Mateo, Pedro J. Gómez-Giráldez, Adrián Moncholi-Estornell, Juanjo Peón, Oscar Gutierrez de la Camara Ara, Félix Muñoz Sanchez, Joaquín Cobos, Amelia Montoro, Jimmy A. Muela, David Aragones, Laura Carretero, Ana López-Ballesteros, Álvaro Doblas-Rodrigo, Cynthia Chardi-Raga, Carolina Tenjo, J.Cesar Marchante-Cambrón, Shari van Wittenberghe, Ricardo Díaz-Delgado, Jesús Delegido, José Moreno

241 SIRIUS: Una misión candidata al programa SCOUT de la ESA en el infrarrojo térmico para la caracterización del entorno urbano
José Antonio Sobrino, Alfonso Rodríguez-Alija, María A. Vidal-Urriza, Sergio Moreno, Luis Pascual de la Torre, Jose Romero, Roberto Sánchez-Labrador, Federico Branca, Eduardo de Miguel Llanes, Laura Carretero, Yves Bobichon, Mantas Auruškevičius, Simon Proud, Agne Paskeviciute-Kidron, Adriana Perrino, Luca Schifano, Drazen Skokovic, Rafael Llorens

247 Teledetección 3D activa y pasiva para la caracterización geométrica del fuste forestal: comparación entre MLS, LiDAR de consumo, SfM y Gaussian Splatting
Juan Pedro Carbonell Rivera, Jesús Torralba, Pablo Crespo-Peremarch, James Mcglade, Marina Simó-Martí, Luis Ángel Ruiz, Iyán Teijido-Murias

253 Sistema aeroportado CFL + CASI y campaña de adquisición de datos de fluorescencia en el proyecto SpaFLEX
Félix Muñoz, Óscar Gutiérrez de la Cámara, Eduardo de Miguel, Marcos Jiménez, Laura Carretero, Juanjo Peón, Jimmy A. Muela, Mª Pilar Cendrero-Mateo, José Moreno, Adrián Moncholí-Estornell, Pedro J. Gómez-Giráldez, Joaquín Cobos, Ricardo Díaz, David Aragonés, Amelia Montoro, Francisco Belmar, David Horsman, Diego Godoy, Felipe Tapia

259 NB-IoT sobre 5G NTN como habilitador de comunicaciones CNPC resilientes para UAVs en operaciones BVLOS
Mouhsine Kassimi Farhaoui, Alejandro Pariente Migoya, Francisco Javier Pérez Grau, Antidio Viguria Jiménez, Joaquín Cruces Pérez, Adrián Guirado Luna, Sergio Aguilar Romero

265 Reconstrucción de la Geometría de Adquisición en Nubes de Puntos de Láser Terrestre Multi-Escaneo mediante Indexación Angular Adaptativa
Adrián Enrico Baissero García, Mariano García, Patricia Oliva

271 Cambios en la estructura vegetal y el régimen hídrico de lagunas temporales del Espacio Natural de Doñana
Diego García Díaz, José Marín Salcedo, Antonio Rodríguez Ramírez, Javier Bustamante Díaz

Sesión 03. Impactos del clima y la meteorología

279 Implementación de una estación de calibración, de datos de satélite, de gases de efecto invernadero y aerosoles
Abel Calle Montes, Ramiro González, Omaira García, Rogelio Carracedo, David Mateos, Roberto Román, Carlos Toledano, Victoria Cachorro, Angel de Frutos, Ramón Ramos, Carlos Torres

285 Corrección de sesgos en los vientos de ERA5 mediante aprendizaje automático
Evgeniia Makarova, Marcos Portabella, Ad Stoffelen

291 Eficiencia del uso del agua de los ecosistemas a nivel global a partir de datos de satélite

M. Vallés Iborra, M. Campos Taberner, M.a Gilabert

297 Eficiencia en el uso del carbono de los ecosistemas
Manuel Campos-Taberner, María Amparo Gilabert, Sergio Sánchez-Ruiz, Beatriz Martínez, Adrián Jiménez-Guisado, F. Javier García-Haro

303 Análisis de las propiedades dieléctricas del agua del mar en el espectro de microondas
Arnau Ruiz Sebastián, Joan Bergas, Verónica González Gambau, Antonio Turiel, Raul Onrubia, Estrella Olmedo

309 Downscaling estadístico de LST diurna y nocturna de MODIS. Evaluación e impacto en la detección de patrones espaciales de mortalidad relacionada al calor en adultos mayores
Angelo Hernane Olivares-Solís, Pere Serra Ruiz, Oliver Meseguer-Ruiz

315 Evaluación de variables radar para la discriminación de daños agrícolas por granizo
Barbara Beatriz Molina Jiménez, Jesús Álvarez Mozos, María González de Audícana Amenábar

321 Modelización y atribución de la dinámica vegetación-clima a escala global mediante inteligencia artificial explicable
Daniel García Díaz, Fernando Aguilar Gómez, Santiago A. Schauman, Aleixandre Verger

327 Impacto del Cambio Climático en la Temperatura de las Grandes Aglomeraciones Urbanas del Mundo
Daniel Salinas González, José A Sobrino Rodriguez, Ángel Balaguer Beser, Drazen Skokovic Jovanovic

333 Cuantificación de flujos de energía en regiones insulares mediterráneas bajo cambio climático: implementación del modelo TSEB mediante datos de Teledetección
Jordi Cristóbal Rosselló, Jaume Company, Joan Estrany, Xurxo Gago

339 El método Nearest Neighbour Temperature Sharpening para la mejora de la resolución espacial de la TST
Drazen Skokovic, José Antonio Sobrino, Rafael Llorens

Sesión 04. Sistemas Agroforestales

347 Caracterización espectrofenológica de formaciones vegetales de ribera en Cantabria
Álvaro Fernández-Menéndez, Laura Concostrina-Zubiri, José Barquín

353 Cartografía forestal mediante datos multiespectrales de alta resolución y técnicas avanzadas de clasificación
Francisco Javier Marcello Ruiz, Francisco Eugenio González, Antonio Mederos Barrera, Consuelo Gonzalo Martín, Ángel Mario García Pedrero, Meryeme Boumahdi

359 Evaluación del potencial de los modelos de Deep Learning para la clasificación de árboles a nivel de género utilizando datos LiDAR
Alejandro Morales-Martín, Francisco Javier Mesas-Carrascosa, Fernando Pérez-Porras, Víctor Manuel Vargas, Francisco Moreno-Cano, Pedro Antonio Gutiérrez

365 Evaluación de la combinación de variables dasométricas y de teledetección en la predicción de la vecería en Pinus pinea L. mediante Machine Learning
Alejandro Morales-Martín, Jorge Torres-Sánchez, Javier Vázquez-Piqué, Francisco Javier Mesas-Carrascosa, Pedro Antonio Gutiérrez, Miguel Montoro Girona, Marta Pardos, Rafael Calama

371 Análisis comparativo de modelos de distribución espacial para Hemiberlesia rapax (Hemiptera: Diaspididae) en Chile
Zahylis Zambrano, Jesús Torralba, Daniela Rivera, Idania Briceño de Urbaneja, Paul Amouroux

377 Generación de imágenes sintéticas para mejorar la clasificación de sistemas de plantación del olivar con YOLOV8
Juanma Muñoz-Lorite, Jorge Torres-Sánchez, Francisco Javier Mesas-Carrascosa, Fernando Pérez-Porras

383 Caracterización de la madurez forestal utilizando LiDAR
Ayanta Velasco, Jose Barquín, Laura Concostrina-Zubiri

389 Clasificación de cubiertas forestales en la isla de La Palma mediante series temporales Sentinel-2 y Transformers
Consuelo Gonzalo Martín, Ángel Garcia Pedrero, Meryeme Boumahdi, Dionisio Rodríguez Esparragón, Javier Marcello

395 Desarrollo de un algoritmo para la detección, identificación y posicionamiento automático de árboles mediante deep learning y métodos topográficos
Sergio Pérez Pablos, Tomás Pugni Stanek, Silvia Merino de Miguel

401 Detección de perturbaciones en pinares mediante series temporales Landsat y el algoritmo Edyn.
Lorena Caiza-Morales, Cristina Gómez, José Miguel Olano

407 Segmentación de estratos forestales en bosques mediterráneos mediante deep learning y nubes de puntos LiDAR terrestres y móviles
Pablo Crespo-Peremarch, Juan Ramón Valencia Alzate, Juan Pedro Carbonell-Rivera, Jesús Torralba, Luis Ángel Ruiz

413 Evaluation of keyline design using the simplified triangle method in Mediterranean agroecosystems
Víctor Rolo Romero, Laura Fragoso Campón, Elia Quirós Rosado, Gerardo Moreno Marcos

419 Ensamblaje de modelos para el seguimiento de las necesidades hídricas de los cultivos leñosos mediante Teledetección
Juan Manuel Sánchez, Alejandro Moya, Héctor Nieto, Alvaro Sánchez-Virosta, Joan Miquel Galve, José González-Piqueras

425 Evaluación del efecto del estrés ambiental, la severidad y el estado pre-incendio en la recuperación post-incendio de masas de Pinus y Quercus.
Ana Laura Giambelluca, María González-Audícana, Txomin Hermosilla, Jesús Álvarez-Mozos

431 Evaluación de imágenes de alta resolución para el seguimiento de la floración de la encina
Ana Calbet, Alma M. García Moreno, M. Dolores Carbonero, M.jose Muñoz Gómez, Ana Andreu, Francisco Cáceres Clavero, María P. González-Dugo

437 Retrodispersión estacional en banda C de Sentinel-1 en bosque tropical seco; interacciones entre régimen ecohidrológico y geometría de observación.
Rubén Martínez Barbáchano, Joaquín Escayo Menéndez, Fernando Pérez-Cabello, Pedro José Lozano Valencia

443 Validación de mediciones dendrométricas y de volumen con dron bajo copa y dron sobre copa en masas de Pinus sylvestris
Raquel Martinez-Rodrigo, Pablo Sabin, Carlos Garcia, Ángela Blázquez-Casado

449 Seguimiento de servicios ecosistémicos en agrosistemas mediterráneos integrando teledetección
M.José Muñoz-Gómez, M.Dolores Carbonero, Ana Calbet, Alma M. Garcia-Moreno, Anastasio J. Villanueva, M.Pat. González-Dugo

455 Aplicaciones de Google Satellite Embeddings en la cartografía de plantaciones forestales en Uganda
Jessica Esteban, José Antonio Navarro, José Luis Tomé, Isabel González

461 Comparación de métricas de sensores WorldView-3 y Sentinel-2 con escáner láser aerotransportado para la identificación de bosques viejos de Pinus nigra en el sureste de España
Carlos Guerrero Cubero, Anabel Calzado Carretero, David Aragonés Borrego, Javier Vázquez Piqué

467 Estudio de perturbaciones forestales en Andalucía oriental a partir de series temporales de Sentinel-2 y la aplicación del algoritmo BFAST
Jose M. Ollega Caro, Diego López-Nieta, Victor Rodriguez-Galiano, Francisco M. Canero

473 Avances en la clasificación de tipos de bosque en el Sistema Ibérico español: comparación entre series temporales Landsat y AlphaEarth Foundations de Google
Saioa Munuera Irurzun, Cristina Gómez, Aman Oli, Darío Domingo, Francisco Rodriguez Puerta

479 Clasificación automatizada basada en series temporales y variables estructurales a partir de sensores remotos (S2, S1 y LiDAR).

Tomas Luis Pugni Stanek, Isabel González González, Jose Luis Tomé, Jessica Esteban Cava, Nur Algeet Abaquero, Laura Recuero Pavon, Silvia Merino de Miguel

485 Estimación de la edad de los bosques de la península Ibérica a partir de datos de Inventario Forestal Nacional y de teledetección
Marina Rodes Blanco, Julen Astigarraga, Thomas A. M. Pugh, Verónica Cruz-Alonso, Sofía Miguel, Miriam Bravo-Hernández, Cristina Grajera-Antolín, Julián Tijerín-Triviño, Miguel A. Zavala, Jordi Vayreda, Albert Vilà-Cabrera, Paloma Ruiz-Benito

491 Evaluación de la representatividad del producto fenológico “High Resolution-Vegetation Phenology and Productivity” en la España mediterránea
Guilhem Nicolás Jeannet Chaves, Víctor Francisco Rodríguez Galiano, José Antonio Caparrós Santiago

497 Análisis comparativo de productos globales de fenología de la superficie terrestre derivados de MODIS, VIIRS y OLCI frente a observaciones in situ de despliegue foliar de la red PEP725
José Antonio Caparrós Santiago, Guilhem Nicolás Jeannet Chaves, Víctor Rodríguez Galiano

503 Detección de síntomas tempranos de decaimiento en bosques abiertos de encinas mediante imágenes satelitales de muy alta resolución espacial
M. Pilar Martín, Rosario González-Cascón, Vicente Burchard-Levine, Lucía Casillas-Martínez, Javier Pacheco-Labrador, Georg Bareth

509 Declive de los "Pinos Padre" de Pinus canariensis en la vertiente sur del Teide: Análisis basado en LiDAR multitemporal y estrés hidro-climático
Iñaki Etxebeste, Ángela Blazquez Casado, Tomas Remeses, Juan Agullo

515 BOSSE. A tool for benchmarking new methods in remote sensing of plant functional diversity, and more
Javier Pacheco-Labrador, Ulisse Gomarasca, Daniel E. Pabon-Moreno, Wantong Li, Mirco Migliavacca, Martin Jung, Gregory Duveiller, Juan R. Bustos-Caparrós, Jorge Lagranja-Usán, M. Pilar Martín

521 Detección de la riqueza floral en agrosistemas mediante imágenes UAV e inteligencia artificial
Juan Diego Mena, Gustavo Adolfo Mesias-Ruiz, Jose García-Guerra, Darwin Castillo-Malla, José Manuel Peña, José Dorado, Irene Borra-Serrano

527 Simulación y análisis de la velocidad de propagación del fuego en entornos forestales a partir de nubes de puntos TLS
Marina Simó-Martí, Jesús Torralba, Pablo Crespo-Peremarch, Luis Ángel Ruiz

533 Clasificación basada en objetos de especies vegetales en áreas de restauración forestal usando imágenes multiespectrales adquiridas con UAV
Jhiorranni Freitas Souza, Aroldo Ferreira Lopes Machado, Bruno Araújo Furtado de Mendonça, José Manuel Peña

539 Mapa de Interfaz Urbano-Forestal de Navarra
Gabriel Bonifaz Barba, Jesús Álvarez-Mozos, María González-Audícana, Fermín Alcasena

545 Ecosystem Services Evaluation in the Hyrcanian Temperate Forests using Multi-Source Data Integration
laya Zeinali, Hormoz Sohrabi, Elia Quiros, Markus Immitzer

Sesión 05. Oceanografía y Zonas Costeras

553 Productos de clorofila-a derivados del algoritmo C2X en las aguas ópticamente complejas del Golfo Ártabro (NO España)
Gema Casal Pascual

559 Inteligencia Artificial Aplicada a los Drones: Escalado vs Super-Resolución en el Estudio de Sistemas Costeros
Alejandro Román, Antonio Tovar-Sánchez, Roc Xanxo, Águeda Vázquez, Gabriel Navarro

565 Impacto de la turbidez y la clorofila-a en la batimetría derivada de Sentinel-2: análisis en el litoral de Barcelona

David Pubill Fondevila, Bernat Gené Skrabec, Roger HUERTA I Lluch, Eduard Angelats Company

571 Sistema integrado de detección y alerta de riesgo de derrames de petróleo en la Zona Económica Exclusiva brasileña
Lourenço Alves de Paula, Victor Vinicius Araujo Ferreira, Edson Eyji Sano

577 Análisis de la exactitud del nivel del mar obtenido con el satélite SWOT, usando medidas in-situ
Jesús Gómez Enri, Bárbara Arribas Rodríguez, Begoña Tejedor Ávarez, Óscar Álvarez Esteban, Carlos José González Mejías, Stefano Vignudelli

583 Evaluación de la corriente geostrófica derivada del satélite SWOT mediante radar de alta frecuencia
Bárbara Arribas Rodríguez, Roberto Muleo Martínez, Jesús Gómez Enri

589 Aplicación de código abierto para el seguimiento de arribazones de Rugulopteryx okamurae acumulados en playas mediante Sentinel-2
Sara Haro, Isabel Caballero, Gabriel Navarro

595 El potencial del SAR para el análisis de cambios morfológicos en playas: tendencias actuales y nuevas fronteras
María del Carmen Millán Roldán, Erica Pellón de Pablo, Paula Gomes da Silva

601 ¿Se está deteniendo la AMOC? Lo que la teledetección puede decir al respecto
Antonio Turiel Martínez, Joan Bergas Ques, Arnau Ruiz Sebastián, Verónica González Gambau, Estrella Olmedo Casal

607 Teledetección con drones y satélites para la monitorización medioambiental de la Antártida
Gabriel Navarro Almendros, Alejandro Román Vázquez, Antonio Tovar Sánchez

613 NUEVAS ESTIMACIONES SATELITALES DE FLUJOS OCEÁNICOS SUPERFICIALES
Joan Bergas Ques, Arnau Ruiz Sebastián, Verónica González Gambau, Antonio Turiel Martínez, Manuel Arias Ballesteros, Ana Sagués Carracedo, Estrella Olmedo Casal

619 Caracterización de los sistemas duranes costeros del Atlántico SW de España mediante un método semi-supervisado a partir de compuestos de Sentinel-2
Diego Lopez-Nieta, Victor Rodriguez-Galiano, Emilia Guisado-Pintado

625 Zonificación del Mar Menor mediante aprendizaje no supervisado sobre la serie histórica de Sentinel-2.
Paola Barba Ceballos, Sergio Heredia, Gabriel Navarro, Belén Rosado, Mar Roca Mora, Isabel Caballero

631 Arribazones de macrófitos marinos: seguimiento mediante datos de teledetección hiper- y multiespectral
Mar Roca Mora, Bede Ffinian Rowe Davies, Pierre Gernez, Maria Laura Zoffoli, Laurent Barillé

637 Morfodinámica en la desembocadura del río Mataquito, Chile: un estudio de caso basado en imágenes satelitales y eventos extremos
Idania Briceño-de-Urbaneja, Waldo Pérez-Martínez, Joaquin Valenzuela-Jara, Isidora Diaz-Qujada

Sesión 06. Agricultura Sostenible y Resiliente

645 Una metodología para estimar la intensidad de las heladas y el daño en plantaciones de naranjos utilizando datos de Meteosat en la Comunidad Valenciana
Sergio Gimeno, Virginia Crisafulli, Álvaro Sobrino-Gómez, José A. Sobrino

651 Comparación entre la demanda teórica de riego y la estimación derivada de un balance hídrico asistido por teledetección a escala de parcela
Antonio Molina-Medina, José González-Piqueras, Jesús Garrido-Rubio

657 Integración de datos de teledetección multiplataforma para la monitorización del vigor y el estrés hídrico en cultivos de viñedos y olivares
Francisco Javier Marcello Ruiz, Francisco Eugenio González, Antonio Mederos Barrera

663 Análisis de la evolución temporal de las firmas espectrales de diferentes variedades de olivo en seto: riego vs secano
Jorge Torres Sánchez, Fernando Pérez Porras, Lorenzo León, Raúl de la Rosa, Susana Cantón Martínez, Francisco C. Páez, Francisco Javier Mesas Carrascosa

669 Evaluación del impacto de diversas estrategias de gestión del agua en el rendimiento del arroz
David Gómez Candón, Néstor Pérez-Méndez, Jose Antonio Jimenez-Berni, Mar Catala-Forner, Joaquim Bellvert, Dolors Villegas

675 Monitorización de la respuesta productiva en trigo a la aplicación de abonos orgánicos mediante el uso de imágenes satelitales
Ana Martínez, Rubén Simeón, Alba Agenjos Moreno, Ana Isabel Escudero, Marcos Moreno, Antonio Uris, Alejandro Alcaraz, Miguel Ángel Naranjo, Contanza Rubio, Alberto San Bautista

681 Validación agronómica de la aplicación variable de nitrógeno y semilla en trigo mediante zonificación por Clustering
Enric Cruzado-Campos, Javier Coronado-Campos, Patricia Arizo-García, Sergio Castiñeira-Ibáñez, Daniel Tarrazó-Serrano, Beatriz Ricarte, Pablo de la Rubia, Marcos Caballero-Molada, Constanza Rubio, Alberto San Bautista

687 Sensores remotos para la optimización de la fertilización nitrogenada en trigo
Miguel Quemada, Jose Luis Pancorbo, Nuria Arencibia-Pérez, María Dolores Raya-Sereno, Pablo J. Zarco-Tejada, Jose Luis Gabriel

693 Integración de modelos asistidos por satélite para contabilizar el agua consumida por los cultivos
Jesús Garrido-Rubio, Antonio Molina-Medina, Alejandro Moya, C. Dionisio Pérez-Blanco, Juan Manuel Sánchez, José González-Piqueras, Joan Miquel Galve

699 Teledetección del estrés hídrico en maíz: aplicación de la termometría infrarroja bajo riego deficitario en clima templado
Andrés di Lorenzi, Lucía Puppo

705 PRODUCTOS DE TELEDETECCIÓN EMPLEADOS EN LA GESTIÓN DE REGADÍOS MODERNIZADOS EN LEÓN
Blanca Sanchez Hernandez, Pedro Javier Fernandez Pesado, Rodrigo Calero Gil, Maria P. Gonzalez-Dugo

711 Evaluación comparativa de EnMAP y Sentinel-2 para la estimación de rasgos biofísicos en los cultivos de arroz del Bajo Guadalquivir
Daniel Arlanzón, Víctor Rodríguez-Galiano, Francisco M. Canero, Aarón Cárdenas-Martínez

717 Cartografía precisa de viñedos mediante U-Net y datos multimodales PNOA
Antonio Ramón Mederos Barrera, Francisco Javier Marcello Ruiz, Francisco Eugenio González

723 Sat4Carbon: Integración de teledetección térmica y modelos mecanísticos para la cuantificación de flujos de carbono en ecosistemas silvopastorales
Adrián Olalla, Sergio Sierra, Benjamin Mary, Héctor Nieto

729 Estimación del diámetro en olivos jóvenes mediante LiDAR móvil terrestre y RTK para su aplicación en modelos de biomasa
Gema Tarraga Martinez, Juan Miguel Oñate Tevar, José Belenguer Ballester

735 Uso de sensores para estimar el potencial productivo y la fenología en genotipos de trigo
Nuria Arencibia Pérez, Miguel Quemada, Ana M. Tarquis, Ana de Castro, Magdalena Ruiz, Raúl San Juan, José Luis Gabriel

741 Clasificación de cultivos mediante series temporales Sentinel-1: contribución de observables pseudo-polarimétricas
Judit Sanz Cano, María González-Audícana, Jesús Álvarez-Mozos

747 Influencia de la variabilidad varietal del arroz en la clasificación de niveles de nitrógeno mediante teledetección
Fàtima Della Bellver, Belen Franch Gras, Javier Tarin Mestre, Cesar José Guerrero Benavent, Concha Domingo Carrasco, Mar Català Forner, Karen Martí, Luis Marqués

753 Optimización del momento de vuelo UAV y selección de predictores para estimar el vigor vegetativo (peso de poda) en viñedos

Jose García-Guerra, Vicente Burchard-Levine, Irene Borra-Serrano, José Dorado, Ana de Castro, José Manuel Peña

759 Integrating Remote Sensing and Light Use Efficiency Modelling for Long Term Regional Wheat Yield Estimation
Mahsa Bozorgi, Jordi Cristóbal, Jaume Casadesus

765 Integración de UAV multiespectral/térmico, captura de esporas y evaluación fitosanitaria para la vigilancia de Bipolaris oryzae en arroz
Juan Valdiviezo Espinoza, María Jaramillo Carrión, Jaime Aguilar Lome, Luis Ruiz Fernández, Lia Ramos Fernández

Sesión 07. Arqueología y Teledetección de Proximidad

773 Multi-source data combination for plant functional diversity estimation: an ecological and remote sensing integrative approach
Jorge Lagranja-Usán, Javier Pacheco-Labrador, Alejandro Carrascosa, Vicente Burchard-Levine, Víctor Rolo, M. Pilar Martín

779 Análisis de la caducidad foliar en plantaciones de Tectona grandis mediante datos multiespectrales orbitales y obtenidos con UAV
Gustavo Manzon Nunes, Diego Santos da Silva, Jaçanan Eloisa de Freitas Milani, Maricéia Tatiana Vilani, Segundo Durval Pereira Rezende, Mallu Arenhart Pirolla, Fernando Scognamiglio Torres

785 Análisis LiDAR del PNOA para la interpretación topográfica del paisaje funerario en el yacimiento del “Castillo de Doña Blanca” (Cádiz, España)
Pablo Sicre-González, Antonio Pecci, Ana María NIVEAU-DE-VILLEDARY Y Mariñas

791 Caracterización de firmas espectrales aplicadas a la detección de restos soterrados: el caso del Forau de la Tuta (Artieda)
Cristian Iranzo, Raquel Montorio, Fernando Pérez-Cabello, Jorge Angás, Alessandro Mateos, Juan Manuel Sánchez, José González-Piqueras, Álvaro Sánchez-Virosta

797 Modelado de las fracciones de carbono orgánico del suelo mediante espectroscopía vis-SWIR
Raquel Montorio Llovería, Estela Nadal Romero, Fernando Pérez Cabello, David Badía Villas

803 Modelos de IA para la detección y cuantificación de lodos post-DANA en Valencia mediante imágenes de dron y satélite
Roc Xanxo Prilló, Alejandro Román Vázquez, Antonio Tovar Sánchez, Gabriel Navarro Almendros

809 Evaluación comparativa del LiDAR PNOA y LiDAR de alta densidad para la detección de estructuras arqueológicas: el castro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres) como caso de estudio
Victorino Herrera, Elia Quirós Rosado, Carmen Pro Muñoz, Maite de Tena Rey

Sesión 08. Big GeoDATA

817 Ndvi2Gif: Análisis multi-estacional mediante Google Earth Engine
Diego García Díaz

823 TSGenerator: librería R de código abierto para el procesado integrado de productos fenológicos HR-VPP de Copernicus
Alexey Valero-Jorge, Mª Auxiliadora Casterad, José-Tomás Alcalá

829 Cambio de modelo productivo en el PNOA-LiDAR: clasificación semántica automática a escala nacional
Jesús María Garrido Sáenz de Tejada, Guillermo Puchol Sola, Ernesto Ballestero García-Asenjo

835 Observación terrestre de mayor resolución y más eficiente computacionalmente

Aina Garcia-Espriu, Cristina González-Haro, Verónica González-Gambau, Arnau Ruiz-Sebastian, Estrella Olmedo, Antonio Turiel, Ruben Marti-Burillo

841 Clasificación de usos de suelo en las Illes Balears a partir de datos en abierto mediante UNet
Andrés Bravo Núñez, Isabel González, Santiago Martín-Alcón, Pablo Crespo-Peremarch, Luis Ángel Ruiz

847 Procesamiento de datos Sentinel-2 en entornos de Big Data: evaluación de Google Earth Engine frente a procesamiento local para la generación de índices de vegetación aplicados a predicción de incendios
José Jiménez Romanillos, Francisco Manuel Martínez García, Jorge Juan García Ramajo, Elia Quirós

Sesión 09. Cartografía, Geodesia y fotogrametría

855 Reto de la Cartografía en las Vegas Cultivadas: Impacto de Errores de los MDE Oficiales en la elaboración de Mapas de Riesgo de Inundación
Laura Fragoso-Campón, Javier Rodríguez Mayoral, Alicia Antolín Salazar, Elia Quirós

861 Reconstrucción del cauce usando altimetría fotogramétrica SfM: El "Método del Dominio Fluvial"
Jairo Escobar Villanueva, Jhonny Pérez Montiel, Andrea Nardini

867 Monitorización del estado del césped en un parque urbano mediante cámaras RGB de bajo coste
Mónica Guillén Castillo, Alexey Valero-Jorge, Mª Auxiliadora Casterad Seral, Raquel Salvador Esteban

873 Cartografía y análisis de la Interfaz Urbano-Forestal en Chile
Pere Gelabert Vadillo, Jorge Félez Bernal, Rodrigo Crespo Pérez, Fermín Alcasena Urdioz, Marcos Rodrigues Mimbrero

879 ForestMap-IA, Digitalización forestal y sensores remotos orientada a fomentar la gestión forestal sostenible
José Luis Tomé Morán, Jessica Esteban Cava, Andrés Bravo Núñez, Isabel González González, Pedro Pablo Ranz Vega, Santiago Martín Alcón

885 ORTOFOTOGRAFÍA URBANA DE MUY ALTA RESOLUCIÓN COMO APOYO A LA GESTIÓN MUNICIPAL: CASO DE ESTUDIO EN LA CIUDAD DE CÁCERES
Luis Antonio Alvarez Llorente, Faustino Cordero Montero, Conchi Mariscal Yuste

891 Predicción espacial de la capacidad ecosistémica urbana a partir de datos de teledetección y aprendizaje automático
Ariadna Álvarez Ripado, Adrián García Bruzón, Fátima Arrogante Funes, Patricia Arrogante Funes

897 Regla 3–30–300: enfoque metodológico SIG–LiDAR para el diagnóstico urbano en Cáceres, España
Celia Gil, Libertad Chapinal

903 Armonización multifuente de perturbaciones forestales: de productos existentes a una cartografía robusta
Isabel González, Mariluz Guillén-Climent, Andrés Bravo-Núñez, Jessica Esteban, José Luis Tomé

909 Deep Learning–Based Identification of LULUCF Categories Using a Mixture of Experts Architecture and Remote Sensing Data
Sergio García Martín, Adrián García Bruzón, Fátima Arrogante Funes, Isaac Martín de Diego, Alberto Fernandez Isabel, Ariadna Álvarez Ripado, Fidel Martín González, Víctor Aceña Gil, María del Carmen Lancho Martín, Patricia Arrogante Funes

915 Análisis comparativo de técnicas de filtrado de vegetación para la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) a partir de datos fotogramétricos (RGB y multiespectrales) y LiDAR con dron en viñedos
María Teresa González-Moreno, Laura Cambronero-Ruiz, Víctor Rodríguez-Galiano, Jesús Rodrigo-Comino

921 CLMS Protected Areas: un enfoque semiautomático de uso del suelo y cobertura del suelo (LULC) basado en información de series temporales de alta resolución de Copernicus y su conexión con la cartografía de hábitats.
Javier Becerra, José Manuel Álvarez-Martínez, Borja Jiménez-Alfaro, Justine Hugé, Carlos Dewaissage, Chris Poray, Dimitri Papadakis, Adrián Cost, Ana Sousa

927 Uso de Modelos Digitales de Alturas para objetivar la cartografía de clasificación de cubiertas del suelo
Xavier Pons Fernández, Mario Padial-Iglesias, Oscar González-Guerrero, Miquel Ninyerola

933 ¿Mejora el enfoque GEOBIA el rendimiento de la clasificación de la vegetación en paisajes heterogéneos y dinámicos?
Daniel Pfitzer-López, José V. Roces-Díaz, José M. Fernández-Guisuraga, Lucía García-Candanedo, Susana Suárez-Seoane

939 Priorización espacial de turberas altoandinas mediante FAHP y teledetección en la cuenca del río Utcubamba (Perú)
Jhonsy Omar Silva López, Luis Á. Ruiz, Lia Ramos Fernández, Efraín Turpo, Nilton B. Rojas-Briceño, R. R Gutiérrez

945 Cartografía de la innivación: más allá del NDSI
Xavier Pons Fernández, Martí Navarro, Lluís Pesquer, Cristina Cea, Lluís Gómez-Gener

Sesión 10. Ciencias Hidrológicas, Ingeniería Hidráulica y Recursos Hídricos

953 Modelación hidrodinámica en zonas deltaicas para evaluar alternativas de solución a inundaciones
Jhonny I. Pérez Montiel, Jairo R. Escobar Villanueva, Andrea Gianni Cristoforo Nardini

959 Evaluación del estado de la vegetación de ribera mediante teledetección como referencia para el análisis de caudales ecológicos adaptativos.
Francisco Herrera, Eva Contreras, Rafael Pimentel, Ana Andreu

965 El proyecto DESPISTE como fuente de información para la evaluación de la presión de las piscinas de uso privado sobre masas de agua subterránea
Jesús Gómez Enri, María Luisa Pérez Cayeiro, Manuel Arcila Garrido, Juan Adolfo Chica Ruíz, Rafael Mañanes Salinas, Carlos Román-Cascón, Begoña Tejedor Álvarez, Jesús Barragán Sánchez, Juan Moreno Camacho

971 Iniciativa: Estimación de la Evapotranspiración en España
Ana Andreu, Joaquim Bellvert, Vicente Burchard-Levine, Jordi Cristóbal, Jesús Garrido-Rubio, María P. González-Dugo, Pedro Gómez-Giraldez, Héctor Nieto, Juan Manuel Sánchez

977 Análisis del efecto del cambio climático en la demanda hídrica futura de los cultivos en regadío en el Alto Guadiana mediante teledetección y proyecciones climáticas
Jaime Campoy, Juan Manuel Sánchez, Antonio Beltrán, David Sánchez, Irene Arellano, Antonio Molina-Medina, José González-Piqueras, Joan Miquel Galve, Esteban Rodríguez, Ramiro Romero, Alfonso Calera

983 Algoritmos para la estimación de la calidad del agua de la Albufera de Valencia con imágenes Sentinel-2
Gabriel Rodrigo Caballero, Xavier Sòria-Perpinyà, Bárbara Alvado, Antonio Ruíz-Verdú, Juan Miguel Soria, Eduardo Vicente, Concha Durán Lalaguna, Damián Ortega Terol, José Moreno, Jesús Delegido Gómez

989 IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS BIOGEOQUÍMICOS CON SENTINEL–2 PARA LA MONITORIZACIÓN SISTEMÁTICA DE EMBALSES MEDITERRÁNEOS DE AGUAS CLARAS MEDIANTE COPERNICUS BROWSER
Gabriel Rodrigo Caballero Cañas, Xavier Sòria-Perpinyà, Bárbara Alvado Arranz, Antonio Ruiz-Verdú, Eduardo Vicente, Concha Durán Lalaguna, Damián Ortega Terol, Jesús Delegido, José Moreno

995 Del grado de saturación del suelo al caudal: integración de EU-SoilHydroGrids y ERA5-Land en modelos hidrológicos
Jorge Juan García Ramajo, José Jiménez Romanillos, Francisco Manuel Martínez García, Laura Fragoso Campón

1001 Desarrollo de una aplicación en Google Earth Engine para la monitorización de masas de agua mediante teledetección
Miguel Ramón Alvarado Fernández, Elia Quirós, Laura Fragoso-Campón

Sesión 11. Geología, Mineralogía, Petrología y Geomorfología

1009 Caracterización de residuos mineros sulfurosos mediante imagen hiperespectral UAS de alta resolución: mina de Lagunazo (SO de España)
Raúl Moreno González, Andrea Curcio, Melisa Isgró, Luis Barbero, María Dolores Basallote

1015 Exploración de indicios de litio en la zona de Téra (Tillaberi, Níger) mediante Índices Litológicos Espectrales
Salomón Montesinos Melendo, César Luque Ballestero, Lara Fernández Fornos, Salomón Montesinos Aranda

1021 Predicción de la calidad del agua en entornos afectados por la minería: un estudio de teledetección hiperespectral en la faja pirítica Ibérica
Melisa Isgró, M Dolores Basallote Sánchez, Raúl Moreno González, Luis Barbero

1027 Teledetección para la cartografía de cromo y níquel en Sierra de la Nieves: una aproximación desde el aprendizaje automático interpretable
Francisco M. Canero, Victor Rodriguez-Galiano, Maria Paula Mendes, Jose M. Ollega Caro

1033 Evaluación de la heterogeneidad composicional de una Piedra Natural ornamental mediante técnicas de teledetección óptica de proximidad.
Juncal A. Cruz Martínez, Eduardo García-Meléndez, Indira Rodríguez Álvarez, Ismael Coronado, Montserrat Ferrer-Julià, Winn H. Bakker, Pablo Valenzuela, Elena Colmenero Hidalgo, Inés Pereira, Antonio Espín de Gea

1039 Cartografía de la distribución espacial de minerales indicadores de drenaje ácido de mina mediante imágenes WorldView-3
Inés Pereira Rodríguez, Eduardo García-Meléndez, Montserrat Ferrer-Julià, Harald van der Werff

1045 USO DEL ALGORITMO RANDOM FOREST PARA EL MAPEO DEL USO Y OCUPACIÓN DEL SUELO RELACIONADOS CON BIENES MINERALES EN LA APA DAS CABECEIRAS DO RIO CUIABÁ, MATO GROSSO, BRASIL.
Segundo Durval, Gustavo Manzon

1051 Respuesta espectral de formas del relieve con imágenes AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) en el sector Sureste de la Comunidad de Madrid (España)
Eduardo García-Meléndez, Montserrat Ferrer-Julià, Juncal A. Cruz, Javier García-Rivas, Pablo Valenzuela, Indira Rodríguez, Elena Colmenero-Hidalgo, Inés Pereira

1057 Teledetección hiperespectral de proximidad aplicada al análisis composicional de rocas carbonatadas ornamentales
Indira Rodríguez, Montserrat Ferrer-Julià, Eduardo García-Meléndez, Juncal A. Cruz, Wim H. Bakker, Antonio Espín de Gea

PONENCIAS PLENARIAS

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección

Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus (CEMS) Componente On-Demand Mapping para respuesta inmediata (Rapid Mapping)



Oliva Martín Sánchez

Copernicus Emergency Management Service (CEMS), Joint Research Centre

Oliva Martín Sánchez es consultora en el Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus (CEMS), On-Demand Mapping, en el Centro Común de Investigación (JRC). Trabaja en Rapid Mapping, apoyando la fase de respuesta a emergencias y supervisando activaciones. Cuenta con una sólida trayectoria internacional en información geoespacial operativa, con experiencia en el sector privado, en el British Antarctic Survey, en las Naciones Unidas, y actualmente en el Centro Común de Investigación.

Oliva Martín Sánchez is a consultant for the Copernicus Emergency Management Service (CEMS), On-Demand Mapping, at the Joint Research Centre. She works in Rapid Mapping, supporting the emergency response phase and supervising activations. She has extensive international experience in operational geospatial information, having worked in the private sector, at the British Antarctic Survey, the United Nations, and currently at the Joint Research Centre

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección

La misión FLuorescence EXplorer (FLEX) de la Agencia Espacial Europea: cuantificación a escala global de la variabilidad en la actividad fotosintética de la vegetación



José Moreno

Laboratorio de Observación de la Tierra (LEO), Universidad de Valencia

José Moreno es catedrático de Física de la Tierra en la Facultad de Física de la Universidad de Valencia y director del Laboratorio de Observación de la Tierra (LEO) del Laboratorio de Procesamiento de Imágenes (IPL) del Parque Científico de la misma universidad. Ha participado activamente en actividades preparatorias y programas de explotación de varias misiones espaciales, desde ERS y ENVISAT, hasta Copernicus/Sentinels, y actualmente es Investigador Principal y presidente del Mission Advisory Group (MAG) de la misión Fluorescence Explorer (FLEX), Earth Explorer de la Agencia Espacial Europea (ESA). También fue presidente del MAG de SEOSAT/Ingenio y miembro del comité científico de EnMAP y Sentinel-2 Next Generation. Ha sido miembro del Comité Asesor de Ciencias de la Tierra de la ESA, del Panel de Usuarios de la Estación Espacial Internacional y de otros comités asesores internacionales de ESA, NASA, Comisión Europea, Fundación Europea de la Ciencia y Eumetsat, miembro del equipo de redacción de la estrategia científica de Observación de la Tierra de la ESA, y presidente de IGARSS-2018. Actualmente pertenece al Comité de Ciencia y Tecnología de la Agencia Espacial Española (AEE). Ha sido editor asociado de varias revistas científicas internacionales y es editor-jefe de la sección "Satellite Missions for Earth and Planetary Exploration" en Remote Sensing. En 2013 recibió la distinción de Investigación Científica de la Universidad de Valencia-Consejo Social por el impacto de su investigación. Ha impartido cursos para la formación de jóvenes científicos en técnicas de teledetección en varias universidades europeas.

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección

AET CÁCERES 2026
Teledetección Multidisciplinar:
Miradas Diversas, Soluciones Comunes

Challenges and Opportunities for Generating Global High-Resolution Land-Cover Maps in the Era of Foundation Models



Lorenzo Bruzzone

Remote Sensing Laboratory, University of Trento

Founder and Director of the Remote Sensing Laboratory (https://rslab.disi.unitn.it/) at the Department of Information Engineering and Computer Science, University of Trento. His research focuses on remote sensing, radar and synthetic aperture radar (SAR), signal processing, and machine learning. He promotes and supervises research in these areas within numerous national and international projects. He serves as Principal Investigator of several major research initiatives. Among others, he currently leads the High Resolution Land Cover project within the European Space Agency's (ESA) Climate Change Initiative, as well as the Radar for Icy Moon Exploration (RIME) instrument for the ESA JUICE mission and the Subsurface Radar Sounder (SRS) instrument for the ESA EnVision mission.
Professor Bruzzone is the author or co-author of more than 440 scientific publications in refereed international journals, over 430 conference papers, and 25 book chapters. He has received numerous national and international honors and awards.

Since 2003, he has served as Chair of the SPIE Conference on Artificial Intelligence and Image and Signal Processing for Remote Sensing. He founded the IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine and served as its Editor-in-Chief from 2013 to 2017. He is an IEEE Fellow.

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

SESIÓN 01

Riesgos Naturales

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.102

Análisis global de las zonas quemadas para la evaluación climática: experiencias del proyecto FireCCI

Chuvieco, Emilio[1] **Pettinari, M. Lucrecia** [1] **Torres-Vázquez, Miguel Ángel** [1] **Solano-Romero, Erika** [1] **Khairoun, Amin** [1,] **Storm, Thomas** [2] **Boettcher, Martin** [2]

[1] Universidad de Alcalá, España

[2] Brockmann Consult GmbH, Alemania

ORCID: Chuvieco 0000-0001-5618-4759 Pettinari 0000-0002-7472-4373 Torres 0000-0001-8897-9337 Solano 0009-0004-4605-1660

Correspondencia: emilio.chuvieco@uah.es

RESUMEN

Las quemas de biomasa (incluidos los incendios de bosques, pastizales, turberas y agrícolas) tienen importantes repercusiones en el sistema terrestre global, ya que afectan a la cobertura del suelo, la biomasa, el albedo de la superficie y la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero y aerosoles. Como parte del programa de cambio climático de la Agencia Espacial Europea, el proyecto FireCCI ha desarrollado en los últimos años varios productos globales y regionales sobre áreas quemadas para evaluar su extensión, así como sus características espaciales y temporales, pero siguen existiendo incertidumbres, especialmente las relacionadas con los incendios pequeños y de baja intensidad. El producto más reciente se ha desarrollado desde 2019 hasta la actualidad a partir de datos SYN del Sentinel-3 (S-3) y los incendios activos del VIIRS con una resolución de 300 m. El producto incluye una estrategia de validación formal, basada en una muestra derivada estadísticamente de imágenes Landsat de 30 m de resolución. El coeficiente Dice de este producto para el año 2024 fue de 58,51, con una media de 19,95 de error de comisión y 53,90 de error de omisión, superando en exactitud a otros productos globales de área quemada. Para obtener tendencias temporales coherentes a largo plazo, recientemente se ha lanzado un nuevo producto (denominado FireCCI60) cuyo objetivo es armonizar los productos de área quemada del proyecto FireCCI generados a partir del S-3 (2019-2025) y del MODIS (2003-2022). Finalmente, en el marco del mismo proyecto, hemos producido una primera versión de un producto global de área quemada a partir de datos MSI del Sentinel-2 a 20 m de resolución para el año 2023.

Palabras clave: *Área quemada, Sentinel, Quema de biomasa, Global, ESA*

Fecha de recepción: 17 enero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis global de las zonas quemadas para la evaluación climática: experiencias del proyecto FireCCI

Chuvieco, Emilio [(1)], Pettinari, M. Lucrecia [(1)], Torres-Vázquez, Miguel Ángel [(1)], Solano-Romero, Erika [(1)], Khairoun, Amin [(1)], Storm, Thomas [(2)], Boettcher, Martin [(2)]

[(1)] Universidad de Alcalá, España, [(2)] Brockmann Consult GmbH, Alemania

0000-0001-5618-4759, emilio.chuvieco@uah.es.

Pettinari 0000-0002-7472-4373; Torres 0000-0001-8897-9337; Solano 0009-0004-4605-1660

Resumen: Las quemas de biomasa (incluidos los incendios de bosques, pastizales, turberas y agrícolas) tienen importantes repercusiones en el sistema terrestre global, ya que afectan a la cobertura del suelo, la biomasa, el albedo de la superficie y la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero y aerosoles. Como parte del programa de cambio climático de la Agencia Espacial Europea, el proyecto FireCCI ha desarrollado en los últimos años varios productos globales y regionales sobre áreas quemadas para evaluar su extensión, así como sus características espaciales y temporales, pero siguen existiendo incertidumbres, especialmente las relacionadas con los incendios pequeños y de baja intensidad. El producto más reciente se ha desarrollado desde 2019 hasta la actualidad a partir de datos SYN del Sentinel-3 (S-3) y los incendios activos del VIIRS con una resolución de 300 m. El producto incluye una estrategia de validación formal, basada en una muestra derivada estadísticamente de imágenes Landsat de 30 m de resolución. El coeficiente Dice de este producto para el año 2024 fue de 58,51, con una media de 19,95 de error de comisión y 53,90 de error de omisión, superando en exactitud a otros productos globales de área quemada. Para obtener tendencias temporales coherentes a largo plazo, recientemente se ha lanzado un nuevo producto (denominado FireCCI60) cuyo objetivo es armonizar los productos de área quemada del proyecto FireCCI generados a partir del S-3 (2019-2025) y del MODIS (2003-2022). Finalmente, en el marco del mismo proyecto, hemos producido una primera versión de un producto global de área quemada a partir de datos MSI del Sentinel-2 a 20 m de resolución para el año 2023.

Palabras clave: Área quemada, Sentinel, Quema de biomasa, Global, ESA

Global Analysis of Burned Areas for Climate Assessment: Experiences from the FireCCI project

***Abstract**:Biomass burning (including forest, grassland, peatland and agricultural fires) has significant impacts on the global Earth system, as it affects land cover, biomass, surface albedo and atmospheric concentrations of greenhouse gases and aerosols. As part of the European Space Agency's climate change programme, the FireCCI project has developed several global and regional products on burned areas in recent years to assess their extent, as well as their spatial and temporal characteristics; however, uncertainties remain, particularly those related to small and low-intensity fires. The most recent product has been developed from 2019 to the present using Sentinel-3 (S-3) SYN data and VIIRS active fires at a resolution of 300 m. The product includes a formal validation strategy, based on a statistically derived sample from 30 m resolution Landsat images. The Dice coefficient for this product for the year 2024 was 58.51, with an average of 19.95 for false positives and 53.90 for false negatives, surpassing other global burned area products in terms of accuracy. To obtain consistent long-term temporal trends, a new product (named FireCCI60) has recently been launched, aimed at harmonising the FireCCI project's burned area products generated from S-3 (2019–2025) and MODIS (2003–2022). Finally, as part of the same project, we have produced a first version of a global burned area product based on Sentinel-2 MSI data at 20 m resolution for the year 2023.*

***Keywords**: Burned Area, Sentinel, Biomass burning, Global, ESA*

1. INTRODUCCIÓN

El seguimiento de las áreas quemadas (BA) es crucial para comprender el impacto del fuego en el sistema terrestre. Los incendios alteran la distribución y la estructura de la vegetación, afectan el ciclo global del carbono y modifican los equilibrios climáticos a diferentes escalas (Jones *et al*., 2022; Kelley *et al*., 2025). Aunque históricamente el fuego ha sido un agente de renovación ecológica (Pausas & Keeley, 2021), sus implicaciones negativas (por ejemplo, la duración de la temporada de incendios, los daños a la biodiversidad, las infraestructuras y la salud humana) han aumentado en los últimos años, como consecuencia de los cambios climáticos y sociales (Abatzoglou *et al*., 2025; Cunningham *et al*., 2024; Zheng *et al*., 2023). Además de contribuir a la comprensión de los efectos de los incendios, la cartografía del áreas quemada es clave para mejorar la modelización del fuego a diferentes escalas temporales (Torres-Vázquez *et al*., 2025), prever medidas de adaptación futura (Seitzinger *et al*., 2026) e identificar los principales factores (climáticos, ecológicos o antropogénicos) que explican la variabilidad y la evolución de los regímenes de incendios (García *et al*., 2022).

Esta comunicación presenta los productos que se han desarrollado en el marco de la Iniciativa de Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea, en la que se están generando series de datos correspondientes a distintas variables climáticas esenciales (Roebeling *et al*., 2025) a partir de datos de satélites.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La actual gama de productos obtenidos a partir de los algoritmos del proyecto FireCCI abarca desde 1982 hasta 2024, y está previsto que la última versión generada (FireCCIS311) se utilice operativamente en el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S). Las características de los productos más recientes se detallan en la Tabla 1, en la que se muestra la cobertura espacio-temporal, los datos de entrada (SR es la reflectividad de superficie y AF los incendios activos) y la resolución espacial de los productos de píxeles y celdas. Además, cada producto se presentó en una publicación científica en la que se puede obtener información completa del mismo.

Los productos globales más recientes son el FireCCIS311 y FireCCI60. El primero se basa en datos de reflectividad de Sentinel-3 SYN (300 m) y VIIRS de incendios activos (375 m), y cubre adquisiciones diarias desde 2019 hasta la actualidad. El producto se genera utilizando un algoritmo híbrido de dos pasos que tiene en cuenta las estadísticas locales de incendios activos para guiar el proceso de detección de cambios en la reflectividad. El segundo paso mejora la definición de las zonas quemadas mediante un análisis contextual. Este producto se valida anualmente utilizando una muestra diseñada estadísticamente que comprende 106 escenas Landsat, basada en un muestreo aleatorio estratificado y unidades que comprenden varios meses de adquisiciones (para reducir el efecto de los errores de fechado en la estimación de la precisión espacial). Los resultados para el período 2020-2024 mostraron un coeficiente Dice (Franquesa *et al*., 2022) medio de 58,99 (±3,77), con estimaciones anuales que oscilan entre 56 y 62,06. Los errores de comisión oscilan entre 19,95 y 17,47, mientras que los errores de omisión oscilan entre 50,27 y 57,2.

El FireCCI60 es una combinación del FireCCIS311 y el FireCCI51, con el objetivo de armonizar estos dos productos para obtener una serie de datos más larga. La serie temporal incluye la estimación de cómo detectaría área quemada el producto FireCCIS311 a partir de ls detecciones del FireCCI51 para el periodo previo de 2003 a 2018. A partir de 2019 se emplean los datos detectados directamente por el FireCCIS311. El método para armonizar ambos productos se basó en un conjunto de modelos Random Forest (RF) durante el período común de observaciones (2019-2022), teniendo en cuenta la variabilidad estacional y espacial de los regímenes de incendio. Además, se introdujo un proceso de corrección del sesgo mediante la técnica *Quantum mapping* para ajustar las distribuciones de área quemada. Las entradas para los modelos de estimación fueron el FireCCI51, los incendios activos de MODIS y variables auxiliares de clima y vegetación. El R^2 para el período común entre el FireCCI51 armonizado y el FireCCIS311 fue de 0,97. Dado que el modelo RF tendía a suavizar las series temporales, se mantuvieron los valores originales del FireCCI51 cuando se observaron incendios extremos. El conjunto de datos FireCCI60 BA resultante se produjo con una resolución de 0,25 grados.

Tabla 1: Principales características de los productos de área quemada generados por el proyecto FireCCI

Producto	Cobertura	Sensor	Serie temporal	Resolución espacial	Publicación relacionada (DOI)
FireCCI51	Global	SR: MODIS AF: MODIS	2001-2022	Píxel: 250 m Cuadrícula: 0,25º	10.1016/j.rse.2019.111493
FireCCIS311	Global	SR: SYN (OLCI+SLSTR) AF: VIIRS	2019-2024	Píxel: 300 m Cuadrícula: 0,25º	10.1016/j.rse.2022.113298
FireCCILT11	Global	SR: AVHRR LTDR	1982-2018	Píxel: 0,05º Cuadrícula: 0,25º	10.1016/j.jag.2021.102473
FireCCI60	Global	Armonización FireCCI51 FireCCIS311	2003-2024	Cuadrícula: 0,25º	(en revisión)
FireCCIS2	Global	MSI Sentinel-2	2023	Pixel 20m Cuadrícula: 0,25º	(en revisión)

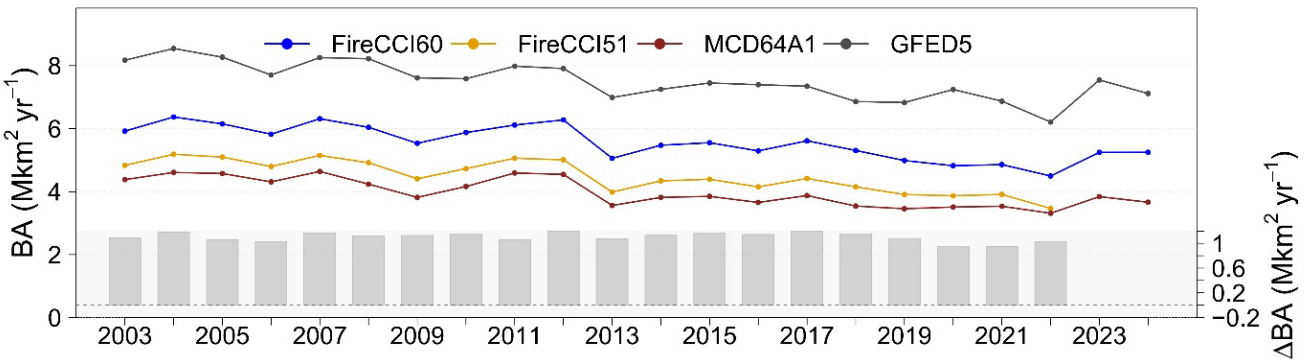


Figura 1. Evolución temporal de la superficie quemada global (BA). Se muestran FireCCI60 y, a modo de comparación, FireCCI51, MCD64A1 y GFED51. Las barras grises de la parte inferior muestran la diferencia acumulada (FireCCI60 − FireCCI51) durante su periodo común (2003-2022).

Además de estos productos globales, se ha generado recientemente una primera versión de un producto global de área quemada a partir de datos MSI del Sentinel-2 a 20m para el año 2023. Este producto se basa en la variación temporal de reflectividades de este sensor y en los puntos de calor detectados por el sensor VIIRS (Suomi-NPP). El algoritmo se ensayó inicialmente sobre el continente africano para los años 2016 y 2019 (Chuvieco *et al*., 2022; Roteta *et al*., 2019) y utiliza los dos satélites Sentinel-2 que trabajan simultáneamente.

3. RESULTADOS

Aunque la resolución espacial de FireCCIS311 es un poco más baja que la de FireCCI51 (300 m frente a 250 m), el algoritmo mejorado que incluye la información SWIR de las bandas SYN de Sentinel-3 y el uso de incendios activos VIIRS explica los mejores resultados para este último producto. Las estadísticas de validación generadas comparando los datos de media y alta resolución (Landsat) proporcionaron un valor DC para el FireCCI51 de 47,9 y 50,40 para los años 2020 y 2021, frente a los 56 y 58,9 de FireCCIS311 para los mismos años, con menores errores de omisión y comisión en ambos años, especialmente de omisión.

La Figura 1 incluye las tendencias anuales de los productos BA globales existentes, incluyendo el de NASA (MCD54A1) y el derivado del Global Fire Emission Database (GFED). Los generados a partir del proyecto FireCCI de la ESA estiman un área quemada media para el periodo común (2019-2022) de 3,79 Mkm² (FireCCI51) y 4,79 Mkm² (FireCCIS311), lo que implica que este último detecta un 26,6 % más área quemada que el primero. Por lo tanto, era razonable obtener estimaciones más altas para todo el período armonizado (2003-2018), añadiendo alrededor de 1,1 Mkm² de superficie quemada anual para el nuevo producto FireCCI60. Las barras grises de la Figura 1 muestran la diferencia entre el FireCCI60 y FireCCI51 durante su período común (2003-2022), que suma un total de ~22,1 Mkm² para ese período, aunque FireCCI60 solo incluye datos armonizados hasta 2018, ya que a partir de 2019 las estimaciones se toman directamente del producto FireCCIS311. Para la serie temporal completa (2003-2024), FireCCI60 detecta una media de 5,6 Mkm² al año.

En relación con el producto BA estándar de la NASA (MCD64A1), generado a partir de imágenes MODIS, y la última versión del GFED (v5.1), las estimaciones de FireCCI60 se sitúan entre ambos productos, con un 40 % más de BA media anual que MCD64A1 y un 26 % menos que GFED v5. Es conocido el alto error de omisión del producto NASA, por lo que es previsible la menor estimación, mientras el producto GFED v5 está generado a partir de comparar con perímetros quemados generados de imágenes de alta resolución, luego incluye una estimación sustancialmente mayor que los generados a partir de sensores de resolución media.

Finalmente, el producto basado en imágenes Sentinel-2 se denomina FireCCIS2.v1. Al tener mayor resolución espacial (20 m) detecta incendios más pequeños que los productos globales, estimando un área quemada superior a los 8 Mkm² para el año 2023, lo que supone un 50 % más de superficie quemada que la detectada por FireCCIS311 y más del 100 % de superficie quemada que las estimaciones del MCD64A1 para el mismo año. Este producto está en la línea de lo que ahora estima el GFED, lo que supone una modificación sustancial de las estimaciones previas generadas a partir de datos MODIS, en torno a los 4 Mkm² anuales. El producto basado en S-2 también es capaz de detectar quemas agrícolas, que normalmente no se detectan con sensores de resolución media. Además, delimita mejor los perímetros de los incendios, gracias a su mayor precisión espacial. No obstante, puesto que los umbrales de detección se calculan para ventanas de 100x100 km, en algunos casos, especialmente en los bosques tropicales, pueden producirse algunos errores de comisión debido a la confusión con las sombras de las nubes o las nubes oscuras. Se está llevando a cabo una validación independiente global de fase dos utilizando imágenes de Planet con una resolución espacial de 3 m para evaluar la precisión de FireCCIS2.v1.

Todos los datos del proyecto FireCCI están a disposición pública y gratuita, así como los algoritmos y guías de uso, en el portal de datos del programa ESA CCI (https://climate.esa.int/es/data/). Además de los productos se, incluye información sobre incertidumbre

de la detección y cobertura del suelo quemada, así como documentación técnica sobre los algoritmos empleados.

4. CONCLUSIONES

Esta comunicación informa sobre los productos de área quemada generados en el marco del proyecto FireCCI de la ESA. Se presentan los primeros resultados de dos nuevos productos, basados en la armonización entre datos MODIS y datos Sentinel-3, que ofrece una secuencia histórica más larga de productos de área quemada, junto al nuevo producto basado en datos Sentinel-2 con una sustancial mejora en la detección de incendios, lo que eleva sustancialmente las estimaciones previamente disponibles de área quemada global.

5. AGRADECIMIENTOS

Los productos a los que hace referencia esta comunicación se han generado en el marco del European Space Agency (ESA) project FireCCI, contract number 4000126706/19/I-NB.

6. REFERENCIAS

Abatzoglou, J. T., Kolden, C. A., Cullen, A. C., Sadegh, M., Williams, E. L., Turco, M., & Jones, M. W. (2025). Climate change has increased the odds of extreme regional forest fire years globally. *Nature Communications*, *16*(1), 6390. https://doi.org/10.1038/s41467-025-61608-1

Chuvieco, E., Roteta, E., Sali, M., Stroppiana, D., Boettcher, M., Kirches, G., Khairoun, A., Pettinari, L., Franquesa, M., & Albergel, C. (2022). Building a small fire database for Sub-Saharan Africa from Sentinel-2 high-resolution images. *Science of the Total Environment*, *Volume 845, 157139*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157139

Cunningham, C. X., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. J. S. (2024). Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature Ecology & Evolution*, *8*, 1420–1425. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2

Franquesa, M., Lizundia-Loiola, J., Stehman, S. V., & Chuvieco, E. (2022). Using long temporal reference units to assess the spatial accuracy of global satellite-derived burned area products. *Remote Sensing of Environment*, *269*, 112823. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112823

García, M., Pettinari, M. L., Chuvieco, E., Salas, J., Mouillot, F., Chen, W., & Aguado, I. (2022). Characterizing Global Fire Regimes from Satellite-Derived Products. *Forests*, *13*(5), 699. https://www.mdpi.com/1999-4907/13/5/699

Jones, M. W., Abatzoglou, J. T., Veraverbeke, S., Andela, N., Lasslop, G., Forkel, M., Smith, A. J. P., Burton, C., Betts, R. A., van der Werf, G. R., Sitch, S., Canadell, J. G., Santín, C., Kolden, C., Doerr, S. H., & Le Quéré, C. (2022). Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change. *Reviews of Geophysics*, *60*(3), e2020RG000726. https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020RG000726

Kelley, D. I., Burton, C., Di Giuseppe, F., Jones, M. W., Barbosa, M. L. F., Brambleby, E., McNorton, J. R., Liu, Z., Bradley, A. S. I., Blackford, K., Burke, E., Ciavarella, A., Di Tomaso, E., Eden, J., Ferreira, I. J. M., Fiedler, L., Hartley, A. J., Keeping, T. R., Lampe, S., . . . Kolden, C. A. (2025). State of Wildfires 2024–2025. *Earth Syst. Sci. Data*, *17*(10), 5377-5488. https://doi.org/10.5194/essd-17-5377-2025

Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2021). Wildfires and global change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *19*(7), 387-395.

Roebeling, R., Bojinski, S., Poli, P., John, V., & Schulz, J. (2025). On the determination of GCOS ECV product requirements for climate applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *106*(5), E868-E893.

Roteta, E., Bastarrika, A., Storm, T., & Chuvieco, E. (2019). Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: Generation of a small fire database for sub-Saharan Africa. *Remote Sensing of Environment*, *222*(1), 1-17. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.011

Seitzinger, S. P., Chuvieco, E., Di Giuseppe, F., Bombelli, A., Cagnazzo, C., Harris, S., & Tapper, N. (2026). Relevance of earth observations of essential climate variables in wildfire adaptation. *Remote Sensing of Environment*, *332*, 115082. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115082

Torres-Vázquez, M. Á., Di Giuseppe, F., Moreno-Torreira, A., Gincheva, A., Jerez, S., & Turco, M. (2025). Large increase in extreme fire weather synchronicity over Europe. *Environmental Research Letters*, *20*(2), 024045.

Zheng, B., Ciais, P., Chevallier, F., Yang, H., Canadell, J. G., Chen, Y., van der Velde, I. R., Aben, I., Chuvieco, E., Davis, S. J., Deeter, M., Hong, C., Kong, Y., Li, H., Li, H., Lin, X., He, K., & Zhang, Q. (2023). Record-high CO2 emissions from boreal fires in 2021. *Science*, *379*(6635), 912-917. https://doi.org/doi:10.1126/science.ade0805

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.108

Detección automática de cambios en la superficie de la Comunidad Valenciana con datos de Sentinel 2

Julien, Yves [1] **Sobrino, José A.** [1] **Llorens, Rafael** [1] **Gimeno Crespo, Sergio** [1]

[1] Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia, España

ORCID: Julien 0000-0001-5334-7137 Sobrino 0000-0003-3787-9373 Llorens 0000-0002-1973-3437 Gimeno Crespo 0009-0005-6534-3850

Correspondencia: yves.julien@uv.es sobrino@uv.es Rafael.llorens@uv.es sergio.gimeno-crespo@uv.es

RESUMEN

La actualidad climática reciente ha mostrado la necesidad de tener sistemas de monitoreo rápido de cambios en la superficie en la Comunidad Valenciana. Este trabajo aprovecha la disponibilidad gratuita y rápida de los datos del sensor MSI (Multispectral Imager) a bordo de los satélites Sentinel 2, para nutrir un sistema automático de detección de cambios. Para ello se descargan rutinariamente 10 tiles, en las cuales se detectan inundaciones, áreas quemadas, así como cambios en índice de vegetación o bandas de la imagen. Estas detecciones se mapean en un mosaico cubriendo la totalidad de la Comunidad Valenciana, y se suben inmediatamente a una página web dedicada. Los cambios también se envían a un operador, el cual valora la necesidad de estudio complementario. En este trabajo, presentamos dos estudios complementarios, correspondiendo al incendio de Teresa de Cofrentes de 13 de agosto de 2025, y a la DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) del 29 de octubre de 2024 en Valencia.

Palabras clave: *NDVI, NDWI, Inundaciones, Área quemada, Severidad*

Fecha de recepción: 2 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 2 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Detección automática de cambios en la superficie de la Comunidad Valenciana con datos de Sentinel 2

Julien, Yves [(1)], Sobrino, José A. [(1)], Llorens, Rafael [(1)], Gimeno Crespo, Sergio [(1)]

[(1)] Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia, España.

0000-0001-5334-7137, yves.julien@uv.es ; 0000-0003-3787-9373, sobrino@uv.es.

0000-0002-1973-3437, Rafael.llorens@uv.es ; 0009-0005-6534-3850, sergio.gimeno-crespo@uv.es.

Resumen: La actualidad climática reciente ha mostrado la necesidad de tener sistemas de monitoreo rápido de cambios en la superficie de la Comunidad Valenciana. Este trabajo aprovecha la disponibilidad gratuita y rápida de los datos del sensor MSI (Multispectral Imager) a bordo de los satélites Sentinel 2, para nutrir un sistema automático de detección de cambios. Para ello, se descargan rutinariamente 10 tiles, en las cuales se detectan inundaciones, áreas quemadas, así como cambios en índices de vegetación o bandas de la imagen. Estas detecciones se mapean en un mosaico cubriendo la totalidad de la Comunidad Valenciana, y se suben inmediatamente a una página web dedicada. Los cambios también se envían a un operador, el cual valora la necesidad de estudio complementario. En este trabajo, presentamos dos estudios complementarios, correspondiendo al incendio de Teresa de Cofrentes del 13 de agosto de 2025, y a la DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) del 29 de octubre de 2024 en Valencia.

Palabras clave: NDVI, NDWI, Inundaciones, Área quemada, Severidad

Automatic surface change detection in the Valencian Community with Sentinel 2 data

***Abstract**: Recent climatic conditions have highlighted the need for rapid surface change monitoring systems in the Valencian Community. This work takes advantage of the free and timely availability of data from the MSI (Multispectral Imager) sensor aboard the Sentinel-2 satellites to feed an automatic change detection system. To this end, 10 tiles are routinely downloaded, in which floods, burned areas, as well as changes in vegetation indices or image bands are identified. These detections are mapped into a mosaic covering the entire Valencian Community and are immediately uploaded to a dedicated website. The detected changes are also sent to an operator, who assesses the need for further complementary analysis. In this work, we present two complementary case studies corresponding to the Teresa de Cofrentes wildfire of August 13, 2025, and the DANA (Isolated Depression at High Levels, for its acronym in Spanish) event of October 29, 2024, in Valencia.*

***Keywords**: NDVI, NDWI, Flooding, Burnt area, Severity*

1. INTRODUCCIÓN

En los días posteriores a las inundaciones catastróficas ocurridas en Valencia del 29 de octubre de 2024, los esfuerzos para mapear las áreas afectadas por parte de varios grupos de investigación de la Universidad de Valencia consiguieron dar resultados preliminares en un plazo de una semana usando datos satelitales. Organismos especializados (como el programa Copernicus) necesitaron un tiempo similar para proporcionar una delimitación preliminar de la zona inundada (EFAS, 2025).

No obstante, tanto el libre acceso a numerosos datos de satélite como las capacidades de procesamiento actuales permitirían obtener semejantes resultados de manera casi inmediata, no solo para inundaciones sino para otro tipo de catástrofes. La serie de satélites Sentinel, operada por la Agencia Espacial Europea (ESA), así como la serie Landsat, operada por su equivalente estadounidense (NASA), son candidatos idóneos para este tipo de monitoreo debido a su resolución espacial (del orden de 10 metros para la serie Sentinel 2).

En este trabajo, presentamos una cadena de procesado automática para datos MSI (Multispectral Imager) de la serie de satélites Sentinel 2, orientada a la producción en tiempo casi real de mapas de cambios en la Comunidad Valenciana, complementada por un análisis profundizado de los eventuales cambios detectados.

2. DATOS

Los datos utilizados en este trabajo provienen del sensor MSI a bordo de las plataformas Sentinel 2A, 2B y 2C.

Este sensor observa la superficie de nuestro planeta en 13 bandas del espectro visible y el infrarrojo cercano, con una resolución espacial de 10, 20 y 60 metros según la banda considerada. En este trabajo, hemos utilizado los datos de las bandas 2 (azul), 3 (verde), 4 (rojo), 6 (centrada en 741 nm), 7 (783 nm), 8 (833 nm), y 12 (2,2 µm), con una resolución espacial de 10 m para las bandas 2, 3, 4, y8, y 20 m para las demás bandas. Los datos se presentan en teselas (tiles), de 10980 por 10980 píxeles a 10 metros de resolución. En nuestro caso, descargamos rutinariamente 10 tiles para cubrir la Comunidad Valenciana en su totalidad: 30SXG, 30SXH, 30SXJ, 30SYG, 30SYH, 30SYJ, 30TXK, 30TXL, 30TYK y 30TYL.

3. METODOLOGÍA

3.1. Primeros pasos

En una primera fase, los datos Sentinel 2 MSI se descargan de manera automática del sitio web Copernicus (Copernicus 2026), con una latencia máxima de 30 minutos después de su disponibilidad, gracias a un programa dedicado desarrollado en el lenguaje Python.

En una segunda fase, se detectan los cambios respecto a una adquisición anterior (con cobertura nubosa inferior a 2%) con otro programa dedicado, también escrito en Python. Los diferentes tipos de cambios detectados por nuestro procesado automático se clasifican en 4 tipos: inundaciones, incendios, cambios de vegetación y cambios de color, los cuales se describen a continuación. Por una cuestión de representatividad y de interpretación de los resultados, solo se mapean las detecciones con una extensión espacial mayor a 100 hectáreas. Este proceso se lleva a cabo en un tiempo inferior a 3 minutos.

3.2. Inundaciones

La identificación de inundaciones se hace usando el método de diferencia de NDWI (Índice De Agua De Diferencia Normalizada, por sus siglas en inglés; ver McFeeters, 1996) entre dos fechas (referencia anterior sin nubes y nueva adquisición). Se considera zona inundada el área con píxeles cuya diferencia de NDWI es superior a 0,5, según la metodología desarrollada en Tarpaneti *et al.* (2022).

3.3. Incendios

La identificación de zonas quemadas se hace usando el método de diferencia (dATBI) de ATBI (Índice De Áreas Quemadas Temporal automatizado, por sus siglas en inglés; ver Bilal, 2025) entre dos fechas (referencia anterior sin nubes y nueva adquisición). Se considera zona quemada el área con píxeles cuya diferencia de dATBI es superior a 0,2.

3.4. Cambios de vegetación

Cambios en vegetación se detectan basándose en cambios en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, ver Tucker, 1979). Como anteriormente, se estima la diferencia de NDVI entre la fecha actual y la anterior, aunque se identifican los píxeles de cambio usando la metodología Z-score. Para ello, se etiquetan como cambio los píxeles con una diferencia de NDVI distando más de 5 veces su desviación estándar para la imagen entera de su valor promedio (Pearson, 1901).

3.5. Cambios de color

Como hicimos con el NDVI, estimamos, para cada banda, el Z-score (Pearson, 1901) de la diferencia entre la imagen actual y la de referencia. Sumamos los valores de Z-score para todas las bandas, e identificamos como cambiados los píxeles para los cuales esta suma de Z-score se distancia en más de 5 veces la desviación estándar de su valor promedio.

3.6. Post-procesado

Cada grupo de píxeles de cada tipo de cambio es detectado y su contorno identificado, y ploteado sobre una imagen RGB de la adquisición actual, con colores específicos para cada cambio (azul: inundaciones, amarillo: área quemada, verde: cambios de vegetación, rojo: cambios en el color). Finalmente, las imágenes RGB con el contorno de los cambios detectados se georeferencian en un mosaico de la Comunidad Valenciana, con las zonas exteriores a esta comunidad oscurecidas. Un ejemplo de tal mosaico se presenta en la figura 1.

Las imágenes de cada tile con un resumen de los cambios detectados se envían a través de un bot Telegram a operadores, quienes valoran la necesidad de estudio adicional sobre los cambios detectados. También se sube el mosaico de las detecciones a una página web dedicada (https://www.uv.es/ucgprise/monitoreo.html), así como los estudios adicionales llevados a cabo (https://www.uv.es/ucgprise).

4. CASOS PRÁCTICOS

4.1. Incendio de Teresa de Cofrentes

El 13 de agosto del 2025, se declaró en Teresa de Cofrentes un incendio, provocado por un rayo, y afectó unas 504 hectáreas. Este evento se detectó por nuestro sistema en la imagen Sentinel 2B del 16 de agosto de 2025, con una extensión aproximada de 394 ha, a las 17:59. Aplicando la metodología descrita en Llorens *et al.* (2021), hemos calculado la severidad del incendio para un área quemada con una extensión estimada de 416 hectáreas (figura 2). Esta extensión inferior a las cifras oficiales se debe a la presencia de zonas no quemadas dentro del perímetro del incendio, como se puede apreciar en la figura 2. En este caso, hemos identificado 21 ha de baja severidad, 270 ha de severidad mediana, y 124 ha de severidad alta.



Figura 1. Mosaico RGB de los datos Sentinel 2 - MSI correspondiendo a las imágenes adquiridas el 14 de enero de 2026.

4.2. Inundaciones de Valencia

El sistema de procesado automático descrito en este trabajo no estaba implementado cuando la DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) del 29 de octubre de 2024 descargó trombas de agua en la provincia de Valencia, provocando unas inundaciones catastróficas. No obstante, usando los datos disponibles en esa la fecha, se puede simular los resultados que se hubiesen obtenido de estar funcional. Estos resultados se presentan en la figura 3, donde se aprecian las detecciones para las imágenes Sentinel2 – MSI de los días posteriores. A pesar de la fuerte presencia de nubes en las imágenes de los días 31 de octubre y del 5 de noviembre de 2024, se puede observar claramente las consecuencias de la DANA como inundaciones (azul) y cambios en la vegetación (verde), habiendo sido esta última arrasada en los cauces de los ríos y de la zona inundada. También se puede observar que los cambios de color se concentran alrededor de nubes y corresponden a falsas detecciones para las dos primeras fechas, mientras completan las otras detecciones en cauces de ríos para la última fecha analizada. Para ese evento, también hemos realizado un mapeo del fango resultante de las inundaciones, analizando la firma espectral de este fango en las bandas rojo, verde y azul de las imágenes Sentinel 2 – MSI. Más detalles sobre este mapeo y el evento meteorológico se pueden encontrar en Julien *et al.* (2025).

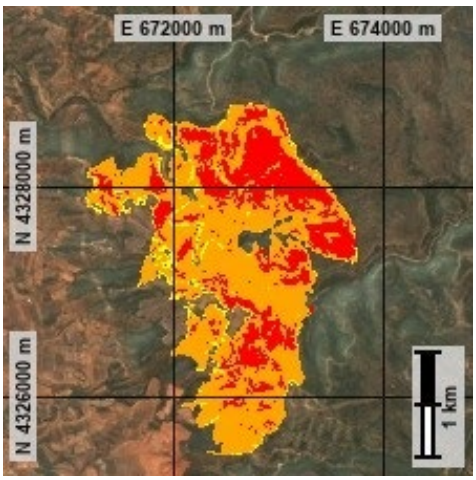


Figura 2. Severidad del incendio declarado en Teresa de Cofrentes el 13 de agosto de 2025: baja (amarillo), mediana (naranja) y alta (rojo).

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En este trabajo se ha presentado un sistema de procesado de datos Sentinel 2 – MSI para la detección automática de cambios en la Comunidad Valenciana, incluyendo inundaciones, áreas quemadas, cambios en el índice de vegetación y de color. Los casos prácticos expuestos muestran la validez de los cambios detectados. La detección de cambios en NDVI y color de la imagen sirven para detectar cambios que no fuesen detectados como inundaciones o incendios, para su posterior estudio manual por un operador especializado. La validación de las detecciones obtenidas por nuestro sistema está prevista para un futuro cercano, en cuanto el número de detecciones sea suficiente. El sistema diseñado sería fácilmente escalable a la Península Ibérica entera, aunque los medios de cálculo tendrían que ser dimensionados en consecuencia. También se puede añadir sensores a estas detecciones, en el espectro óptico como los de la serie Landsat, o en el radar con los satélites Sentinel 1. La implementación de estas optimizaciones se encuentra supeditada a la obtención de financiación adicional.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la financiación recibida de la Conselleria de Educación, Cultura y Universidades de la Generalitat Valenciana, dentro del marco PROMETEO 2024 (Subvenciones para la realización de proyectos de I+D+I para grupos de investigación de excelencia), para el proyecto “Indicadores Medioambientales y Fenómenos Adversos en la Comunidad Valenciana usando datos de satélite” (INMESAT, referencia CIPROM2023-42).

Adicionalmente, este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, a través de la Agencia Española de Investigación (AEI/10.13039/501100011033, proyecto PID2023-150737OB-I00).

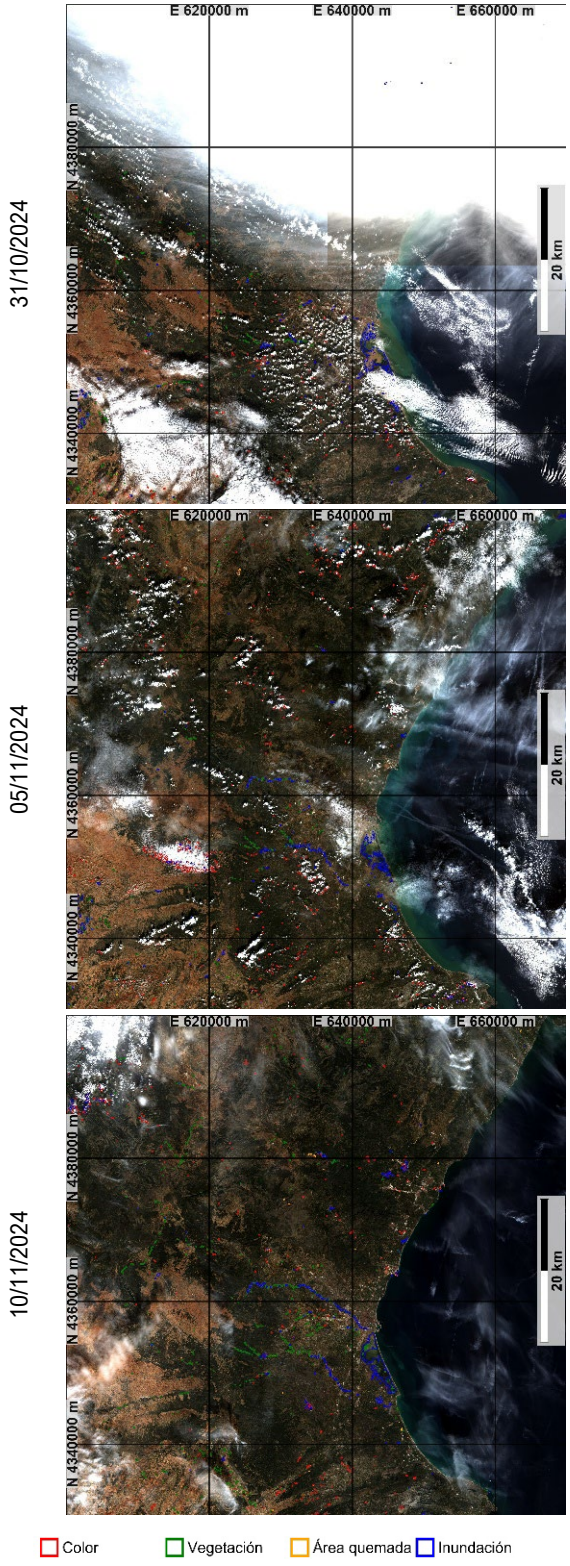


Figura 3. Detección de cambios en los días posteriores a las inundaciones del 29 de octubre de 2024 en la provincia de Valencia.

7. REFERENCIAS

Copernicus (2026). Copernicus Data Space Ecosystem, https://dataspace.copernicus.eu/, visitado por última vez el 19 de enero de 2026.

EFAS (2025). European Flood Awareness System, https://confluence.ecmwf.int/display/CEMS/European+Flood+Awareness+System, last accessed May 14, 2025

Julien, Y., Sobrino, J.A., Ruescas, A.B., Zornoza Gallego C. & Serrano-Lara, J. (2025). Emergency mapping of mud extent in the context of October 29th 2024 flash floods in Valencia, *Recent Advances in Remote Sensing, 5* (2025), https://doi.org/10.62880/rars25005.

Llorens et al. (2021). A methodology to estimate forest fires burned areas and burn severity degrees using Sentinel-2 data. Application to the October 2017 fires in the Iberian Peninsula, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 95*, March 2021, 102243.

McFeeters, S.K. (1996) The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing, 17*, 1425-1432. http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714.

Muhammad Bilal, M. (2025). The automated temporal burn index (ATBI) for accurate and scalable burned area mapping. International J*ournal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 144*, 2025, 104866, ISSN 1569-8432, https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104866.

Pearson, K. (1901). LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and *Journal of Science, 2*(11), 559–572. https://doi.org/10.1080/14786440109462720.

Tarpanelli, A., Mondini, A. C. & Camici, S. (2022). Effectiveness of Sentinel-1 and Sentinel-2 for flood detection assessment in Europe. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Vol. 22*, No. 8, pp. 2473-2489. https://doi.org/10.5194/nhess-22-2473-2022.

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment, Vol. 8*, No. 2, 1979, pp. 127-150, ISSN 0034-4257, https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.110

Cartografía de severidad posincendio mediante imágenes Sentinel-2 en los incendios de Cáceres y Ourense (2025)

Llorens, Rafael [1] **Sobrino, José Antonio** [1] **Franch, Belén** [1] **Fernández, Cristina** [2] **Novo, Ana** [2]

[1] Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI) de la Universidad de Valencia. Parque Científico - Campus de Paterna C/ Catedrático José Beltrán nº2, 46980 Paterna (Valencia)

[2] CSIC-Misión Biológica de Galicia (MBG). A Carballeira, 8, 36143 Salcedo, Pontevedra

ORCID: Llorens 0000-0002-1973-3437 Sobrino 0000-0003-3787-9373 Franch 0000-0003-0593-7874 Fernández 0000-0003-4134-8727 Novo 0000-0003-0443-9769

Correspondencia: rafael.llorens@uv.es jose.sobrino@uv.es belen.franch@uv.es cfernandez@mbg.csic.es anovo@mbg.csic.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta la aplicación de una metodología operativa para la cartografía de severidad posincendio a partir de imágenes Sentinel-2 en dos grandes eventos ocurridos en Cáceres y Ourense durante 2025. La metodología integra índices espectrales derivados del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), que permiten la clasificación en niveles de severidad (baja, moderada y alta). Se evaluó la distribución de la severidad en términos temporales y espaciales. La validación frente a datos de campo mostró valores estadísticamente robustos (Kappa=0.65; F1-weighted=0.79; precisión global=79.5%). Los resultados evidencian una predominancia de severidad alta en Ourense (>68%) y moderada-alta en Cáceres.

Palabras clave: *Incendios, severidad, Sentinel-2, Ourense, Cáceres*

Fecha de recepción: 2 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 2 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Cartografía de severidad del fuego mediante imágenes Sentinel-2 en los incendios de Cáceres y Ourense (2025)

Llorens, Rafael [(1)], Sobrino, José A. [(1)], Franch, Belén [(1)], Fernández, Cristina [(2)], Novo, Ana [(2)]

[(1)] Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI) de la Universidad de Valencia. Parque Científico - Paterna (Valencia).

0000-0002-1973-3437, rafael.llorens@uv.es ; 0000-0003-3787-9373, sobrino@uv.es.

0000-0003-0593-7874, belen.franch@uv.es ;

[(2)] CSIC-Misión Biológica de Galicia (MBG). A Carballeira, 8 Salcedo.

0000-0003-4134-8727, cfernandez@mbg.csic.es ; 0000-0003-0443-9769, anovo@mbg.csic.es.

Resumen: En este trabajo se presenta la aplicación de una metodología operativa para la cartografía de severidad posincendio a partir de imágenes Sentinel-2 en dos grandes eventos ocurridos en Cáceres y Ourense durante 2025. La metodología integra índices espectrales derivados del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), que permiten la clasificación en niveles de severidad (baja, moderada y alta). Se evaluó la distribución de la severidad en términos temporales y espaciales. La validación frente a datos de campo mostró valores estadísticamente robustos (Kappa=0.65; F1-weighted=0.79; precisión global=79.5%). Los resultados evidencian una predominancia de severidad alta en Ourense (>68%) y moderada-alta en Cáceres.

Palabras clave: Incendios, severidad, Sentinel-2, Ourense, Cáceres

Fire severity mapping from Sentinel-2 imagery for the 2025 wildfires in Cáceres and Ourense

***Abstract**: In this work, we present the application of an operational methodology for post-fire severity mapping based on Sentinel-2 imagery for two large wildfire events in Cáceres and Ourense during 2025. The methodology integrates spectral indices derived from the near-infrared (NIR) and short-wave infrared (SWIR) regions, enabling the classification of severity into three levels (low, moderate, and high). The spatial and temporal distribution of severity was assessed for both events. Validation against field observations yielded statistically robust agreement (Kappa = 0.65; F1-weighted = 0.79; overall accuracy = 79.5%). Results indicate a predominance of high-severity burning in Ourense (>68%) and moderate-to-high severity in Cáceres.*

***Keywords**: Wildfires, severity, Sentinel-2, Ourense, Cáceres*

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales constituyen uno de los principales factores de perturbación ecológica en los ecosistemas mediterráneos y atlánticos de la península ibérica, donde la recurrencia y severidad de los eventos se han visto reforzadas por la combinación de regímenes climáticos más extremos, acumulación de combustibles y cambios en usos del suelo (Pausas, J. G. and Keeley, J. E., 2019). La severidad posincendio, entendida como la magnitud del impacto del fuego sobre la vegetación y el suelo, es un parámetro clave para evaluar la respuesta ecológica, el riesgo de erosión, y la evolución de la regeneración vegetal (Morgan *et al.*, 2014). Su cuantificación es esencial para la planificación de actuaciones posincendio, el diseño de medidas de restauración y la priorización territorial.

En este contexto, los satélites como Sentinel-2 han facilitado el desarrollo de metodologías para la estimación de severidad basadas en el contraste de bandas en el infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) y su evolución temporal. Índices espectrales, como el *Normalized Burn Ratio* (NBR), han sido ampliamente empleados en la literatura para cartografiar severidad, explorar sus relaciones con el combustible disponible y las condiciones de propagación del fuego (Escuin, Navarro y Fernández, 2008). En este trabajo, se aplica la metodología desarrollada por Sobrino *et al.*, 2024 para la estimación de severidad posincendio en Cáceres y Ourense durante 2025, con el objetivo de (i) generar cartografía de severidad a partir de índices espectrales derivados del NIR y SWIR, (ii) analizar las diferencias en la distribución espacial de severidad entre ambos eventos y (iii) validar los resultados mediante datos de campo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Los análisis se centraron en dos eventos de gran extensión registrados en la provincia de Cáceres y Ourense durante 2025. Ambos casos de estudio se enmarcan en regiones con elevada recurrencia de incendios forestales, si bien con contextos biofísicos contrastados (Castro, Martín-Vide y Alonso, 2005). En Cáceres domina un clima mediterráneo con marcada sequía estival, temperaturas máximas elevadas y una fuerte oscilación térmica, sobre un paisaje estructurado por formaciones de matorral mediterráneo, dehesas, repoblaciones y masas de frondosas y coníferas dispersas. En Ourense, el régimen climático se aproxima a condiciones atlántico-mediterráneas, con mayor influencia oceánica y un mosaico de masas arboladas, matorral denso y áreas agrícolas, donde la continuidad horizontal del combustible favorece la propagación rápida del fuego bajo condiciones de viento y baja humedad relativa.

La Figura 1 muestra un mapa de los incendios forestales analizados (Cáceres y Ourense) junto con el tipo de superficie correspondiente (Corine Land Cover 2018).

La Tabla 1 muestra información de interés para cada uno de los incendios estudiados obtenida a partir del servicio European Forest Fire Information System (EFFIS).

Tabla 1. Información de los incendios estudiados proporcionada por el servicio *European Forest Fire Information System* (EFFIS). En negrita, los incendios donde se validaron los resultados de severidad.

ID	Municipio	Fecha de ignición	Superficie quemada (ha)
1	Garrovillas de Alconétar	19/08/2025	359
2	Casar de Cáceres	15/08/2025	3614
3	Cáceres	15/08/2025	160
4	Cáceres	16/07/2025	138
5	Cáceres	15/08/2025	3739
6	Cáceres	08/08/2025	1214
7	Alcuéscar	24/07/2025	779
8	Cáceres	17/06/2025	1055
9	**Outomuro**	**12/08/2025**	**32**
10	**Oímbra**	**13/08/2025**	**24471**
11	Maceda, Manzaneda y Montederramo	08/08/2025	30754
12	Cualedro	23/07/2025	145
13	**Vilardevós**	**14/08/2025**	**1825**
14	A Mezquita	12/08/2025	12026
15	A Veiga	15/08/2025	25953

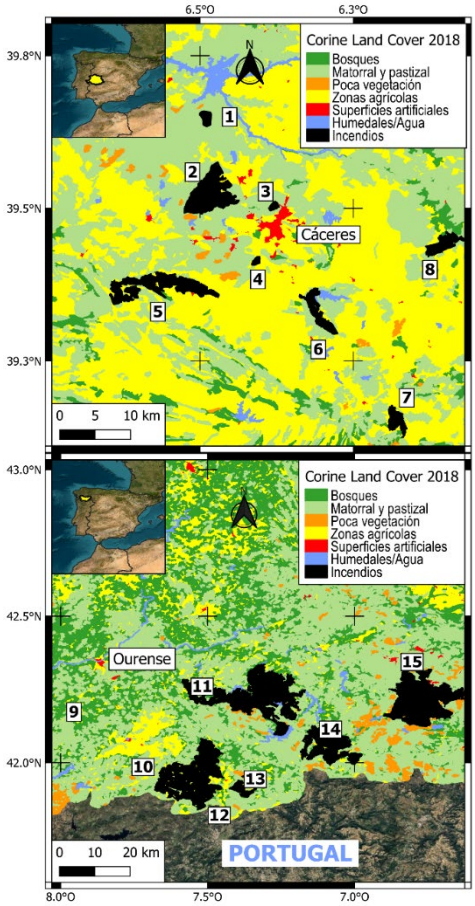


Figura 1. Distribución espacial de los incendios analizados en Cáceres (arriba) y Ourense (abajo), sobre el mapa *Corine Land Cover 2018* y el identificador (ID) de cada incendio descrito en la Tabla 1.

2.2. Imágenes Sentinel-2

El sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) a bordo de Sentinel-2 dispone de 13 bandas espectrales con resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m, lo que permite el análisis multiespectral de la superficie terrestre a distintas escalas espaciales. En este trabajo se emplearon imágenes Sentinel-2 Level-2A (reflectancia BOA), atmosféricamente corregidos a partir de los productos Level-1C y descargados a través del portal de la Agencia Espacial Europea (ESA). En todos los incendios se utilizaron dos fechas posteriores al incendio, con el fin de observar los cambios temporales producidos.

2.3. Datos de campo

La severidad del incendio se validó mediante parcelas de campo (20 × 20 m, equivalentes a la resolución espacial de Sentinel-2) clasificadas mediante análisis visual, tal y como se describe en el estudio de Ruiz-Gallardo *et al*., 2004, que evalúa la severidad del incendio en función de los porcentajes de vegetación quemada (Ryan y Noste, 1985). La clasificación se estructura en tres niveles: severidad baja (% de vegetación quemada entre 0 y 50), moderada (% de vegetación quemada entre 50 y 90) y alta (% de vegetación quemada superior a 90). De los 15 incendios forestales analizados (Tabla 1), se realizaron

parcelas de campo en tres de ellos (Outomuro, Oímbra y Vilardevós). La Tabla 3 muestra la clasificación de las parcelas de severidad realizadas.

Tabla 3. Parcelas de campo realizadas en Outomuro, Oímbra y Vilardevós. Entre paréntesis, la fecha del trabajo en campo.

Lugar	Baja	Moderada	Alta
Outomuro (20/08/2025)	4	1	3
Oímbra (21/08/2025)	-	7	16
Vilardevós (22/08/2025)	-	5	5
Total	**4**	**13**	**24**

2.4. Procesado de imágenes Sentinel-2 y análisis estadístico

Las tareas de preprocesado, tales como: recortes, remuestreos (convertir la resolución espacial a 20 m) o máscara de nubes, se aplicaron a todas las imágenes descargadas. A partir de las imágenes preprocesadas, se obtuvieron índices espectrales como combinación de bandas entre el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), donde la reflectividad en el NIR desciende debido a la consumición de la vegetación activa, mientras que el valor de reflectividad en el SWIR, aumenta por la pérdida de humedad del suelo (Escuin et al., 2008). Los índices calculados fueron los indicados para el cálculo de severidad del fuego por Sobrino et al., 2024, donde se divide la zona incendiada en función de la densidad de vegetación pre-incendio. Esta densidad de vegetación, se calcula previamente mediante el índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI; Petorelli et al., 2011), diviendo la zona de estudio en vegetación baja, mixta y completa (Ecuación 1). Las Ecuaciones 2, 3 y 4, muestran los algoritmos de los índices *Burned Area Index for Sentinel-2* (BAIS2; Filipponi, 2018*), Normalized Burn Ratio* (NBR; Key et al., 2006) y *Normalized Burn Ratio 3* (NBR3; Sobrino et al., 2024), aplicados a los valores de densidad de vegetación baja, mixta y completa, respectivamente. Todas las ecuaciones hacen referencia a la nomenclatura de bandas Sentinel-2.

$$NDVI = \frac{\mathrm{B8} - \mathrm{B4}}{\mathrm{B8} + \mathrm{B4}} \quad (1)$$

$$BAIS2 = \left(1 - \sqrt{\frac{B6 * B7 * B8A}{B4}}\right) * \left(\frac{B12 - B8A}{\sqrt{B12 + B8A}} + 1\right) \quad (2)$$

$$NBR = \frac{\mathrm{B8} - \mathrm{B12}}{\mathrm{B8} + \mathrm{B12}} \quad (3)$$

$$NBR3 = \frac{\mathrm{B7} - \mathrm{B12}}{\mathrm{B7} + \mathrm{B12}} \quad (4)$$

Para cada índice se calculó la severidad (utilizando 2 imágenes posincendio) y se clasificaron en tres niveles de severidad (baja, moderada y alta) mediante umbrales derivados de un histograma (Sobrino *et al.*, 2024). La superficie quemada y la distribución porcentual por clase se evaluaron por fecha y por zona. La validación de la clasificación se realizó frente a las parcelas de campo georreferenciadas, construyéndose una matriz de confusión a partir de la cual se obtuvieron métricas de precisión global, coeficiente Kappa, sensibilidad, especificidad y F1-weighted, así como la precisión balanceada por clase. Este conjunto de métricas permitió evaluar la robustez del método.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cartografía de severidad del fuego, presentada en este estudio, mostró patrones claramente diferenciados entre ambos incendios. En Cáceres predominó la severidad moderada-alta, mientras que en Ourense la severidad alta superó el 68% de la superficie quemada en ambas fechas analizadas (Figura 2). La Figura 3 muestra un ejemplo de la cartografía de severidad desarrollada para los incendios de Cáceres el día 27 de octubre de 2025.

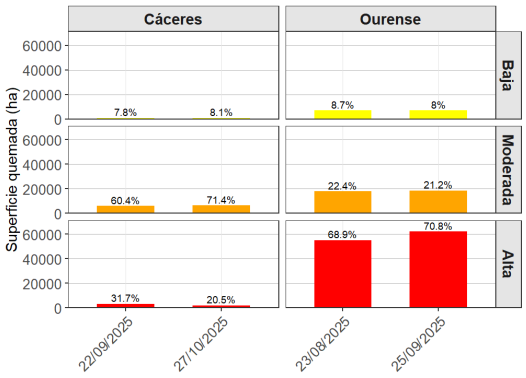


Figura 2. Superficie quemada (ha y %) para cada nivel de severidad en los incendios de Cáceres y Ourense (2025).

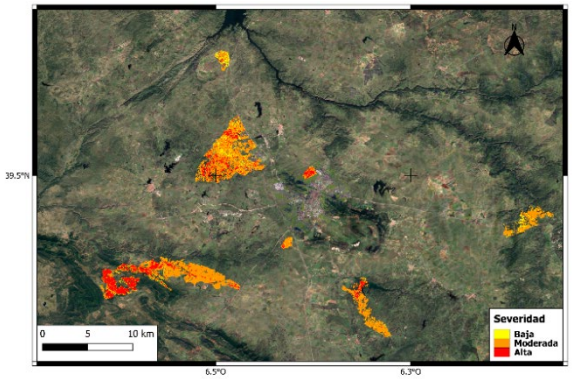


Figura 3. Mapa de severidad para los incendios de Cáceres a partir de una imagen Sentinel-2 (27/10/2025).

La validación con parcelas de campo en Ourense mostró una buena concordancia entre clasificación y observaciones in situ. La matriz de confusión proporcionó valores robustos (precisión global=80.5%; Kappa=0.66; F1-weighted=0.80), con sensibilidades superiores a 0.75 y precisiones balanceadas superiores a 0.79 para las tres clases (Figura 4), respaldando la utilidad operativa de la metodología. Estos resultados son coherentes con estudios previos que han demostrado la idoneidad de índices NIR-SWIR para la estimación de severidad posincendio (Pérez *et al*., 2017; Quintano, Fernández-Manso y Fernández-Manso, 2018).

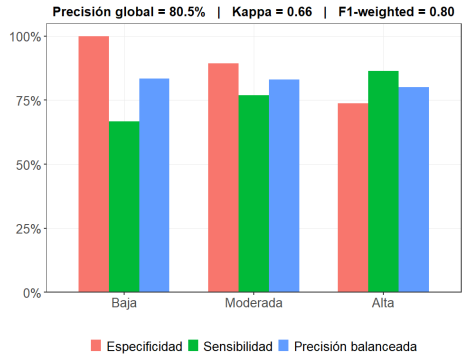


Figura 4. Resultados estadísticos obtenidos mediante las parcelas de campo en Ourense (Tabla 3).

4. CONCLUSIONES

La metodología aplicada permitió generar cartografía de severidad a partir de imágenes Sentinel-2, diferenciando de forma operativa entre severidad baja, moderada y alta. Los resultados evidenciaron diferencias consistentes entre los incendios analizados: en Ourense predominó la severidad alta, mientras que en Cáceres se observó un patrón moderado-alto. Dichas diferencias parecen estar asociadas tanto a la disponibilidad y continuidad de combustibles como a la variabilidad en las condiciones de propagación del fuego. Asimismo, la validación frente a datos de campo mostró la robustez del método, respaldando su utilidad para aplicaciones reales de evaluación y seguimiento posincendio. Esta metodología constituye una base relevante para el análisis ecosistémico y la planificación de actuaciones posincendio, facilitando la priorización territorial y la gestión adaptativa frente a regímenes de fuego potencialmente más intensos en el contexto actual.

5. AGRADECIMIENTOS

Proyecto realizado con la Beca Leonardo de Investigación Científica y Creación Cultural 2024 de la Fundación BBVA. La Fundación BBVA no se responsabiliza de las opiniones, comentarios y contenidos incluidos en el proyecto y/o los resultados obtenidos del mismo, los cuales son total y absoluta responsabilidad de sus autores. Agradecemos la financiación recibida por: 1) la Conselleria de Educación, Cultura y Universidades de la Generalitat Valenciana, dentro del marco PROMETEO 2024 (Subvenciones para la realización de proyectos de I+D+I para grupos de investigación de excelencia), para el proyecto "Indicadores Medioambientales y Fenómenos Adversos en la Comunidad Valenciana usando datos de satélite" (INMESAT, referencia CIPROM2023-42); 2) el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, la Agencia Estatal de Investigación (AEI/10.13039/501100011033), en el marco del proyecto PID2023-150737OB-I00.

6. REFERENCIAS

Castro, M. D., Martín-Vide, J., & Alonso Oroza, S. (2005). El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI.

Escuin, S., Navarro, R., & Fernández, P. (2008). Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. International *Journal of Remote Sensing, 29*(4), 1053-1073.

Filipponi, F. (2018, March). BAIS2: Burned area index for Sentinel-2. In *Proceedings* (Vol. 2, No. 7, p. 364). MDPI.

Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape assessment (LA). In: Lutes, Duncan C.; Keane, Robert E.; Caratti, John F.; Key, Carl H.; Benson, Nathan C.; Sutherland, Steve; Gangi, Larry J. 2006. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. LA-1-55, 164.

Morgan, P., Keane, R. E., Dillon, G. K., Jain, T. B., Hudak, A. T., Karau, E. C., ... & Strand, E. K. (2014). Challenges of assessing fire and burn severity using field measures, remote sensing and modelling. *International Journal of Wildland Fire, 2*3(8), 1045-1060.

Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2019). Wildfires as an ecosystem service. *Frontiers in Ecology and the Environment, 17*(5), 289-295.

Pérez, S. A., Vega, J. A., Rodríguez, F., Fernández, C., Vega-Nieva, D., Álvarez-González, J. G., & Ruiz-González, A. D. (2017). Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Revista de Teledetección, (49)*, 49-61.

Pettorelli, N., Ryan, S., Mueller, T., Bunnefeld, N., Jędrzejewska, B., Lima, M., & Kausrud, K. (2011). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. *Climate research, 46*(1), 15-27.

Quintano, C., Fernández-Manso, A., & Fernández-Manso, O. (2018). Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity. I*nternational journal of applied earth observation and geoinformation, 64*, 221-225.

Ruiz-Gallardo, J. R., Castaño, S., & Calera, A. (2004). Application of remote sensing and GIS to locate priority intervention areas after wildland fires in Mediterranean systems: a case study from south-eastern Spain. *International Journal of Wildland Fire, 13*(3), 241-252.

Ryan, K. C., & Noste, N. V. (1985). Evaluating prescribed fires. Lotan, James E.; Kilgore, Bruce M.; Fischer, William C, 15-18.

Sobrino, J. A., Llorens, R., Fernández, C., Fernández-Alonso, J. M., & Vega, J. A. (2024). Methodology for burned areas delimitation and fire severity assessment using Sentinel-2 data. A case study of forest fires occurred in Spain between 2018 and 2023. *Recent Advances in Remote Sensing, 2*, 1-13.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.117

Rendimiento del Normalized Radar Burn Ratio para la cartografía de áreas quemadas: más allá de índices ópticos

Tarazona Coronel, Yonatan [1] **Mantas, Vasco** [1]

[1] Department of Earth Sciences, Center for Earth and Space Research (CITEUC), University of Coimbra, Portugal

ORCID: Tarazona Coronel 0000-0002-5208-1004 Mantas 0000-0001-9602-7715

Correspondencia: geoyons@gmail.com vasco.mantas@dct.uc.pt

RESUMEN

El índice Normalized Radar Burn Ratio (NRBR), basado en Sentinel-1 y recientemente publicado, presenta una alternativa robusta con rendimientos comparables y superiores a datos ópticos para la cartografía de áreas quemadas. Evaluado mediante un modelo de Aprendizaje Profundo U-Net entrenado en California y probado en España, el NRBR mostró un desempeño competitivo frente a enfoques multiespectrales y al índice óptico dNBR (delta Normalized Burn Ratio), con un coeficiente Dice del 83.51%. Este índice monovariable, que supera limitaciones como la nubosidad y la iluminación solar, ofrece generalización espacial (bajo diferentes tipos de cobertura), menor costo computacional y operatividad bajo condiciones adversas, posicionándose como una herramienta eficaz para el monitoreo de incendios a nivel global.

Palabras clave: *mapeo de áreas quemadas, índice NRBR, sentinel-1, monitoreo de incendios*

Fecha de recepción: 4 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 4 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Rendimiento del Normalized Radar Burn Ratio para la cartografía de áreas quemadas: más allá de índices ópticos

Tarazona Coronel, Yonatan [1], Mantas, Vasco [1]

[1] Department of Earth Sciences, Center for Earth and Space Research (CITEUC), University of Coimbra, Portugal.

0000-0002-5208-1004, geoyons@gmail.com.

0000-0001-9602-7715, vasco.mantas@dct.uc.pt.

Resumen: El índice Normalized Radar Burn Ratio (NRBR), basado en Sentinel-1 y recientemente publicado, presenta una alternativa robusta con rendimientos comparables y superiores a datos ópticos para la cartografía de áreas quemadas. Evaluado mediante un modelo de Aprendizaje Profundo U-Net entrenado en California y probado en España, el NRBR mostró un desempeño competitivo frente a enfoques multiespectrales y al índice óptico dNBR (delta Normalized Burn Ratio), con un coeficiente Dice del 83.51%. Este índice monovariable, que supera limitaciones como la nubosidad y la iluminación solar, ofrece generalización espacial (bajo diferentes tipos de cobertura), menor costo computacional y operatividad bajo condiciones adversas, posicionándose como una herramienta eficaz para el monitoreo de incendios a nivel global.

Palabras clave: mapeo de áreas quemadas, índice NRBR, sentinel-1, monitoreo de incendios

Performance of the Normalized Radar Burn Ratio for Burned Area Mapping: Beyond Optical Indices

Abstract: *The recently published Sentinel-1 based Normalized Radar Burn Ratio (NRBR) index presents a robust alternative with performance comparable or superior to optical data for burned area mapping. Evaluated using a U-Net Deep Learning model trained in California and tested in Spain, the NRBR demonstrated competitive performance against multispectral approaches and the optical dNBR (delta Normalized Burn Ratio) index, achieving a Dice coefficient of 83.51%. This single-variable index overcomes limitations such as cloud cover and solar illumination, offering spatial generalization (across different land cover types), lower computational cost, and operational capability under adverse conditions, positioning itself as an effective tool for global fire monitoring.*

Keywords*: mapping burned areas, index NRBR, sentinel-1, wildfire monitoring*

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales constituyen uno de los principales disturbios ambientales a escala global, con impactos significativos sobre los ecosistemas, el ciclo del carbono, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Mansoor *et al*., 2022). En las últimas décadas, la frecuencia e intensidad de los incendios han aumentado en numerosas regiones del mundo, incluyendo en zonas mediterráneas, como consecuencia de la combinación entre cambio climático, cambios en el uso del suelo y acumulación de combustible vegetal (Caon *et al*., 2014). En este contexto, la cartografía precisa y oportuna de las áreas quemadas es fundamental para evaluar los impactos del fuego, apoyar la gestión post-incendio y mejorar la comprensión de los regímenes de fuego a diferentes escalas espaciales y temporales.

La teledetección satelital se ha consolidado como una herramienta clave para el monitoreo de áreas quemadas, gracias a la disponibilidad de sensores ópticos y radar de acceso abierto. Los sensores ópticos de resolución media, como Landsat y Sentinel-2, han sido ampliamente utilizados mediante índices espectrales como el Normalized Burn Ratio (NBR) (Lutes *et al*., 2006) y su versión diferencial (dNBR), que explotan los cambios en la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y de onda corta (SWIR) asociados a la pérdida de biomasa y humedad tras un evento de fuego. No obstante, más allá de la dependencia de la iluminación solar, la fuerte sensibilidad a la nubosidad y al humo que limitan la aplicabilidad operativa de estos índices después de un incendio, también se debe abordar su alta sensibilidad a la reflectancia del suelo con escasa vegetación en las estimaciones de áreas quemadas (Tarazona and Mantas, 2026). Adicionalmente, resulta fundamental optimizar el conjunto de variables de entrada en modelos de Deep Learning (DL), ya que una selección adecuada puede mejorar la eficiencia computacional (menos requerimientos computacionales), la capacidad de generalización y la robustez del modelo.

En este escenario, los sensores radar de apertura sintética (SAR por sus siglas en inglés), como Sentinel-1

en banda C, ofrecen una alternativa complementaria al proporcionar información independiente de las condiciones atmosféricas y de iluminación. Diversos estudios han demostrado el potencial de índices radar basados en cambios temporales de la retrodispersión para la detección de áreas quemadas (Fernandez-Carrillo *et al*., 2019; Addison and Oommen, 2018); sin embargo, su rendimiento depende fuertemente de la polarización, el tipo de cobertura del suelo y las condiciones de humedad. Recientemente, se propuso el índice Normalized Radar Burn Ratio (NRBR) (Tarazona *et al.*, 2025), que integra de forma normalizada las respuestas complementarias de las polarizaciones VV (transmite vertical y recibe vertical) y VH (transmite vertical y recibe horizontal), mostrando resultados prometedores para la detección de cicatrices de incendio y una elevada correspondencia con índices ópticos como el dNBR.

Sobre esta base, el presente trabajo complementa las investigaciones previas de Tarazona *et al.* (2025) y Tarazona and Mantas (2026) evaluando el potencial del índice NRBR como variable de entrada para la segmentación de áreas quemadas mediante un modelo DL. El objetivo es analizar su capacidad de generalización espacial cuando el modelo se entrena en una única tesela y se aplica en una tesela independiente, comparando su desempeño con un enfoque multibanda basado en las 10 bandas de Sentinel-2 y con el índice óptico diferencial dNBR. A partir de datos y análisis previamente publicados, se examina hasta qué punto un índice radar monovariable como el NRBR puede ofrecer resultados robustos y transferibles bajo regímenes de fuego y coberturas contrastantes, destacando su potencial como alternativa o complemento operativo a los enfoques ópticos tradicionales en la cartografía de áreas quemadas.

2. AREA DE ESTUDIO Y DATOS

2.1. Área de estudio y datos de referencia

El estudio se centra en dos regiones (teselas) propensas a incendios claramente diferenciadas: California (sureste de los Estados Unidos de América) y Andalucía (sur de España) (Fig. 1). En ambos casos, se utilizaron teselas de una cuadrícula de 100 × 100 km para evaluar las predicciones de área quemada. La zona del sur de España es representa por bosques mediterráneos fuertemente afectados por grandes incendios. La zona californiana abarca ecosistemas típicos de chaparral y matorral, caracterizados por incendios forestales frecuentes de alta intensidad. Estas regiones difieren ligeramente en vegetación, clima y regímenes de fuego, lo que proporciona condiciones diferentes para evaluar el impacto de la estimación de áreas quemadas tanto con datos radar y ópticos. Para los datos de referencia se utilizaron los perímetros anuales de áreas quemadas obtenidos por la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible-Junta de Andalucía y del California Department of Forestry and Fire Protection, rasterizados a 10 metros.

2.2. Datos Sentinel-2 y Sentinel-1

Los datos radar proceden de Sentinel-1, utilizando adquisiciones en modo Interferometric Wide Swath (IW) y formato Ground Range Detected procesadas en GEE. Se emplearon las polarizaciones VV y VH, integrando órbitas ascendentes y descendentes, con un preprocesado que incluyó eliminación de ruido térmico, calibración radiométrica y corrección geométrica.

Los datos ópticos proceden de Sentinel-2 (Copernicus) en Reflectancia de Superficie obtenidos de Google Earth Engine (GEE). La selección temporal se diseñó para maximizar el contraste inducido por el fuego, que normalmente ocurre durante el verano y se extiende hasta finales de año. En España, el periodo pre-incendio y post-incendio se definió entre el 1 de septiembre y el 30 de noviembre de 2020 y 2021 respectivamente. En California (USA), se utilizaron ventanas equivalentes entre el 15 de octubre y el 15 de diciembre de 2019 (pre-fuego) y 2020 (post-fuego). Se aplicó un enmascaramiento de nubes y cirros antes del cálculo de los índices espectrales. Estas mismas fechas fueron usadas para computar las imágenes radar.

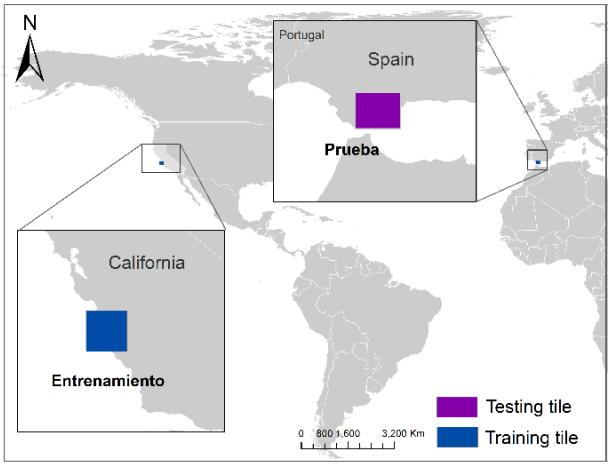


Figura 1. Área de estudio y las teselas (regiones) seleccionadas para el entrenamiento y prueba del modelo de DL. Los términos teselas y región son intercambiables, de modo que en algunas secciones del manuscrito se hace referencia a región como tesela.

3. METODOLOGIA

3.1. El índice Normalized Radar Burn Ratio

El NRBR (Ec. 1) es un índice basado en datos SAR de Sentinel-1 que mejora la detección de áreas quemadas mediante la integración de las respuestas complementarias de las polarizaciones VV y VH en banda C. Tras un incendio, la pérdida de estructura volumétrica reduce la retrodispersión en VH, mientras que la exposición de elementos verticales incrementa la señal en VV (Tarazona *et al*., 2025, Fig. 2). El NRBR combina los cambios relativos pre- y post-incendio en una métrica normalizada que resalta las cicatrices de fuego con valores negativos y mantiene valores cercanos a cero o positivos en superficies no afectadas. Al basarse en relaciones temporales, el índice reduce parcialmente efectos topográficos y ruido speckle y, al ser independiente de la iluminación solar y la nubosidad,

constituye una alternativa robusta y complementaria a los índices ópticos para la cartografía de áreas quemadas.

$$\text{NRBR} = \frac{RBR_{VH} - RBR_{VV}}{RBR_{VH} + RBR_{VV}} \quad (1)$$

Donde, RBR_{VH} y RBR_{VV} corresponden al Radar Burn Ratio calculado para las polarizaciones VH y VV, respectivamente, en unidades de potencia. Los valores del NRBR (ver la Fig. 3) oscilan aproximadamente entre −1 y 1.

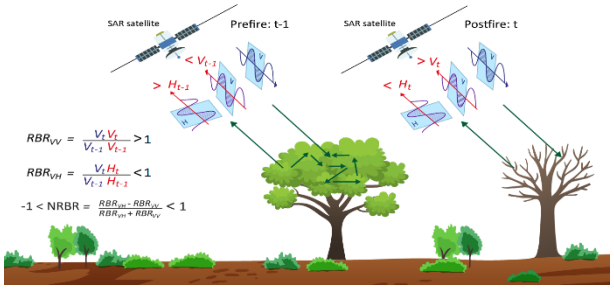


Figura 2. Esquema conceptual sobre el comportamiento de la retrodispersión de las polarizaciones VV y VH en la estructura de la vegetación en pre y post-incendio forestal. Adaptado de Tarazona and Mantas (2026).

3.2. El índice Normalized Burn Ratio

El NBR es un índice espectral ampliamente utilizado para la detección de áreas quemadas con datos ópticos de sensores como Sentinel-2, basado en el contraste entre el NIR y el SWIR. Su versión diferencial, el dNBR (Ec. 2 y Fig. 3), calculada como la diferencia entre el NBR post- y pre-incendio, permite aislar los cambios inducidos por el fuego.

$$dNBR = NBR_t - NBR_{t-1} \quad (2)$$

Donde t y $t-1$ representa post y pre-fuego respectivamente.

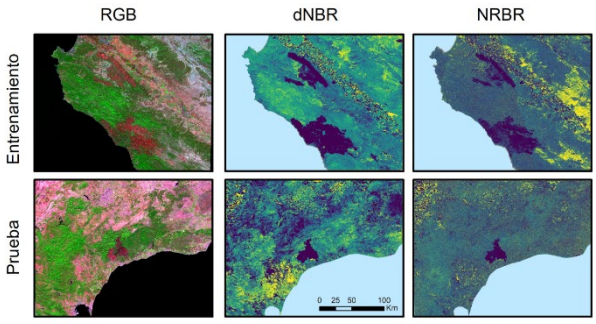


Figura 3. Composición de Sentinel-2 (SWIR, NIR, Red), dNBR y NRBR para áreas de entrenamiento y prueba.Segmentación de áreas quemadas

La segmentación de áreas quemadas se realizó mediante un enfoque de DL basado en la arquitectura U-Net, implementada a través del paquete scikit-eo (Tarazona *et al*., 2024). El modelo fue entrenado utilizando una tesela en California y posteriormente se aplicó para estimar áreas quemadas en una tesela independiente de España, lo que permitió evaluar su capacidad de generalización espacial.

3.3. Evaluación de métricas de exactitud

La evaluación de la segmentación de áreas quemadas se realizó utilizando el Error de Omisión (OE), el Error de Comisión (CE) y el Coeficiente Dice (CD). La métrica CD se empleó para evaluar la calidad de la segmentación, al ser robusto frente al desbalance de clases.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El modelo entrenado con las 10 bandas ópticas Sentinel-2 (RGB en Tabla 1) obtuvo el menor EC: 12.63% y el mayor valor CD: 87.52%, indicando una segmentación más equilibrada entre falsos positivos y falsos negativos. En cambio, el modelo basado en el índice óptico dNBR mostró un comportamiento inestable. Aunque su EO fue bajo de 7.08%, presentó una comisión extremadamente alta de 96.90% y un CD residual (6.05%), consistente con una marcada sobreestimación de áreas quemadas (Fig. 4). El modelo con el índice radar NRBR alcanzó un desempeño competitivo, un EO de 11.81%, EC de 17.56% y un CD de 83.51%, situándose como la mejor alternativa monovariable frente al dNBR y aproximándose al rendimiento del enfoque multibanda (RGB). En términos de coste computacional, dNBR redujo el tiempo de entrenamiento (3.9') frente al NRBR (5.1') y RGB (6.8'), aunque con pérdida severa de calidad de segmentación (i.e., alta comisión). Para aplicaciones a escala regional o global que prioricen tanto la precisión como la optimización del conjunto de variables de entrada, el enfoque NRBR ofrece el mejor equilibrio entre exactitud y eficiencia computacional, claramente.

Tabla 1. Métricas de la segmentación de áreas quemadas.

	RGB	dNBR	NRBR
EO	12.46	7.08	11.81
EC	12.63	96.90	17.56
CD	87.52	6.05	83.51
Tiempo (minutos)	6.8'	3.9'	5.1'

Estos resultados sugieren que, con entrenamiento limitado a una única tesela (región de California) y prueba en una tesela independiente (región del sur de España), los enfoques multiespectrales (RGB) y radar (NRBR) generalizan mejor que un índice óptico diferencial como el dNBR, cuyo rendimiento puede degradarse cuando el modelo aprende patrones poco transferibles y termina sobrepredicciendo cicatrices de fuego. Este comportamiento contrasta con análisis a mayor escala en Portugal llevado a cabo por Tarazona and Mantas (2026), donde el diseño por teselas y la separación espacial entre entrenamiento y prueba permitió evaluar la transferencia bajo heterogeneidad ambiental y de coberturas, mostrando que el desempeño puede variar por región, tipo de cobertura y por escala de investigación. Además, nuestros hallazgos sobre el buen desempeño del NRBR puede estar reforzado por el uso combinado de órbitas ascendentes y descendentes de Sentinel-1 a diferencia del trabajo de Tarazona and

Mantas (2026) que solo usó la órbita ascendente de Sentinel-1, lo que incrementa la densidad temporal y estabiliza la señal frente a variabilidad de adquisición, apoyando su robustez como entrada única en segmentación de áreas quemadas.

Adicionalmente, las diferencias observadas en el rendimiento entre el índice radar NRBR y los índices ópticos pueden explicarse a partir de los mecanismos físicos que gobiernan cada señal. En el caso del NRBR, basado en datos SAR en banda C, la detección de áreas quemadas está controlada principalmente por cambios estructurales en la vegetación. Tras el fuego, la pérdida de dispersión volumétrica produce una disminución en la señal VH, mientras que la exposición de elementos verticales incrementa la retrodispersión en VV, generando un contraste consistente entre condiciones pre y post-incendio. Por el contrario, los índices ópticos como el dNBR dependen de cambios en la reflectancia en el NIR y SWIR, los cuales, además de estar asociados a la pérdida de biomasa y humedad, son altamente sensibles a la reflectancia del suelo desnudo, condiciones de iluminación y variabilidad fenológica. Esta naturaleza espectral introduce ambigüedad en escenarios heterogéneos, favoreciendo la sobreestimación observada en el dNBR. En este contexto, el NRBR ofrece una representación más directamente vinculada a la estructura física del dosel, lo que favorece una mayor estabilidad y transferibilidad espacial.

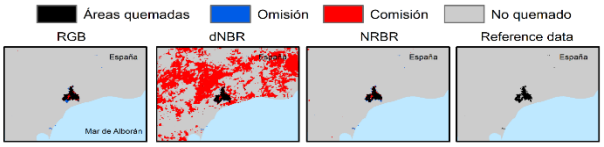


Figura 4. Estimaciones de áreas quemadas para diferentes variables de entrada en el Sur de España.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, el mensaje principal es que el NRBR ofrece una vía monovariable sólida y transferible para detección de áreas quemadas por cuatro razones: i) trabaja bajo condiciones ópticas adversas, ii) poco influenciado por el tipo de cobertura, iii) menor costo computacional y iv) su alto grado de operabilidad.

El enfoque multibanda RGB maximiza ligeramente la exactitud, pero requiere más costo computacional y no opera bajo condiciones adversas. Finalmente, el rendimiento del dNBR es influenciado por el tipo de cobertura y composición (e.g., suelo desnudo), requiere estrategias de entrenamiento más amplias (más regiones/teselas) para evitar sobreajuste espacial y mejorar generalización.

6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo de Yonatan Tarazona Coronel fue financiado por la “Fundação para a Ciência e a Tecnologia” (FCT) – Portugal, a través de UI/BD/154831/2023 como parte de un proyecto de doctorado. Queremos agradecer a las sugerencias y comentarios de revisores anónimos que han mejorado el contenido del manuscrito.

7. REFERENCIAS

Addison, P., and Oommen, T. Utilizing satellite radar remote sensing for burn severity estimation. Int. J. *Appl. Earth Observ. Geoinf., vol. 73*, pp. 292–299, Dec. 2018.

Caon, L., Vallejo, V.R., Ritsema, C. J., Geissen, V. (2014). Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews, 139,* 47-58.

Fernandez-Carrillo, L. McCaw, and M. A. Tanase, Estimating prescribed fire impacts and post-fire tree survival in eucalyptus forests of western Australia with L-band SAR data. *Remote Sens. Environ.,vol. 224*, pp. 133–144, Apr. 2019.

Mansoor, S., Farooq, I., Kachroo, M. M., Mahmoud, A. E. D., Fawzy, M., Popescu, S. M., Alyemeni, M. N., Sonne, C., Rinklebe, J., & Ahmad, P. (2022). Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change. *Journal of Environmental Management, 301*, 113769.

Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Sutherland, S., Gangi, L.H. (2006). FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service- General Technical Report RMRS-GTR.

Tarazona, Y., Tanase, M.A., Mantas, V.M. (2025). Normalized Radar Burn Ratio: A Case Study for Burned Area Mapping in Mediterranean Forests. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 22*.

Tarazona, Y., Mantas, M. (2026). Advancing burned area mapping using the Normalized Radar Burn Ratio (NRBR). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, In review.

Tarazona, Y., Benitez-Paez, F., Nowosad, J., Drenkhan, F., and Timaná, M. (2024). scikit-eo: A Python package for Remote Sensing Data Analysis. *Journal of Open Source Software, 9*(99), 6692.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.126

Clasificación de tipos de combustibles forestales empleando la tercera cobertura del PNOA LIDAR en la Depresión del Ebro

Lamelas Gracia, María Teresa [1] **Montealegre Gracia, Antonio Luis** [2] **Romero Medina, Santiago Patricio** [1]

[1] Geoforest-IUCA, Departamento de Geografía y O.T., Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España

[2] Centro Universitario de la Defensa, Academia General Militar, Zaragoza, España

ORCID: Lamelas Gracia 0000-0002-8954-7517 Montealegre Gracia 0000-0001-6288-2780

Correspondencia: tlamelas@unizar.es monteale@unizar.es 924211@unizar.es

RESUMEN

El conocimiento de los combustibles forestales es fundamental para tratar de mitigar el riesgo de incendio que se está intensificando en los últimos años. En este estudio se evalúa la capacidad que tiene la información extraída de las nubes de puntos de la tercera cobertura del PNOA LiDAR para estimar combustibles forestales según la clasificación Prometheus. La verdad terreno está compuesta por una muestra de 108 parcelas ubicadas en el centro de la Depresión del Ebro, en las cuales se ha identificado el tipo combustible forestal. Las nubes de puntos fueron procesadas para eliminar los puntos de ruido y solape, ser reclasificadas utilizando una metodología adaptada a ambientes forestales, y crear un modelo digital del terreno con un tamaño de píxel adecuado a la distancia entre puntos LiDAR. Posteriormente, se procedió a la normalización de las alturas y al recorte de las nubes de puntos según el tamaño y forma de las parcelas para la extracción de métricas relacionadas con las alturas de la vegetación, la densidad de puntos a diferentes alturas e índices de diversidad. Finalmente, se crearon conjuntos de datos para entrenar y validar distintos modelos de clasificación de aprendizaje automático: random forest, support vector machine lineal y radial. De cada modelo e iteración se calcula una serie de estadísticos que determinan la calidad de la clasificación. Los resultados muestran alrededor del 75% de precisión global, siendo el que mejor resultado brinda el que combina la elevación del momento L3, el porcentaje de todos los retornos sobre la media, y el índice de rugosidad vegetal, con una precisión global del 78%. Estos resultados confirman que un aumento de la densidad de puntos mejora la capacidad de estimación de los combustibles forestales.

Palabras clave: *combustible forestal, modelo Prometheus, Random Forest, Support Vector Machine*

Fecha de recepción: 6 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 6 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Clasificación de tipos de combustibles forestales empleando la tercera cobertura del PNOA LIDAR en la Depresión del Ebro

Lamelas Gracia, María Teresa [(1)], Montealegre Gracia, Antonio Luis [(1,2)], Romero Medina, Santiago Patricio [(1)]

[(1)] GEOFOREST-IUCA, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España.

[(2)] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50090 Zaragoza, España.

0000-0002-8954-7517, tlamelas@unizar.es

924211@unizar.es

0000-0001-6288-2780, monteale@unizar.es

Resumen: El conocimiento de los combustibles forestales es fundamental para tratar de mitigar el riesgo de incendio que se está intensificando en los últimos años. En este estudio se evalúa la capacidad que tiene la información extraída de las nubes de puntos de la tercera cobertura del PNOA LiDAR para estimar combustibles forestales según la clasificación Prometheus. La verdad terreno está compuesta por una muestra de 108 parcelas ubicadas en el centro de la Depresión del Ebro, en las cuales se ha identificado el tipo combustible forestal. Las nubes de puntos fueron procesadas para eliminar los puntos de ruido y solape, ser reclasificadas utilizando una metodología adaptada a ambientes forestales, y crear un modelo digital del terreno con un tamaño de píxel adecuado a la distancia entre puntos LiDAR. Posteriormente, se procedió a la normalización de las alturas y al recorte de las nubes de puntos según el tamaño y forma de las parcelas para la extracción de métricas relacionadas con las alturas de la vegetación, la densidad de puntos a diferentes alturas e índices de diversidad. Finalmente, se crearon conjuntos de datos para entrenar y validar distintos modelos de clasificación de aprendizaje automático: *random forest*, *support vector machine* lineal y radial. De cada modelo e iteración se calculó una serie de estadísticos que determinan la calidad de la clasificación. Los resultados muestran alrededor del 75% de exactitud global, siendo el que mejor resultado brinda el que combina la elevación del momento L3, el porcentaje de todos los retornos sobre la media, y el índice de rugosidad vegetal, con una exactitud global del 78%. Estos resultados confirman que un aumento de la densidad de puntos mejora la capacidad de estimación de los combustibles forestales.

Palabras clave: incendio forestal, modelo Prometheus, Random Forest, Support Vector Machine

Classification of forest fuel types using the third capture of the PNOA LIDAR in the Ebro Depression

***Abstract**: Knowledge of forest fuels is fundamental to mitigating the fire risk that has been intensifying in recent years. This study evaluates the capacity of information extracted from point clouds of the third layer of the PNOA LiDAR survey to estimate forest fuels using the Prometheus methodology. The ground reality consists of 108 plots, located in the center of the Ebro Depression, which were classified in the field according to forest fuel type in a previous study. The point clouds downloaded from the National Geographic Information Center were processed to remove noise and overlapping points, reclassified using a methodology adapted to forest environments, and used to create a digital terrain model with a pixel size appropriate to the distance between points in the file. Subsequently, the heights were normalized and the point clouds were cropped to the size and shape of the plots to extract statistical metrics related to vegetation heights, point density at different heights, and diversity indices. Finally, datasets were created to train and validate different machine learning classification models: random forest, linear support vector machine, and radial. A series of statistics that determine the classification quality were calculated for each model and iteration. The results show approximately 75% overall accuracy, with the best result coming from the model that combines L3 moment elevation, the percentage of all returns above the mean, and the vegetation roughness index, achieving an overall accuracy of 78%. These results confirm that increasing point density improves the ability to estimate forest fuels.*

***Keywords**: wildfire, Prometheus model, Random Forest, Support Vector Machine*

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales han arrasado aproximadamente 400.000 hectáreas en España en el año 2025, según las estimaciones del Sistema de Información de Incendios Forestales de la Comisión Europea (EFFIS), considerándose uno de los años más catastróficos del presente siglo por el número de hectáreas quemadas.

Los modelos de combustibles forestales clasifican la vegetación según determinados criterios, como son la biomasa consumible, su capacidad de ignición y propagación del fuego (Marino *et al*., 2016). El modelo Prometheus, creado por la Comisión Europea, es una adaptación y simplificación del modelo de Estados Unidos desarrollado por el Laboratorio de Incendios Forestales del Norte (*Northern Forest Fire Laboratory*, NFFL), adaptado a ecosistemas mediterráneos, que clasifica la vegetación en siete tipos de combustibles forestales basado en ciertos umbrales de altura y cobertura de la vegetación (Montealegre, 2017).

La caracterización y cartografía de los combustibles forestales es un proceso complejo; si bien el trabajo de campo proporciona la referencia más fiable, su alto coste operativo restringe su uso extensivo, lo que ha impulsado el empleo de técnicas de teledetección. Abdollahi & Yebra (2023) presentaron una revisión de investigaciones realizadas para su estimación utilizando diferentes métodos de teledetección, concluyendo que, empleando Landsat, ASTER y Sentinel 2 (datos multiespectrales de baja resolución espacial), se consiguió una exactitud entre el 70 y el 91,74 %, con Quickbird y WorldView 2 y 3 (multiespectrales de alta resolución espacial) exactitudes entre 74,27 y 85,43 %, con AVIRIS y PRISMA (hiperespectrales de alta y media resolución espacial) exactitudes entre 80 y 87 % y con SAR (radar de apertura sintética) exactitudes entre 70 y 85 %. En el citado artículo, se indica que las investigaciones realizadas con LiDAR aerotransportado muestran exactitudes entre el 81,26 y 89,5 %, sin embargo, este valor aumenta a un intervalo entre el 84 y el 92,8 % al combinar la información LiDAR con sensores multiespectrales o hiperespectrales.

El grupo GEOFOREST-IUCA de la Universidad de Zaragoza ha desarrollado en la última década una línea de investigación sobre estimación de combustibles forestales según la clasificación Prometheus en ambientes mediterráneos de elevada diversidad y heterogeneidad ambiental, analizando la idoneidad de diferentes sensores activos, particularmente sensores LiDAR y SAR.

Con estos antecedentes, y considerando la disponibilidad reciente de información LiDAR de mayor densidad de puntos, el objetivo del presente trabajo es estimar combustibles forestales según el modelo Prometheus, utilizando técnicas de clasificación digital de aprendizaje automático, a partir de información tomada en campo e información derivada de las nubes de puntos de la tercera cobertura LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aerea (PNOA LiDAR). Entre los objetivos secundarios a abordar se encuentran:

- Analizar las métricas extraídas del PNOA LiDAR e identificar la capacidad que poseen para diferenciar entre varios tipos de combustible forestal Prometheus.
- Comparar la exactitud en la estimación de combustibles forestales de tres modelos de clasificación de aprendizaje automático.
- Comparar los resultados obtenidos con trabajos previos realizados con tecnología LiDAR.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y verdad terreno

Los espacios forestales de Aragón presentan una elevada vulnerabilidad frente a los incendios forestales debido a la combinación del tipo de vegetación, la complejidad del relieve y unas condiciones meteorológicas adversas, caracterizadas por baja humedad relativa, vientos intensos, altas temperaturas estivales y una elevada frecuencia de tormentas eléctricas. El área de estudio se sitúa en el sector central de la Depresión del Ebro, en el entorno del Centro Nacional de Adiestramiento (CENAD) San Gregorio, donde las actividades militares con empleo de armas, explosivos y munición incrementan significativamente el riesgo de ignición y la probabilidad de incendios forestales (Montealegre, 2017).

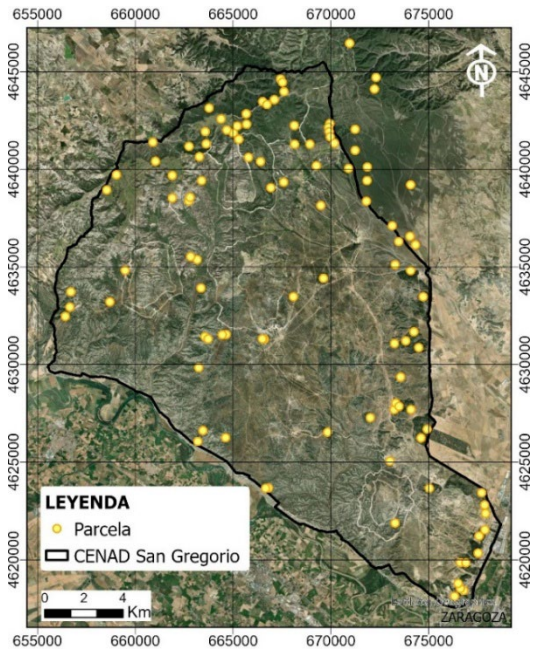


Figura 1. Localización del CENAD San Gregorio y de las parcelas de muestreo.

Montealegre, Lamelas, de la Riva, *et al*. (2015) entre los meses de julio y septiembre de 2014 realizaron la identificación en campo de los tipos de combustibles forestales por el modelo Prometheus en 108 parcelas

circulares, de 15 m de radio, distribuidas de manera aleatoria pero estratificada por la zona de estudio (Fig. 1). Esas mismas parcelas fueron revisitadas entre agosto y septiembre de 2020 para la realización de otra investigación (García-Martín *et al*., 2025), en la que se hizo una verificación *in situ* de la clasificación de combustibles forestales y observándose que en 6 años la dinámica de la vegetación no había modificado la clasificación asignada previamente. En 2023 se revisitaron las parcelas en el contexto del trabajo de Hoffrén *et al*. (2023) y se modificó el tipo de combustible forestal de algunas parcelas como producto de un pequeño conato de incendio ocurrido en agosto de 2022. Esta información actualizada sirvió como verdad terreno en el presente trabajo.

2.2. Recopilación y procesamiento de datos PNOA LiDAR

Un total de 79 ficheros LAZ de la tercera cobertura PNOA LiDAR fueron descargados del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) y clasificados utilizando el algoritmo de filtrado MCC, que es el que brinda mejores resultados para ecosistemas forestales mediterráneos (Montealegre, Lamelas, & de la Riva, 2015). A continuación, se normalizaron las alturas de los puntos en RStudio mediante varios pasos:

- Selección de los puntos categorizados como "2", es decir, suelo.
- Creación de un modelo digital del terreno (MDT) de 0,50 m de resolución espacial mediante interpolación con el método de redes irregulares de triángulos (TIN) a ráster, utilizando la función "rasterize_terrain" del paquete lidR.
- Normalización de alturas a través de la función normalize_height del mismo paquete lidR, estableciendo como superficie de suelo el MDT creado en el paso anterior.

Finalmente, se recortaron las nubes de puntos con las geometrías de las parcelas circulares de la verdad terreno.

2.3. Extracción de métricas

En primer lugar, se empleó el software FUSION para el cálculo automático de parámetros estadísticos de las alturas de los retornos láser. La herramienta "CloudMetrics" permite calcular diversas estadísticas, tanto de todos los retornos como de determinados retornos agrupados por estratos de altura, utilizando para ello el parámetro "strata". De acuerdo con Domingo *et al*. (2020), se establecieron los siguientes intervalos de altura para estratificar los retornos y, en consecuencia, tratar de diferenciar mejor los tipos de combustibles del modelo Prometheus: 0,10 – 0,60 m; 0,60 – 2 m; 2 – 4 m y mayor a 4 m. Además, para el cálculo de los índices de diversidad LiDAR Height Diversity Index (LHDI) y LiDAR Height Evenness Index (LHEI), se establecieron intervalos de 50 cm (Listopad *et al*., 2015).

Asimismo, se calculó el Rumple Index o Índice de rugosidad de Parker *et al*. (2004), que mide la heterogeneidad estructural del dosel en tres dimensiones mediante la división entre el área de la superficie del dosel forestal y el área del suelo, obteniéndose valores entre uno e infinito.

2.4. Clasificación mediante modelos de aprendizaje automático

El primer paso es la identificación de las métricas LiDAR con mayor capacidad predictiva en la estimación de los tipos de combustibles, para su inclusión posterior en los modelos de clasificación. Se aplicó el test de Dunn a las 152 métricas LiDAR obtenidas considerando seis de los siete tipos de combustibles forestales de Prometheus. El tipo 1 (pastizal) fue excluido de la clasificación debido a la limitada sensibilidad del sensor LiDAR para discriminar entre vegetación de pastizal y matorral.

El aprendizaje automático (*machine learning)* es una técnica de Inteligencia Artificial basada en el uso de métodos computacionales para la extracción de patrones a partir de conjuntos de datos. En este estudio se adopta un enfoque de clasificación supervisada, en el que algoritmos entrenados con datos etiquetados asignan las observaciones de entrada a categorías predefinidas. En concreto, se emplearon los algoritmos *Random Forest* (RF) y *Support Vector Machine* (SVM), este último implementado con *kernel* lineal y radial. Aplicando el principio de parsimonia, el número de variables independientes incorporadas en los modelos se restringió a un rango de entre tres y cinco, ya que la inclusión de un mayor número de variables puede introducir ruido y reducir la capacidad de generalización de los modelos. Se realizó una validación cruzada de 10 iteraciones (*k-fold cross-validation*), que permite incrementar la robustez de las estimaciones (Hoffrén *et al*., 2024). El rendimiento de los modelos de clasificación se evaluó mediante matrices de confusión, a partir de las cuales se derivaron métricas como la exactitud, la exhaustividad y los errores de omisión y comisión.

3. RESULTADOS

Los resultados del test de Dunn permiten evaluar la capacidad discriminante de cada métrica, cuantificando el número de pares de categorías que es capaz de diferenciar, lo que facilita la selección de aquellas métricas con mayor poder de separación entre tipos de combustible. A partir de las métricas seleccionadas se realizaron un total de 48 iteraciones, orientadas a maximizar la exactitud global de los modelos, obteniéndose las tres mejores combinaciones de variables independientes para cada uno de los tres modelos de clasificación. En la Tabla 1 se muestran los conjuntos de métricas que alcanzan la mayor exactitud global para cada modelo.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El uso de métricas derivadas de las nubes de puntos de la tercera cobertura del PNOA LiDAR, que tiene una densidad de 5 puntos/m^2, aumenta la exactitud global hasta un 78 % de acierto en la estimación de tipos de combustible en comparación con los resultados obtenidos por Domingo *et al*. (2020) con una metodología similar basada en datos de la segunda cobertura del PNOA LiDAR, cuya densidad en la zona de estudio es de 1 punto/m^2, y con la que se alcanzó una

exactitud global del 59 % utilizando el modelo SVM lineal. No obstante, en este trabajo de Domingo *et al*. (2020) la extensión y heterogeneidad de la muestra verdad-terreno era mayor. En todo caso, los valores de exactitud alcanzados no llegan al 81 % obtenido en la estimación de combustibles forestales a partir de métricas derivadas de sensores LiDAR a bordo de vehículos aéreos no tripulados (VANT), utilizando el algoritmo de clasificación RF (Hoffrén *et al*., 2024).

Tabla 1. Combinación de variables que proporcionan la mayor exactitud global para cada modelo.

Modelo	Variables	Exactitud
SVMr	Elevación del momento L3, Porcentaje de todos los retornos sobre la altura media, Rumple Index	0,78
SVMl	Elevación media, Elevación del momento L3, Porcentaje de todos los retornos sobre la altura media, Rumple Index	0,78
RF	Elevación del momento L3; Porcentaje de todos los retornos sobre la altura media; Rumple Index; Rumple Index de los retornos menores a 0,60 m; Rumple Index de los retornos entre 3,5 y 4 m	0,75

En los tres modelos de clasificación, el tipo de combustible 6 es el que muestra la peor exhaustividad, debido a su confusión con los tipos 5 y 7. Esto obedece a que, según los resultados del test de Dunn, ninguna de las métricas seleccionadas es estadísticamente significativa para diferenciar entre estas tres categorías, mientras que sí resultan adecuadas para discriminar el resto de tipos de combustible.

Las múltiples iteraciones realizadas muestran que un exceso de métricas utilizadas como variables independientes en los modelos de clasificación pueden generar ruido y conllevar un deterioro de la exactitud general. Aun así, se logró obtener una exactitud global del 78 % con el modelo *Support Vector Machine* con *kernel* radial (SVMr), lo que confirma la mejora en la clasificación de combustibles mediante LiDAR de mayor densidad y puede contribuir a la mejora de la cartografía operativa de riesgo de incendio en combinación con información multiespectral.

5. AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por los proyectos CUD2024_18 y CUD-2026_14 del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, la ayuda RED2024-154139-E Alianza Observa financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/, el Proyecto FLARE, PID2023-148568OB-I00, aprobado en la convocatoria de proyectos de Generación de Conocimiento de 2023 y el Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA).

6. REFERENCIAS

Abdollahi, A., & Yebra, M. (2023). Forest fuel type classification: Review of remote sensing techniques, constraints and future trends. *Journal of Environmental Management, 342*, 118315. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118315

Domingo, D., de la Riva, J., Lamelas, M., García-Martín, A., Ibarra, P., Echeverría, M., & Hoffrén, R. (2020). Fuel Type Classification Using Airborne Laser Scanning and Sentinel 2 Data in Mediterranean Forest Affected by Wildfires. Remote Sensing, 12(21), 3660. https://doi.org/10.3390/rs12213660

García-Martín, A., Domingo, D., Lamelas, M. T, de la Riva, J., Escribano, F., Montealegre, A.L, Montorio, R., Pérez-Cabello, F. (2025) Fuel type mapping with X-band SAR in military training areas for wildfire risk assessment. *Journal of Applied Remote Sensing, 19*(4), 044514. https://doi.org/10.1117/1.JRS.19.044514

Hoffrén, R., Lamelas, M. T., & de la Riva, J. (2023). UAV-derived photogrammetric point clouds and multispectral indices for fuel estimation in Mediterranean forests. *Remote Sensing Applications: Society and Environment, 31*, 2. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100997

Hoffrén, R., Lamelas, M. T., & de la Riva, J. (2024). Classification and Mapping of Fuels in Mediterranean Forest Landscapes Using a UAV-LiDAR System and Integration Possibilities with Handheld Mobile Laser Scanner Systems. *Remote Sensing, 16*(18), 3536. https://doi.org/10.3390/rs16183536

Listopad, C. M., C. S., Masters, R. E., Drake, J., Weishampel, J., & Branquinho, C. (2015). Structural diversity indices based on airborne LiDAR as ecological indicators for managing highly dynamic landscapes. *Ecological Indicators, 57*, 268-279. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.017

Marino, E., Ranz Vega, P., Tomé, J. L., & Noriega, M. Á. (2016). Cartografía de alta resolución de modelos de combustible forestal: metodología de bajo coste basado en datos LIDAR. *Foresta, 65*, 34-43.

Montealegre, A. L. (2017). Aplicaciones forestales de los datos LiDAR-PNOA en ambiente mediterráneo: su filtrado e interpolación y el modelado de parámetros estructurales con apoyo en trabajo de campo. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 25-27.

Montealegre, A. L., Lamelas, M. T., De la Riva, J., García-Martín, A., & Escribano, F. (2015). Cartografía de modelos de combustible mediante combinación de imágenes LiDAR, SAR y ópticas en el Centro de Adiestramiento «San Gregorio». En R. Asorey Cacheda, R. Devesa Rey, M. M. Solla Carracelas, & J. M. Pousada Carballo (Eds.), Actas: III Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, DESEi+d (Primera, pp. 1185-1192). Centro Universitario de la Defensa de Marín.

Parker, G. G., Harmon, M. E., Lefsky, M. A., Chen, J., Pelt, R. Van, Weis, S. B., Thomas, S. C., Winner, W. E., Shaw, D. C., & Frankling, J. F. (2004). Three-dimensional Structure of an Old-growth Pseudotsuga-Tsuga Canopy and Its Implications for Radiation Balance, *Microclimate, and Gas Exchange. Ecosystems, 7*(5). https://doi.org/10.1007/s10021-004-0136-5.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.130

Estimación de la biomasa consumida y del factor de eficiencia de quemado utilizando datos LiDAR aéreos y de satélite multitemporales

García, Mariano [1] **Oliva, Patricia** [1] **Carbone, Andrea** [2] **Baissero, Adrián** [1] **Chuvieco, Emilio** [1]

[1] Universidad de Alcalá, España

[2] Sapienza Universita di Roma

ORCID: García 0000-0001-6260-5791 Oliva 0000-0001-5051-3662 Carbone 0000-0002-1119-060X Baissero 0009-0004-9431-1869 Chuvieco 0000-0001-5618-4759

Correspondencia: mariano.garcia@uah.es patricia.oliva@uah.es and.carbone@uniroma1.it adrian.baissero@uah.es emilio.chuvieco@uah.es

RESUMEN

En este trabajo se evalúan las estimaciones de biomasa consumida y del factor de eficiencia de quemado mediante el uso de datos LiDAR aeroportados y datos GEDI integrados con datos Sentinel-1 y Sentinel-2. Ambos enfoques mostraron patrones espaciales similares, aunque la estimación de biomasa consumida varió considerablemente debido a las distintas fracciones de biomasa consideradas. La estimación de biomasa aérea consumida con datos LiDAR aeroportados fue de 138 Gg y con un valor de eficiencia de quemado de 0.38. La estimación de biomasa consumida con datos GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2, considerando la biomasa foliar como combustible disponible fue de 14 Gg, y el valor de eficiencia de quemado obtenido fue de 0.32.

Palabras clave: *LiDAR aeroportado; GEDI; Sentinel-1, Sentinel-2, eficiencia de quemado, biomasa consumida*

Fecha de recepción: 6 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 6 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Estimación de la biomasa consumida y del factor de eficiencia de quemado utilizando datos LiDAR aéreos y de satélite multitemporales

García, Mariano [1], Oliva, Patricia [1], Carbone, Andrea [2], Baissero, Adrián [1], Chuvieco, Emilio [1]

[1] Universidad de Alcalá, España.

0000-0001-6260-5791, mariano.garcia@uah.es; 0000-0001-5051-3662, patricia.oliva@uah.es.

0009-0004-9431-1869, adrian.baissero@uah.es; 0000-0001-5618-4759, emilio.chuvieco@uah.es.

[2] Sapienza Universita di Roma.

0000-0002-1119-060X, and.carbone@uniroma1.it.

Resumen: En este trabajo se evalúan las estimaciones de biomasa consumida, aérea total y foliar, y del factor de eficiencia de quemado mediante el uso de datos LiDAR aeroportados y datos GEDI integrados con datos Sentinel-1 y Sentinel-2. Ambos enfoques mostraron patrones espaciales similares, aunque la estimación de biomasa consumida varió considerablemente debido a las distintas fracciones de biomasa consideradas. La estimación de biomasa aérea consumida con datos LiDAR aeroportados fue de 138 Gg y con un valor de eficiencia de quemado de 0.38. La estimación de biomasa foliar consumida con datos GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2, considerando la biomasa foliar como combustible disponible, fue de 14 Gg, y el valor de eficiencia de quemado obtenido fue de 0.32.

Palabras clave: LiDAR aeroportado, GEDI, Sentinel-1, Sentinel-2, eficiencia de quemado, biomasa consumida

Estimation of consumed biomass and burning efficiency using multitemporal airborne and satellite LiDAR

***Abstract**: This study evaluates the estimation of biomass consumed, both aboveground and foliage biomass, and the burning efficiency factor using airborne LiDAR data and GEDI data integrated with Sentinel-1 and Sentinel-2 data. Both approaches showed similar spatial patterns, although the biomass consumption estimates varied considerably due to the different biomass fractions considered. The estimate of above-ground biomass consumed derived from airborne LiDAR data was 138 Gg, associated with a burning efficiency value of 0.38. The estimate of foliage biomass consumed using GEDI, Sentinel-1, and Sentinel-2 data, considering foliar biomass as available fuel, was 14 Gg, and the burning efficiency obtained was 0.32.*

***Keywords**: Airborne LiDAR, GEDI, Sentinel-1, Sentinel-2; burning efficiency, biomass consumed.*

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales constituyen un proceso natural que desempeña un papel fundamental en el ciclo de carbono (C) mediante la emisión directa de C a la atmósfera durante la quema de biomasa, emitiendo anualmente 3,4 Pg C año^{-1} (van der Werf et al. 2025), lo que equivale a aproximadamente un 34% de las emisiones por combustibles fósiles.

La cuantificación de las emisiones de C procedentes de la quema de biomasa mediante teledetección puede realizar mediante un enfoque top-*down* a través de mediciones directas de los gases traza liberados durante el incendio (Zheng et al. 2021), o mediante un enfoque indirecto de modelización bottom-up, en el que las observaciones de área quemada se combinan con información sobre la biomasa del ecosistema y la eficiencia de quemado (Seiler and Crutzen 1980):

$$C_e = BA * AGB * f_c * \beta \quad (1)$$

donde C_e representa el carbono emitido (Mg), BA es el área quemada (ha), AGB es la biomasa aérea (Mg ha^{-1}), f_c es la fracción de biomasa aérea correspondiente a C y β es el factor de eficiencia de quemado (EQ), es decir, la fracción de biomasa consumida durante el incendio. Es común utilizar valores promediados por bioma para la EQ, lo que impide capturar la alta variabilidad espacial inherente a los combustibles forestales (van Leeuwen et al. 2014) y, por tanto, la biomasa consumida por los incendios.

Los datos multitemporales de teledetección, particularmente datos LiDAR, ofrecen una alternativa

para proporcionar información precisa, espacialmente explícita de la EQ y mejorar las estimaciones de las emisiones de C producidas por los incendios forestales. Diversos estudios han mostrado el potencial de los datos LiDAR aeroportados para estimar la biomasa consumida por los incendios forestales, tanto área (AGB) como foliar (BF) (McCarley et al. 2024; Garcia et al. 2017), a partir de la cual es posible obtener la EQ (Garcia et al. 2017). Sin embargo, la cobertura espacio-temporal de los datos aeroportados es limitada, dificultando su uso para estimar el consumo de biomasa y la EQ. Los datos sensor GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) a bordo de la estación espacial internacional, pueden mitigar estas limitaciones para estimar la biomasa consumida por los incendios forestales (Cui et al. 2025).

El objetivo principal de este trabajo es estimar la biomasa consumida, aérea y foliar, en un incendio forestal y derivar valores de EQ a partir de datos LiDAR aeroportados y GEDI.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La zona de estudio corresponde al incendio forestal de Pinofranqueado, en Cáceres (Fig. 1), el cual se inició el 17 de mayo de 2023 y se extendió rápidamente a las comarcas de Las Hurdes y Sierra de Gata, afectando a un total de 10.863,79 hectáreas, de las cuales 8.265,75 ha eran bosques de pino marítimo (*Pinus pinaster*) (MITECO 2021). La zona afectada también se solapa con áreas de la red Natura 2000, incluida la Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) de Sierra de Gata y Valle de las Pilas (EEA, 2023).

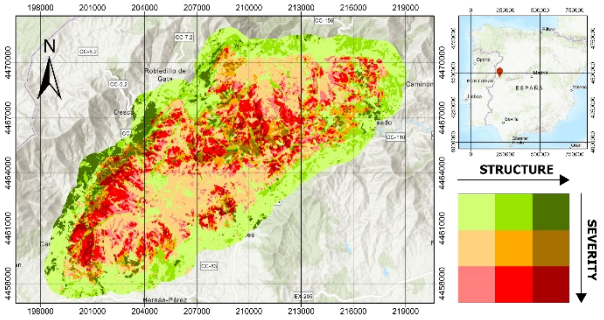


Figura 1. Mapa de la zona de estudio mostrando el área afectada y un buffer exterior de 1 km

2.1.1. Datos

La selección del área de estudio vino motivada por la disponibilidad de datos LiDAR-PNOA aeroportados pre-incendio, tomados entre 10/2018 y 03/2019 con una densidad media de puntos para la zona de estudio de 5,9 p/m^2; y post-incendio, tomados entre 06/2023 y 09/2023 con una densidad media de puntos de 6,2 p/m^2.

En el caso de los datos GEDI, se seleccionaron las huellas utilizando una ventana temporal de ±3 meses desde la fecha del incendio para evitar ruido generado por cambios en la estructura producido por la gestión post-incendio y no por el propio incendio.

Adicionalmente, se realizó una campaña de campo entre el 9 y el 13 de septiembre de 2024 en la que se midieron 17 parcelas (r=17 m). Se tomaron medidas dasométricas (diámetro a la altura del pecho —DAP — de todos los árboles con DAP > 7,5 cm y altura de 20 individuos por parcela), y se identificaron las especies. Las parcelas se escanearon con LiDAR terrestre (TLS) desde cinco estaciones para reducir los efectos de oclusión. Además, se realizó una estimación visual de la biomasa consumida por el incendio para distintas fracciones de biomasa (Davies et al. 2016).

2.2. Estimación de biomasa a partir de datos LiDAR terrestre

Las medidas TLS fueron empleadas para obtener valores de biomasa de referencia para posteriormente calibrar los modelos basados en LiDAR aeroportado. Para ello, primero se segmentaron los árboles individuales, se obtuvo el DAP y se aplicaron las ecuaciones alométricas correspondientes para las especies presentes en las parcelas. En el caso de la situación post-incendio, los valores de AGB de cada parcela se obtuvieron restando a los valores de AGB pre-incendio el porcentaje de biomasa consumido correspondiente a cada fracción de biomasa, de acuerdo con las estimaciones visuales realizadas en campo.

2.3. Estimación de biomasa consumida y EQ con datos LiDAR aeroportado

La estimación de la biomasa aérea consumida y EQ con datos LiDAR aeroportados se basó en la diferencia entre la biomasa aérea estimada antes y después del evento. Para ello fue necesario calibrar un modelo empírico para cada una de las situaciones consideradas. Se utilizó un modelo semi-mecanicista (eq. 2) propuesto por Zhao et al. (2018):

$$AGB = \int k(h) \cdot p(h) dh = \Delta h \cdot \sum k_i p_i \qquad (2)$$

Donde *k(h)* es una función no decreciente de la altura, y *p(h)* es el perfil de altura de la vegetación.

Para la calibración de los modelos se emplearon 14 parcelas de las 17 disponibles, debido a errores en los datos LiDAR en 3 de las parcelas. Debido al bajo número de parcelas disponibles, los modelos utilizados se validaron mediante una validación cruzada *leave-one-out* (LOOCV).

La AGB consumida se calculó mediante la diferencia entre ambas coberturas, mientras que el EQ se obtuvo como la diferencia relativa con respecto a los valores de biomasa pre-incendio. La estimación de AGB consumida se convirtió a valores de CO_2 equivalente convirtiendo los valores de AGB a carbono mediante un factor de conversión de 0,5, y multiplicando el resultado por 3.67 para obtener el CO_2 equivalente.

2.4. Estimación de biomasa consumida y EQ con datos GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2

En el caso de los datos GEDI, el error en la localización de las huellas superior a 10 m dificulta su relación con las parcelas medidas en campo, tanto para calibrar modelos específicos para el área de estudio como para validar el producto global L4A. Por tanto, se consideró el

combustible de copa disponible, el cual representa la fracción de biomasa que arde en un incendio activo, determinado por la BF (García et al. 2012). Esta fracción de biomasa puede obtenerse a partir de los datos GEDI como el cociente entre el índice de área foliar (LAI) y el área foliar específica (SLA) sin necesidad de calibrar modelos empíricos (ecuación 3). El producto GEDI-L2B ofrece una estimación de LAI, o más concretamente el índice de área de planta (PAI) al no discriminar hojas de ramas, basado en la ley de Beer-Lambert que relaciona la energía transmitida con el índice de área foliar y un coeficiente de extinción. La ventaja de este enfoque físico es que no requiere ajustar modelos empíricos, por lo que tiene mayor capacidad de generalización.

Debido a las características de muestreo del sensor GEDI, para obtener información espacialmente explícita de PAI, se entrenó una red neuronal convolucional (CNN), con una estructura U-Net, utilizando datos Sentinel-1 y Sentinel-2 como variables predictoras. En este caso se entrenó un único modelo incluyendo los datos pre- y post-incendio. La arquitectura de la red CNN empleada consistió en cinco bloques de kernels convolucionales 3x3, seguidos de una capa maxpooling de tamaño 2. Se utilizó una función de activación ReLU para las capas funcionales y una función de activación lineal en la capa de salida.

Una vez obtenido el PAI, se calculó la biomasa foliar como (Eq. 3):

$$BF = PAI/SLA \quad (3)$$

Los valores de SLA se obtuvieron a partir del Global Leat Trait (Moreno-Martínez et al. 2018) disponible en Google Earth Engine.

Una vez obtenida la BF pre- y post-incendio, con una resolución espacial de 25 m, se calculó el consumo de biomasa y EQ de la misma manera que para los datos LiDAR aeroportados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estimación de AGB con TLS, a nivel de árbol individual, ofreció unos buenos resultados (tabla 1) con valores de R2 superiores a 0,85 y rRMSE menores al 25%. En el caso de los resultados post-incendio, la severidad afectó a los resultados obtenidos, siendo ligeramente peores para niveles de severidad alto.

Tabla 1. Resultados obtenidos para los modelos de estimación de AGB a partir de los datos LiDAR terrestre.

Model	R^2	rRMSE (%)
Pre-fire	0,92	23
Post-fire	0,87-0,93	18-22

Los modelos obtenidos para estimar la AGB pre- y post-incendio ofrecieron unos resultados robustos (tabla 1), ligeramente superiores en el caso pre-incendio.

Tabla 2. Resultados obtenidos para los modelos de estimación de AGB a partir de los datos LiDAR aeroportados.

Model	R^2	RMSE (Mg ha^{-1})	rRMSE (%)
Pre-fire	0,80	7,86	12,89
Post-fire	0,71	9,72	16,47

La estimación de AGB consumida por el incendio fue de 138 Gg, lo que equivale a unas emisiones de CO_2 equivalente de 506 Gg, y unos valores de EQ de 0,38. La figura 2A muestra la distribución de los valores de EQ en la zona afectada por el incendio obtenidos a partir de LiDAR aeroportado.

En el caso de las estimaciones basadas en datos GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2, el modelo para estimar PAI ofreció un rendimiento moderado (R^2=0.4 y MAE=14.3 m^2/m^2).

La estimación de biomasa consumida por el incendio fue de 14 Gg, lo que equivale a unas emisiones de $C0_2$ equivalente de 51,3 Gg, y unos valores de EQ de 0,32. La figura 2B muestra la distribución de los valores de EQ obtenidos a partir de GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2.

Los valores de emisiones obtenidos varían en un orden de magnitud en función de la fracción de biomasa considerada. Aplicando ecuaciones alométricas, se observó que la biomasa foliar representa aproximadamente el 10% de la biomasa total aérea. A pesar de la gran diferencia en las emisiones obtenidas en función de la fracción de biomasa considerada, los valores de EQ obtenidos con ambos enfoques, así como los patrones espaciales, fueron similares (figura 2).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la capacidad de los datos LiDAR aeroportados y de los datos GEDI integrados con datos Sentinel-1 y Sentinel-2 para estimar la biomasa consumida y los valores de EQ. Ambos enfoques mostraron patrones espaciales similares y valores de EQ parecidos. Sin embargo, los valores de emisiones de C obtenidos difirieron en un orden de magnitud como consecuencia de las distintas fracciones de biomasa consideradas. Por tanto, a la hora de cuantificar las emisiones producidas por los incendios es importante tener la en cuenta la fracción de biomasa a considerar. La extensión de este trabajo a otras zonas de estudio permitiría establecer valores de EQ por tipo de vegetación y mejorar las estimaciones de las emisiones producidas por incendios a partir del área quemada y la fracción de biomasa pre-incendio.

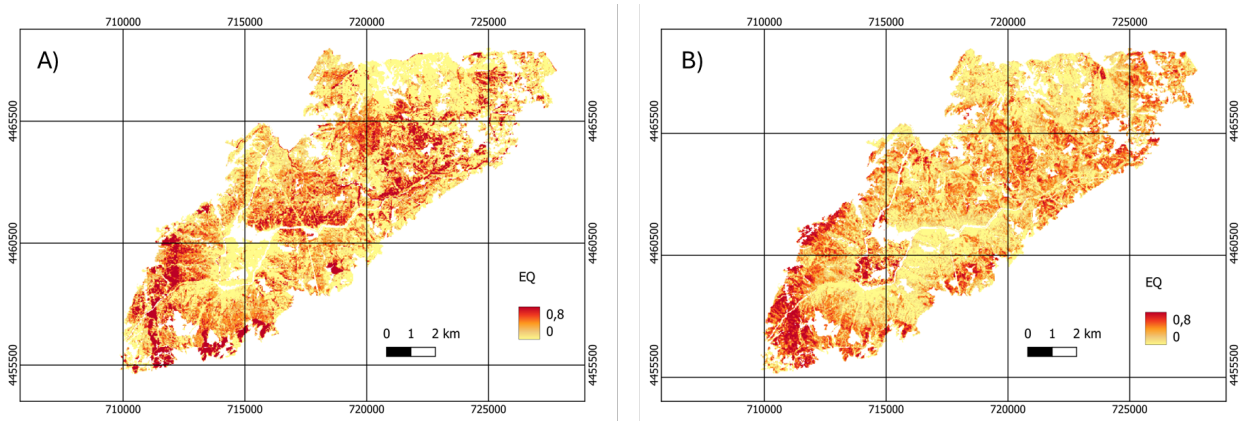


Figura 2: Distribución espacial de los valores de EQ obtenidos a partir de datos LiDAR aeroportado (A) y datos GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2 (B).

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado como parte del proyecto FireCCI+ de la Agencia Espacial Europea (Nº 4000126706/19/I-NB).

6. REFERENCIAS

Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). (2023). Natura 2000 dataset: Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA).

Cui, L., Xu, X., & Chen, S. (2025). Estimating biomass consumption and carbon emissions by integrating GEDI, Sentinel-1, and Sentinel-2 data. Ecological Indicators, 178, 113889

Davies, G.M., Domènech, R., Gray, A., & Johnson, P.C.D. (2016). Vegetation structure and fire weather influence variation in burn severity and fuel consumption during peatland wildfires. Biogeosciences, 13, 389-398

García, M., Popescu, S., Riaño, D., Zhao, K., Neuenschwander, A., Agca, M., & Chuvieco, E. (2012). Characterization of canopy fuels using ICESat/GLAS data. Remote Sensing of Environment, 123, 81-89

García, M., Saatchi, S., Casas, A., Koltunov, A., Ustin, S., Ramirez, C., Garcia-Gutierrez, J., & Balzter, H. (2017). Quantifying biomass consumption and carbon release from the California Rim fire by integrating airborne LiDAR and Landsat OLI data. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 122, 340-353

McCarley, T.R., Hudak, A.T., Bright, B.C., Cronan, J., Eagle, P., Ottmar, R.D., & Watts, A.C. (2024). Generating fuel consumption maps on prescribed fire experiments from airborne laser scanning. International Journal of Wildland Fire, 33

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2024). Mapa Forestal de España 1:25.000 (MFE25). Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación.

Moreno-Martínez, Á., Camps-Valls, G., Kattge, J., Robinson, N., Reichstein, M., van Bodegom, P., Kramer, K., Cornelissen, J.H.C., Reich, P., Bahn, M., Niinemets, Ü., Peñuelas, J., Craine, J.M., Cerabolini, B.E.L., Minden, V., Laughlin, D.C., Sack, L., Allred, B., Baraloto, C., Byun, C., Soudzilovskaia, N.A., & Running, S.W. (2018). A methodology to derive global maps of leaf traits using remote sensing and climate data. Remote Sensing of Environment, 218, 69-88

Seiler, W., & Crutzen, P.J. (1980). Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. Climatic Change, 2, 207-247

van der Werf, G.R., Randerson, J.T., van Wees, D., Chen, Y., Giglio, L., Hall, J., Vernooij, R., Mu, M., Binte Shahid, S., Barsanti, K.C., Yokelson, R., & Morton, D.C. (2025). Landscape fire emissions from the 5th version of the Global Fire Emissions Database (GFED5). Scientific Data, 12, 1870

van Leeuwen, T.T., van der Werf, G.R., Hoffmann, A.A., Detmers, R.G., Rücker, G., French, N.H.F., Archibald, S., Carvalho Jr, J.A., Cook, G.D., de Groot, W.J., Hély, C., Kasischke, E.S., Kloster, S., McCarty, J.L., Pettinari, M.L., Savadogo, P., Alvarado, E.C., Boschetti, L., Manuri, S., Meyer, C.P., Siegert, F., Trollope, L.A., & Trollope, W.S.W. (2014). Biomass burning fuel consumption rates: a field measurement database. Biogeosciences, 11, 7305-7329

Zhao, K., Suarez, J.C., Garcia, M., Hu, T., Wang, C., & Londo, A. (2018). Utility of multitemporal lidar for forest and carbon monitoring: Tree growth, biomass dynamics, and carbon flux. Remote Sensing of Environment, 204, 883-897

Zheng, B., Ciais, P., Chevallier, F., Chuvieco, E., Chen, Y., & Yang, H. (2021). Increasing forest fire emissions despite the decline in global burned area. Science Advances, 7, eabh2646

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.131

Uso de la evapotranspiración derivada de Observación de la Tierra para mejorar la detección temprana de sequías en pastizales semiáridos

Burchard-Levine, Vicente [1] **Ali, Abebe Mohammed** [2] **Nieto, Hector** [3] **Yohannes, Tinebeb** [4] **Weldemariam, Elias Cherenet** [5] **Andreu, Ana** [6] **Martin, M.Pilar** [1] **Sharaf, Nora** [1] **Raya-Sereno, M.Dolores** [1]

[1] Environmental Remote Sensing and Spectroscopy Laboratory (SpecLab), Spanish National Research Council (CSIC), Madrid, Spain

[2] Department of Geography and Environmental studies, Wollo University, Dessie, Ethiopia.

[3] Institute of Agricultural Sciences (ICA), Spanish National Research Council (CSIC), Madrid, Spain

[4] World Resources Institute (WRI)-Africa, Addis Ababa, Ethiopia

[5] Haramaya University, Department of GIS, Haramaya, Ethiopia

[6] Fluvial Dynamics and Hydrology Research Group, Andalusian Institute for Earth System Research, University of Córdoba, Córdoba, Spain

ORCID: Burchard-Levine 0000-0003-0222-8706 Ali 0000-0002-3962-0333 Nieto 0000-0003-4250-6424 Yohannes 0009-0007-8585-4601 Weldemariam 0000-0001-5335-2120 Andreu 0000-0001-8346-5417 Martin 0000-0002-5563-8461 Raya-Sereno 0000-0003-2249-4737

Correspondencia: vicente.burchard@csic.es abemohe@gmail.com hector.nieto@ica.csic.es tinbeb@gmail.com eliachent@gmail.com z92anmea@uco.es mpilar.martin@csic.es norichi2002@gmail.com mdolores.raya@cchs.csic.es

RESUMEN

La sequía es un fenómeno recurrente en los pastizales de Borena, Etiopía, con impactos severos sobre la producción ganadera y las comunidades agro-pastoriles. Los datos de Observación de la Tierra (EO) ofrecen un gran potencial para mejorar la detección de sequías mediante información espacio-temporal oportuna; sin embargo, muchos indicadores tradicionales se centran únicamente en la sequía meteorológica o no son adecuados para ecosistemas semiáridos. La evapotranspiración real (ET) es un indicador clave, ya que integra condiciones atmosféricas (i.e. sequía meteorológica), disponibilidad de agua (i.e. sequía hidrológica) y el estado fisiológico de la vegetación (i.e. sequía agrícola/ecológica). Este estudio evalúa estimaciones de ET obtenidas con el modelo de balance de energía de tres fuentes (3SEB), forzado con datos globales de Copernicus (Sentinel-3 y ERA5), para caracterizar la respuesta de la vegetación a la sequía en ecosistemas semiáridos. El modelo se validó en tres sitios de eddy-covariance (EC), dos dehesas en España y una sábana en Sudáfrica que presentan condiciones similares a las que encontramos en Etiopía. Además, se generaron mapas de ET para Borena (2019–2022) y se compararon con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), comúnmente usado en indicadores de sequía para caracterizar la respuesta de la vegetación. Los resultados preliminares muestran buena concordancia con las mediciones EC (RMSE ~1 mm/día) y una respuesta más rápida de la ET frente al NDVI, lo que resalta su potencial para la detección temprana del estrés hídrico. El trabajo futuro se centrará en comparar indicadores basados en ET con índices tradicionales de sequía mediante un análisis espacio-temporal, así como con mediciones de servicios ecosistémicos.

Palabras clave: *Evapotranspiración, Copernicus, Sequías, Pastizales, Infrarrojo térmico*

Fecha de recepción: 6 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 6 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Uso de la evapotranspiración derivada de Observación de la Tierra para mejorar la detección temprana de sequías en pastizales semiáridos

Burchard-Levine, Vicente [1], Ali, Abebe Mohammed [2], Nieto, Hector [3], Yohannes, Tinebeb [4], Weldemariam, Elias Cherenet [5], Andreu, Ana [6], Martin, M.Pilar [1], Sharaf, Nora [1], Raya-Sereno, M.Dolores [1]

[1] Environmental Remote Sensing and Spectroscopy Laboratory (SpecLab), Spanish National Research Council (CSIC), España.

0000-0003-0222-8706, vicente.burchard@csic.es; 0000-0002-5563-8461, mpilar.martin@csic.es norichi2002@gmail.com; 0000-0003-2249-4737, mdolores.raya@cchs.csic.es

[2] Department of Geography and Environmental studies, Wollo University, Ethiopia.

0000-0002-3962-0333, abemohe@gmail.com

[3] Institute of Agricultural Sciences (ICA), Spanish National Research Council (CSIC), España.

0000-0003-4250-6424, hector.nieto@ica.csic.es

[4] World Resources Institute (WRI)-Africa, Ethiopia.

0009-0007-8585-4601, tinbeb@gmail.com

[5] Haramaya University, Department of GIS, Haramaya, Ethiopia.

0000-0001-5335-2120, eliachent@gmail.com

[6] Fluvial Dynamics and Hydrology Research Group, Andalusian Institute for Earth System Research, University of Córdoba, España.

0000-0001-8346-5417, z92anmea@uco.es

Resumen: La sequía es un fenómeno recurrente en los pastizales de Borena, Etiopía, con impactos severos sobre la producción ganadera y las comunidades agro-pastoriles. Los datos de Observación de la Tierra (EO) ofrecen un gran potencial para mejorar la detección de sequías mediante información espacio-temporal oportuna; sin embargo, muchos indicadores tradicionales se centran únicamente en la sequía meteorológica o no son adecuados para ecosistemas semiáridos. La evapotranspiración real (ET) es un indicador clave, ya que integra condiciones atmosféricas (i.e. sequía meteorológica), disponibilidad de agua (i.e. sequía hidrológica) y el estado fisiológico de la vegetación (i.e. sequía agrícola/ecológica). Este estudio evalúa estimaciones de ET obtenidas con el modelo de balance de energía de tres fuentes (3SEB), forzado con datos globales de Copernicus (Sentinel-3 y ERA5), para caracterizar la respuesta de la vegetación a la sequía en ecosistemas semiáridos. El modelo se validó en tres sitios de *eddy-covariance* (EC), dos dehesas en España y una sábana en Sudáfrica que presentan condiciones similares (i.e., clima, estructura, fenología) a las que encontramos en Borena. Además, se generaron mapas de ET para Borena (2019–2022) y se compararon con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), comúnmente usado en indicadores de sequía para caracterizar la respuesta de la vegetación. Los resultados de ET preliminares muestran buena concordancia con las mediciones EC (RMSE ~1 mm/día) y una respuesta más rápida frente al NDVI, lo que resalta su potencial para la detección temprana del estrés hídrico. El trabajo futuro se centrará en comparar indicadores basados en ET con índices tradicionales de sequía mediante un análisis espacio-temporal, así como con mediciones de servicios ecosistémicos.

Palabras clave: Evapotranspiración, Copernicus, Sequías, Pastizales, Infrarrojo térmico

Earth Observation-based evapotranspiration to improve the early detection of agricultural droughts in semi-arid rangeland ecosystems

***Abstract**: Drought is a recurring phenomenon in the Borena rangelands in Ethiopia, having endured severe drought events in recent years, acutely impacting livestock production and the livelihoods of its agro-pastoralist communities. Earth Observation (EO) data has a large potential to improve drought detection, allowing to support rapid decision-making with timely spatio-*

temporal information. However, many traditional EO-based indicators are either focused purely on meteorological drought or are poorly suited for semi-arid rangelands. Actual evapotranspiration (ET) is a key indicator for droughts since it integrates factors related to atmospheric conditions, water availability and plant physiological status. This work aims to evaluate ET estimates from the three-source energy balance (3SEB) model, forced with global Copernicus-based inputs (i.e., Sentinel-3 and ERA5), to better quantify vegetation's response to drought. The approach was evaluated over three eddy-covariance (EC) sites located in savanna-like regions in Spain and South Africa, representing similar conditions to Borena. ET maps were then generated over the entire Borena region (2019-2022), and a monthly time series was compared to the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), typically used within drought indicators to quantify vegetation's response to water deficit. Preliminary results show that 3SEB estimates were well within range of EC measurements across the three sites (ET RMSE ~ 1mm/day). Monthly ET estimates also showed a faster response than NDVI, indicating the potential to detect water stress in vegetation more rapidly than conventional spectral indices. Future work will focus on comparing ET-based indicators with traditional drought indices through spatio-temporal analysis, as well as with measures of ecosystem services.

***Keywords**: Evapotranspiration, Copernicus, Droughts, Rangelands, Thermal Infrared*

1. INTRODUCTION

Semi-arid ecosystems play a pivotal role in regulating global water, carbon, and energy cycles (Ahlström et al., 2015). However, these ecosystems are highly vulnerable to droughts, severely affecting their functioning and their provision of ecosystem services, such as livestock production. Traditional drought indicators commonly rely on meteorological data, such as the Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010) but these do not directly account for changes in the physiological state of vegetation and fail to quantify the different dimensions of droughts (i.e. agro-ecological droughts) and their impacts on ecosystem services (Han et al. 2025)

In recent years, EO has emerged as a valuable tool to improve drought monitoring, providing timely, spatially explicit information. In this context, the development of composite drought indices (CDI) (Cammalleri et al., 2021) integrating multiple EO-based datasets has gained traction, comprehensively assessing the various dimensions of drought within a single indicator.

Most CDIs depict vegetation response to drought through spectral indices, such as NDVI. However, these indices may not adequately characterize vegetation's response in semi-arid ecosystems due to their high spatial heterogeneity, sparse vegetation cover, and strong influence of non-photosynthetic vegetation. In this regard, EO-based ET estimates, based on thermal infrared imagery, have the potential to better capture the physiological response of vegetation through its link with stomatal conductance and root-zone water availability (Joiner et al., 2018).

The main objective of this work, which presents ongoing activities related to the ESA-funded SEMHy-ARID project, is to evaluate ET estimates from the three-source energy balance (3SEB) model forced with global Copernicus-based inputs to better capture the various dimensions of droughts in semi-arid rangelands, with special attention to the Borena region in Southern Ethiopia.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Study sites

The Borena rangelands, found in the southern Ethiopia within the Oromia Regional State (Fig. 1), are dominated by traditional pastoral land use. The climate is classified as hot semi-arid (Köppen classification: BSh) with mean annual rainfall ranging from 300 to 700 mm and a bimodal precipitation pattern comprising two rainy seasons: the main (March–May) and secondary (September–November) rainy seasons.

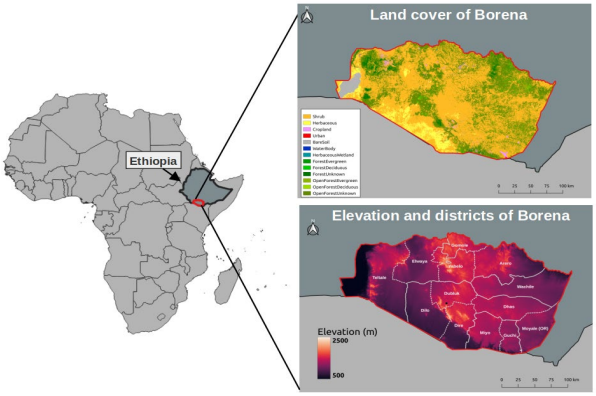


Figure 1. Land cover classification and topographic map of the Borena region from Copernicus CGLOPS-1 land cover data and digital elevation model (DEM) from USGS's Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

Furthermore, three eddy-covariance (EC) flux sites across Spain and South Africa were used to evaluate EO-based ET products over semi-arid rangeland ecosystems comparable to the Borena region. Flux data from 2019-2023 were acquired over two EC sites in Spain (FLUXNET codes ES-LMa and ES-Abr) located in savanna-like ecosystems, composed of dispersed trees (roughly 20% cover) over a heterogeneous herbaceous understory. EC data were also collected in the Skukuza EC tower located in the Kruger National Park (FLUXNET code ZA-Kru) between 2019 and 2023 (with significant

data gaps). This site represents a typical African savanna with about 30% tree cover.

2.2. Three-source energy balance model

ET was estimated using 3SEB model (Burchard-Levine et al., 2022) as it is especially suited for savanna ecosystems. It is based on the widely used two-source energy balance (TSEB, Norman et al., 1995) but adds a vegetation source to its modelling framework. Surface energy balance models estimate ET as the residual of the surface energy balance, where latent heat flux (LE) is retrieved as the residual of net radiation (Rn), sensible heat flux (H) and soil heat flux (G), assuming negligible contributions from advection, canopy heat storage and other minor energy terms. Indeed, 3SEB decomposes the surface energy balance into three sources: overstory vegetation (i.e. trees), understory vegetation (i.e. grass) and soil. This better represents savanna ecosystems by directly accounting for the phenological and structural differences of the two vegetation strata (i.e. trees vs grasses). The main inputs to 3SEB are the radiometric land surface temperature (LST), the primary boundary condition for H; leaf area index (LAI), used to estimate radiation transmission through canopies; and weather forcing, such as air temperature, wind speed, and irradiance. For more details, refer to Burchard-Levine et al. (2022).

2.3. EO datasets and processing

Sentinel-3 (S3) data were acquired from the Copernicus Data Space Ecosystem for both the SLSTR Level-2 LST product (1 km) and the Level-2 SYN product (300 m) between 2019 and 2023. The S3-SYN product combines shortwave optical bands from the OLCI and SLSTR instruments onboard the S3 platform. The surface reflectance, together with observation and illumination conditions, were then used to estimate vegetation biophysical traits (e.g., LAI and pigments) by inverting the radiative transfer models PROSPECT-D and 4SAIL (Nieto, 2026) through a global hybrid approach described in Guzinski et al. (2025). LST was acquired from the Level-2 S3-SLSTR LST product and was then sharpened to 300 m spatial resolution using S3-SYN bands and a data mining approach, similar to the method developed for the Copernicus Land Monitoring Service Evapotranspiration product (Guzinski et al. 2025). Meteorological scalars were processed from ERA-5 using meteo_utils (Nieto et al., 2026).

2.4. 3SEB model evaluation

The 3SEB model was evaluated against EC-based H and LE over three sites (section 2.1). Due to the well-known energy balance closure issue, fluxes were corrected by the mean of three common methods: allocating all residuals to LE, allocating all residuals to H and maintaining the Bowen ratio.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. 3SEB evaluation

The Copernicus-based 3SEB model performed similarly across the three EC sites, with the RMSE of LE and H ranging between 79-90 W/m^2 and 65-97 W/m^2, respectively (Fig. 2). The LE in both ES-LMa and ES-Abr were slightly underestimated (bias: ~-40 W/m^2) as compared to H (bias: ~15 W/m^2), which was affected by a slight underestimation of Rn (data not shown). Instantaneous modelled LE were extrapolated to daily ET based on the incoming shortwave irradiance ratio approach (Guzinski et al. 2025), resulting in RMSE of roughly 1 mm/day across all sites (data not shown).

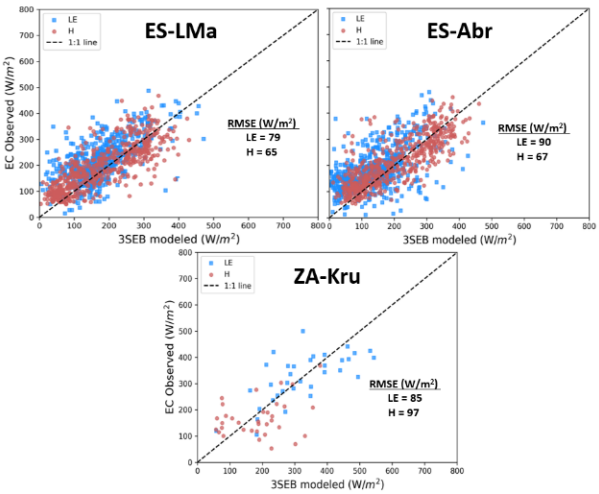


Figure 2. Scatter plots of modelled latent heat (LE, blue), and sensible heat (H, red) fluxes using 3SEB against eddy-covariance (EC) measurements in Majadas de Tiétar (ES-LMa), Albuera (ES-Abr) and Skukuza (ZA-Kru).

3.2. ET in Borena region

Figure 3 illustrates annual ET maps of the Borena region from 2019 to 2022. There is large spatial variability within the region, especially affected by its topography, where more elevated areas tended have less inter-annual variability and be less affected by the drought years (2019, 2021 and 2022) compared to lowlands, which were mostly dominated by savannas and grasslands.

These drought episodes are further illustrated in Fig. 4, which presents a time series of modelled monthly mean transpiration (T) and NDVI for grasslands in the region. As shown, the T and NDVI time series exhibit similar trends, indicating the effects of rainfall deficits in nearly all rainy seasons during this period, except for late (Oct-Dec) 2019, 2020, and, to a lesser degree, spring (March-May) 2021. Although faint, the T signal seems to be more sensitive to water availability than NDVI, with a quicker increase and decrease during local peaks affected by rainfall events. These effects would likely be even more visible at shorter time steps (i.e. dekadal) compared to the monthly time step assessed here. Joiner et al. (2018) also demonstrated that ET generally had a quicker response to water deficits as compared to NDVI and other spectral indices. Indeed, ET is more closely linked to soil moisture depletion and vegetation physiological responses (i.e., reduced transpiration) than greenness indices, which could provide a more rapid early-warning detection of droughts. Further work will focus on conducting a spatiotemporal analysis comparing ET-based indices with conventional drought indices (e.g., SPEI or CDI) and evaluating them against ecosystem

service indicators, such as grassland production and food security.

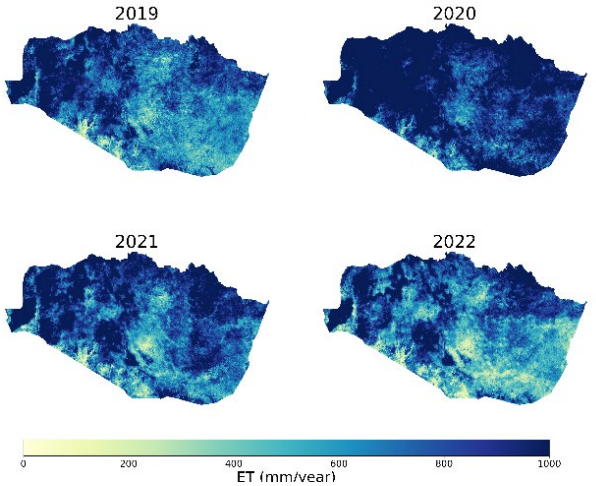


Figure 3. Annual ET maps using Copernicus-based 3SEB of Borena region for 2019-2022

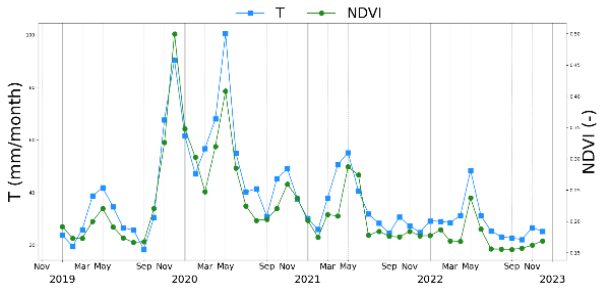


Figure 4. Monthly time series of 3SEB transpiration (T) (blue) and NDVI (green)

4. AGRADECIMIENTOS

This work was supported by the ESA EO Africa R&D Facility in the context of the bilateral SEMHy-ARID research project (ESA Contract No. 4000133905/21/I-EF).

5. REFERENCES

Ahlström, A., Raupach, M. R., Schurgers, G., Smith, B., Arneth, A., Jung, M., Reichstein, M., Canadell, J. G., Friedlingstein, P., & Jain, A. K. (2015). The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO2 sink. *Science*, *348*, 895–899.

Burchard-Levine, V., Nieto, H., Riaño, D., Kustas, W. P., Migliavacca, M., El-Madany, T. S., Nelson, J. A., Andreu, A., Carrara, A., Beringer, J., Baldocchi, D., & Martín, M. P. (2022). A remote sensing-based three-source energy balance model to improve global estimations of evapotranspiration in semi-arid tree-grass ecosystems. *Global Change Biology*, *28*(4), 1493–1515. https://doi.org/10.1111/gcb.16002

Cammalleri, C., Arias-Muñoz, C., Barbosa, P., de Jager, A., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., McCormick, N., Naumann, G., Spinoni, J., & Vogt, J. (2021). A revision of the Combined Drought Indicator (CDI) used in the European Drought Observatory (EDO). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *21*(2), 481–495. https://doi.org/10.5194/nhess-21-481-2021

Han, Y., Qu, Y., Jiang, T., Zhang, X., Lyu, J., & Su, X. (2025). Ecosystems resilience assessment of forest and grassland subjected to ecological drought. *Ecological Indicators, 173*, 113437. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113437

Guzinski, R., Nieto, H., Barrios, J. M., Ghariani, W., Gellens-Meulenberghs, F., De Pue, J., & Lacaze, R. (2025). Towards a global actual evapotranspiration product for the Copernicus Land Monitoring Service. *EGUsphere*, 1–63. https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-4342

Joiner, J., Yoshida, Y., Anderson, M., Holmes, T., Hain, C., Reichle, R., Koster, R., Middleton, E., & Zeng, F.-W. (2018). Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales. *Remote Sensing of Environment*, *219*, 339–352. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.020

Nieto, H. (2026). *pyPro4SAIL: Vectorized vesions of the Prospect5 and 4SAIL Radiative Transfer Models for simulating the transmission of radiation in leaves and canopies.* [Computer software]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.18334965

Nieto, H., Guzinski, R., & Lund Larsen, M. (2026). *meteo_utils: Python module for processing gridded GRIB meteorological data* [Computer software]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.18399398

Norman, J. M., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, *77*, 263–293.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, *23*(7), 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.143

Dinámica de la vegetación en la región de Pirizal (Pantanal-MT, Brasil) mediante análisis temporal con datos PlanetScope

Santana de Almeida, Vaniele [1] **Pereira Rezende, Segundo Durval** [1] **Manzon Nunes, Gustavo** [1]

[1] Federal University of Mato Grosso (UFMT), Brasil

ORCID: Santana de Almeida 0009-0004-7742-4044 Pereira Rezende 0009-0008-9662-397X Manzon Nunes 0000-0002-5124-5898

Correspondencia: vanielea5@gmail.com floresteiroaventureiro@gmail.com gustavo.nunes@ufmt.br

RESUMEN

Los humedales del Pantanal se distinguen por su dinámica ecológica, impulsada por variaciones estacio-nales y regímenes de inundación-sequía. Ubicada en la planicie de inundación del Pantanal Norte - Brasil e influida por el bioma Cerrado, la región de Pirizal presenta vegetación adaptada tanto al fuego como a las inundaciones, y es frecuentemente impactada por eventos extremos como incendios forestales. Este estudio tuvo como objetivo analizar la variación de macrohábitats (fitofisionomías) en la región utilizando imágenes multiespectrales adquiridas del satélites Planetscope (SuperDove) para los años 2020 (tempo-radas húmeda y seca) y 2024 (post-incendio). Los resultados indicaron que, en marzo de 2020, las clases mapeadas predominantes fueron Campos de Murunduns, Cambarazal y Campo de Mimoso. Para octubre del mismo año, se evidenciaron efectos de incendios forestales, con una reducción significativa en los Campos de Murunduns y la emergencia de áreas quemadas. Entre 2020 y 2024, se registró una reducción de aproximadamente el 31.41% en el área de Campo de Murunduns, mientras que los Campos de Mimoso casi duplicaron su extensión (+93.47%). El Pimental mostró un incremento del 28.29%, el Cambarazal del 7.07%, y el Cerrado Stricto sensu también registró un crecimiento del 12.64%, destacando la resiliencia diferenciada de las fitofisionomías ante los impactos del fuego. Se concluye que, a pesar de los impactos causados por los incendios de 2020, la vegetación de Pirizal demuestra resiliencia y capacidad de regene-ración. El uso del Sensoriamento Remoto se ha demostrado como una herramienta efectiva para monitore-ar estas dinámicas y contribuir a la conservación en la región.

Palabras clave: *Humedales, mapeo, incendios forestales, teledetección, macrohábitats*

Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 9 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Dinámica de la vegetación en la región de Pirizal (Pantanal-MT, Brasil) mediante análisis temporal con datos PlanetScope

Santana de Almeida, Vaniele [(1)], Pereira Rezende, Segundo Durval [(1)], Manzon Nunes, Gustavo [(1)]

[(1)] Federal University of Mato Grosso (UFMT), Brasil,

0009-0004-7742-4044, vanielea5@gmail.com

0009-0008-9662-397X, floresteiroaventureiro@gmail.com

0000-0002-5124-5898, gustavo.nunes@ufmt.br

Resumen: Los humedales del Pantanal se distinguen por su dinámica ecológica, impulsada por variaciones estacionales y regímenes de inundación-sequía. Ubicada en la planicie de inundación del Pantanal Norte - Brasil e influida por el bioma Cerrado, la región de Pirizal presenta vegetación adaptada tanto al fuego como a las inundaciones, y es frecuentemente impactada por eventos extremos como incendios forestales. Este estudio tuvo como objetivo analizar la variación de macrohábitats (fitofisionomías) en la región utilizando imágenes multiespectrales adquiridas del satélite Planetscope (SuperDove) para los años 2020 (temporadas húmeda y seca) y 2024 (post-incendio). Los resultados indicaron que, en marzo de 2020, las clases cartografiadas predominantes fueron Campos de Murunduns, Cambarazal y Campo de Mimoso. Para octubre del mismo año, se evidenciaron efectos de incendios forestales, con una reducción significativa en los Campos de Murunduns y la emergencia de áreas quemadas. Entre 2020 y 2024, se registró una reducción de aproximadamente el 31.41% en el área de Campo de Murunduns, mientras que los Campos de Mimoso casi duplicaron su extensión (+93.47%). El Pimental mostró un incremento del 28.29%, el Cambarazal del 7.07%, y el Cerrado Stricto sensu también registró un crecimiento del 12.64%, destacando la resiliencia diferenciada de las fitofisionomías ante los impactos del fuego. Se concluye que, a pesar de los impactos causados por los incendios de 2020, la vegetación de Pirizal demuestra resiliencia y capacidad de regeneración. El uso del Teledetección se ha demostrado como una herramienta efectiva para monitorear estas dinámicas y contribuir a la conservación en la región.

Palabras clave: Humedales, mapeo, incendios forestales, teledetección, macrohábitats.

Vegetation Dynamics in the Pirizal Region (Pantanal-MT, Brazil) Through Temporal Analysis Using PlanetScope Data

***Abstract**: The Pantanal wetlands are distinguished by their ecological dynamics, driven by seasonal variations and flood-drought regimes. Located within the floodplain of the Northern Pantanal-Brazil and influenced by the Cerrado biome, the Pirizal region features vegetation adapted to both fire and flooding, and is frequently impacted by extreme events such as wildfires. This study aimed to analyze the variation in macrohabitats (phytophysiognomies) in the region using multispectral imagery acquired from the PlanetScope (SuperDove) satellite for the years 2020 (wet and dry seasons) and 2024 (post-fire). The results indicated that, in March 2020, the predominant mapped classes were Campos de Murunduns, Cambarazal, and Campo de Mimoso. By October of the same year, wildfire effects were evident, with a significant reduction in Campos de Murunduns and the emergence of burned areas. Between 2020 and 2024, there was a reduction of approximately 31.41% in the Campo de Murunduns area, while the Campos de Mimoso almost doubled in size (+93.47%). Pimental showed an increase of 28.29%, Cambarazal 7.07%, and Cerrado Stricto sensu also registered a growth of 12.64%, highlighting the differentiated resilience of phytophysiognomies to the impacts of fire. It is concluded that, despite the impacts caused by the 2020 fires, the Pirizal vegetation demonstrates resilience and capacity for regeneration. The use of Remote Sensing has proven to be an effective tool for monitoring these dynamics and contributing to conservation in the region.*

***Keywords**: Wetlands, Mapping, Wildfires, Remote Sensing, Macrohabitats.*

1. INTRODUCCIÓN

Los humedales representan zonas de transición entre ecosistemas acuáticos y terrestres, exhibiendo características biológicas, químicas y físicas típicas de ambos. El bioma Pantanal, reconocido como una de las mayores planicies de inundación del mundo, ocupa aproximadamente el 1,76% del territorio brasileño y se clasifica como un "sistema de humedal continental" (Junk & Nunes da Cunha, 2024).

El clima y la biodiversidad del Pantanal están fuertemente influenciados por biomas adyacentes, particularmente el Cerrado, que está bien adaptado al fuego. La frecuencia e intensidad de los incendios forestales en el Pantanal están directamente relacionadas con su régimen hidrológico, caracterizado por pulsos de inundación estacionales y una alternancia marcada entre períodos húmedos y secos. Se estima que alrededor del 98% de los focos ígneos en la región tienen orígenes criminales o accidentales (Silva, 2022). En 2020, el Pantanal registró 22116 focos de incendio, con la mayor concentración en septiembre, durante el pico de la estación seca. Este escenario fue exacerbado por factores como altas temperaturas, deforestación y cambios en el uso del suelo, resultando en pérdidas ambientales irreversibles.

Aunque la teledetección se aplica ampliamente en estudios sobre los impactos de incendios, la originalidad de este trabajo radica en su análisis de la región de Pirizal, un área de transición directamente influida por el Cerrado y el Pantanal Norte - Mato Grosso, Brasil. Esta región experimenta regímenes combinados de inundación y fuego, generando dinámicas ecológicas únicas. En este contexto, la imágenes satelitales han demostrado ser efectivas para clasificar fitofisionomías del bioma (Haddad *et al*., 2023). El área de estudio comprende la cuadrícula Pirizal, una región de interés científico debido a sus dinámicas ecológicas y estaciones seca y húmeda bien definidas, que afectan directamente la cobertura vegetal.

Según Costa *et al*. (2010), esta área ha experimentado eventos recurrentes de incendios y deforestación desde 1999. Considerando este contexto, el objetivo del estudio fue identificar y evaluar los macrohábitats y fitofisionomías de la región en tres períodos distintos, con énfasis en el año 2020 y las condiciones post-incendio en 2024, contribuyendo así a una comprensión más profunda de los impactos ambientales, sociales y económicos de eventos extremos de incendios forestales.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en el norte del Pantanal que tiene una superficie total en Brasil y otros países de 150355 km^2 (Figura 1). El análisis se centró en un área que posee 559.21 hectáreas, existente dentro del municipio de Poconé (Mato Grosso-Brasil). Según la clasificación climática de Köppen, la región presenta un clima de sabana tropical (Aw), caracterizado por un invierno seco y un verano húmedo (Silva, 2017).

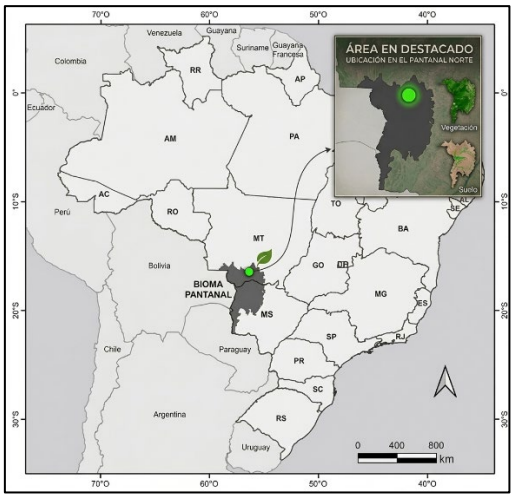


Figura 1. Ubicación de los humedales del Pantanal y del área de estudio.

2.2. Datos

Las imágenes satelitales utilizadas en este estudio fueron proporcionadas por Planet Labs, adquiridas del satélite Planete (SuperDove), que opera con 8 bandas espectrales: Costera, Azul, Verde I, Verde II, Amarillo, Rojo, Red-Edge y NIR, con una resolución espacial de 3 metros. Los datos se obtuvieron para tres fechas específicas: 31 de marzo de 2020; 3 de octubre de 2020; y 29 de noviembre de 2024.

Los períodos seleccionados tuvieron como objetivo evaluar el comportamiento de la vegetación a lo largo de las estaciones húmeda y seca, con especial enfoque en 2020 debido a un evento importante de incendio forestal. La imagen de 2024, adquirida cuatro años después, se utilizó para identificar posibles alteraciones en macrohábitats, permitiendo la detección de cambios ecológicos a lo largo del tiempo.

2.3. Procesamiento de imágenes

Para analizar y caracterizar las clases de macrohábitats existentes en el área de estudio, se consideraron aspectos observados en campañas de campo previas en la región. Para el procesamiento digital de datos se utilizó el software ENVI. Se recolectaron muestras utilizando matrices de 2×2, 3×3, 4×4, 5×5 y 10×10 píxeles, representando cada clase de cobertura presente en el área de estudio. El algoritmo de clasificación aplicado fue Máquina de Vectores de Soporte (SVM, por sus siglas en inglés), que construye un hiperplano que separa máximamente las clases con base en características espectrales. Este método resulta especialmente efectivo en ambientes con alta complejidad ecológica y para distinguir entre diferentes fitofisionomías de vegetación (Lenzi & Nunes, 2016). Las siguientes clases fueron identificadas: *Campo de Murunduns, Cambarazal, Campo de Mimoso, Cerrado stricto sensu (Sabana), Suelo Expuesto, Pimental y Pantanos (Humedales) y Zona Quemada*.

Tras generar los resultados de clasificación para cada período, se evaluó la precisión mediante la matriz de

confusión y el índice Kappa, utilizando 30 muestras de validación por clase identificados en campo y en Google Earth para cada fecha.

3. RESULTADOS

Las imágenes satelitales permitieron identificar variaciones en las fitofisionomías de vegetación durante los períodos temporales seleccionados. La comparación entre 2020 y 2024 ayudó a esclarecer los efectos de las transiciones estacionales y los impactos de incendios forestales sobre la vegetación en la región de Pirizal del Pantanal.

La imagen del 31 de marzo de 2020 (estación húmeda), correspondiente a la temporada de lluvias, resalta la predominancia del *Campo de Murunduns*, un macrohábitat característico de las sabanas estacionalmente inundables de Brasil y ampliamente distribuido a lo largo de los bordes del Pantanal. Su formación está asociada a la acción de termitas, que construyen montículos en áreas de pastizales sujetas a inundaciones, formando pequeñas islas cubiertas por especies típicas del Cerrado, como la lixeira (*Curatella americana* L.). Además de esta fitofisionomía, destacan el *Cambarazal*, compuesto por bosques dominados por *Vochysia divergens*, una especie adaptada a largos períodos de inundación que puede permanecer sumergida hasta ocho meses (Cunha y Junk, 2004). Ya el *Campo de Mimoso*, tiene el período promedio de inundación de aproximadamente seis meses. Este último posee alto valor forrajero debido a la palatabilidad y calidad nutricional de sus gramíneas, y se presenta en depresiones estacionalmente inundadas, así como en extensas áreas de planicies de inundación fluviales (Figura 2).

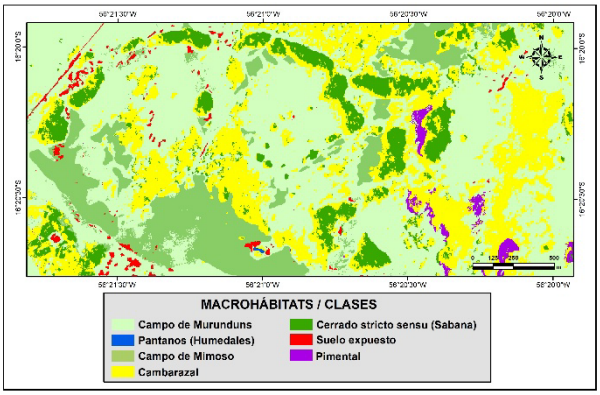


Figura 2. Clasificación del área el 31 de marzo de 2020.

La imagen del 3 de octubre de 2020 fue adquirida al final de la estación seca. Él mapeo reveló efectos visibles de incendios forestales que ocurrieron en el mes de septiembre de 2020, con grandes áreas quemadas y reducciones en los *Campos de Murunduns* y *Campos de Mimoso*. El *Cerrado Stricto Sensu* se fusionó con el *Cambarazal* debido a similitudes en la respuesta spectral (Figura 3).

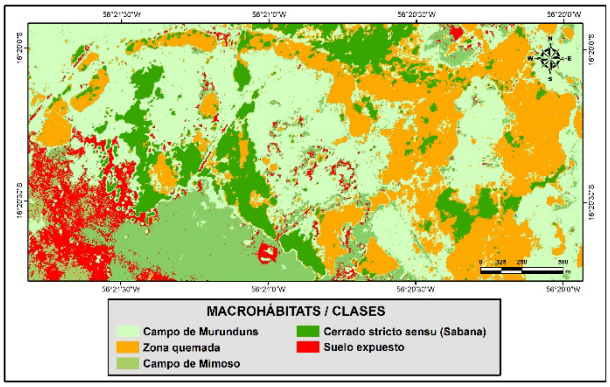


Figura 3. Clasificación del área el 3 de octubre de 2020.

La imagen del 29 de noviembre de 2024, tomada cuatro años después del incendio, mostró una notable recuperación de la vegetación, particularmente en el *Campo de Murunduns*, *Cambarazal* y *Campo de Mimoso* (Figura 4).

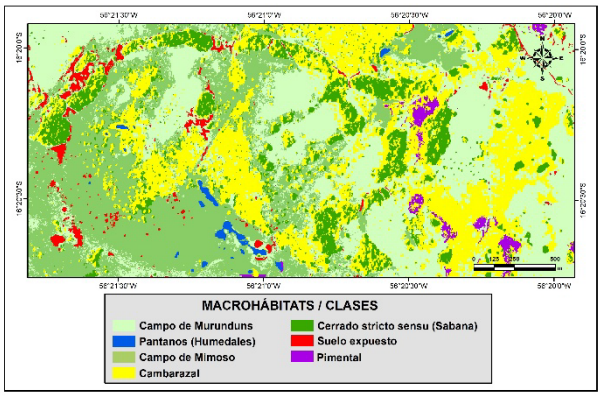


Figura 4. Clasificación del área el 29 de noviembre de 2024.

El análisis temporal resaltó cambios sustanciales en las fitofisionomías entre 2020 y 2024. A inicios de 2020, el *Campo de Murunduns* ocupaba más de la mitad del área de estudio. Para octubre, durante la estación seca, se registró una declinación significativa en esta clase y la emergencia de la categoría *Área Quemada*, que abarcó *Cambarazal*, *Campo de Mimoso*, *Campo de Murunduns* y *Pimental*. Para 2024, se observó una clara reconfiguración en la cobertura vegetal, con una reducción continua en *Campos de Murunduns* y aumentos proporcionales en *Cambarazal* y *Campo de Mimoso*, sugiriendo una regeneración parcial (Tabla 1).

Los datos de la Tabla 2 revelan una dinámica significativa de transformación en la cobertura vegetal durante el período de cuatro años, con un patrón claro de expansión de ciertas fitofisionomías y contracción de otras. El área del *Campo de Mimoso* casi se duplicó, con un incremento del 93.47%. En contraste, el *Campo de Murunduns* sufrió una reducción drástica del 31.41%. Otras fitofisionomías, como *Cerrado stricto sensu* (12.64%), Cambarazal (7.07%) y Pimental (28.29%), también mostraron crecimiento. La clase *Pantano*, a pesar del elevado porcentaje de incremento, no debe enfatizarse en exceso porque está sujeta a inundaciones

estacionales y períodos lluviosos que permiten el ascenso del agua a la superficie.

Tabla 1. Comparación de macrohábitats e otras clases por área (ha) y porcentaje (%).

Período	Macrohábitats / Clases	Área (ha)	(%)
31/03/2020	Campo de Murunduns	292.91	52.38%
	Cambarazal	136.34	24.38%
	Campo de Mimoso	71.42	12.76%
	Cerrado Stricto Sensu	45.96	8.21%
	Suelo Expuesto	6.24	1.12%
	Pimental	6.22	1.12%
	Pantanos (Humedales)	0.12	0.02%
03/10/2020	Campo de Murunduns	233.85	41.32%
	Zona Quemada	138.84	24.66%
	Cerrado stricto sensu	65.55	12.33%
	Campo de Mimoso	82.72	20.24%
	Suelo Expuesto	38.25	1.46%
29/11/2024	Campo de Murunduns	200.90	35.98%
	Cambarazal	145.98	26.09%
	Campo de Mimoso	138.18	24.86%
	Cerrado stricto sensu	51.77	9.31%
	Suelo Expuesto	11.38	2.04%
	Pimental	7.98	1.19%
	Pantanos (Humedales)	3.02	0.54%

Tabla 2. Tabla de tasa de variación relativa de fitofisionomías entre 2020 y 2024.

Macrohábitats	Área 2020 (ha)	Área 2024 (ha)	Variación relativa (%)
Cambarazal	136.34	145.98	7.07
Campo de Mimoso	71.42	138.18	93.47
Cerrado stricto sensu	45.96	51.77	12.64
Pimental	6.22	7.98	28.29
Pantanos (Humedales)	0.12	3.02	2416.66

Se aplicó el índice Kappa como método estadístico para medir la precisión de las clasificaciones supervisadas obtenidas en los tres períodos analizados. Para marzo de 2020, el índice Kappa obtenido fue de 0,84 (excelente); para octubre de 2020, de 0,87 (excelente); y para noviembre de 2024, de 0,88 (excelente).

4. CONCLUSIÓN

El análisis temporal reveló cambios significativos en la cobertura vegetal debido a los incendios forestales de 2020. A pesar del impacto severo, la vegetación ha mostrado signos de regeneración a lo largo de los años, particularmente en los macrohábitats de *Campo de Murunduns*, *Campo de Mimoso* y *Cambarazal*. La especie de *Vochysia divergens* (cambará), que domina grandes áreas del Pantanal, presenta adaptaciones a inundaciones periódicas y puede dispersar sus semillas vía agua (Braz *et al*., 2021). Los resultados demostraron que, a pesar de la pérdida significativa del *Campo de Murunduns* (-31%), hubo una recuperación notable de otros macrohabitáts, como el *Campo de Mimoso* (+93%), reforzando la resiliencia ecológica. Estos hallazgos destacan la resiliencia natural del bioma Pantanal y refuerzan el rol crítico del Teledetección en el apoyo a la conservación de la biodiversidad.

5. REFERENCIAS

Braz, E. M., Mattos, P. P., Salis, S. M., & Curto, R. A. (2021). Estrutura de um cambarazal (*Vochysia divergens*) no Pantanal de Mato Grosso. Embrapa Pantanal & Embrapa Florestas.

Costa, C. P., Cunha, C. N., Costa, S. C. (2010). Caracterização da flora e estrutura do estrato arbustivo-arbóreo de um cerrado no Pantanal de Poconé, MT. *Biota Neotropica, 10*(3), 61-73. https://doi.org/10.1590/S1676-06032010000300006

Cunha, C. N.; Junk, W. J. (2004). Year-to-year changes in water level drive the invasion of Vochysia divergens in Pantanal grasslands. *Applied Vegetation Science, (7)*, p. 103-110. https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2004.tb00600.x

Haddad, N. M., *et al*. (2023). Mapping Cerrado vegetation physiognomies using remote sensing and machine learning techniques. *Remote Sensing of Environment (295)*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113676

Junk, W. J., & Cunha, C. N. (2024). Inventário das Áreas Úmidas Brasileiras. Cuiabá-MT: Carlini & Caniato Editorial.

Lenzi, I. L. C., & Nunes, G. M. (2016). Comparacão entre os classificadores Support Vector Machine e Spectral Angle Mapper aplicado a diferenciação das fitofisionomias do Parque Estadual do Araguaia (MT). *Revista Geoaraguaia, 6*(1). https://www.periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/4936

Silva, R. A. (2017). Uso de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) para o mapeamento e análise de macrohabitats no Pantanal de Mato Grosso (Master's thesis, UFMT).

Silva, S. M. (2022). O Pantanal e o Fogo. Documenta Pantanal. https://documentapantanal.com.br

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.150

Análisis de la continuidad vertical del combustible forestal mediante descomposición gaussiana de nubes de puntos TLS

Torralba, Jesús [1] **Ruiz, Luis Á.** [1] **Crespo-Peremarch, Pablo** [1] **Simó-Martí, Marina** [1] **Carbonell-Rivera, Juan Pedro** [2]

[1] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, València, España

[2] Integrated Remote Sensing Studio (IRSS), Department of Forest Resources Management, Forest Science Centre, 2424 Main Mall, University of British Columbia, Vancouver, BC V6T 1Z4, Canadá.

ORCID: Torralba 0000-0001-8644-8604 Ruiz 0000-0003-0073-7259 Crespo-Peremarch 0000-0003-2241-4493 Simó-Martí 0000-0001-9605-9645 Carbonell-Rivera 0000-0002-6724-6780

Correspondencia: jetorpe@upv.es laruiz@cgf.upv.es pabcrepe@cgf.upv.es msimmar@upv.es jp.carbonellrivera@ubc.ca

RESUMEN

La continuidad vertical del combustible es un factor clave en la propagación de incendios forestales, especialmente en ecosistemas mediterráneos donde coexisten estratos arbustivos y arbóreos parcialmente solapados. Sin embargo, su caracterización sigue siendo compleja por su heterogeneidad. Este estudio analiza la continuidad vertical del combustible en 50 parcelas forestales mediante una metodología de descomposición gaussiana aplicada a perfiles de distribución de retornos en altura, derivados de nubes de puntos de escáner láser terrestre (TLS). La estructura vertical se evaluó jerárquicamente en cinco escalas espaciales, desde la parcela completa (≈ 113 m²) hasta columnas de ≈ 0,50 m². Los resultados muestran que la descomposición gaussiana permite representar la transición vertical entre los estratos arbustivo y arbóreo, con un comportamiento que depende de la escala. Las métricas de ajuste indican que el desacople entre la referencia y las curvas gaussianas es mayor en escalas intermedias, mientras que la reducción del error en columnas muy pequeñas responde a una simplificación de la estructura observable asociada a un bajo número de puntos. Las escalas más amplias (parcela completa y primer nivel de subdivisión) muestran el comportamiento más estable.

Palabras clave: *Incendios forestales, estructura forestal, combustible en escalera, escáner láser terrestre*

Fecha de recepción: 10 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 10 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis de la continuidad vertical del combustible forestal mediante descomposición gaussiana de nubes de puntos TLS

Torralba, Jesús [(1)], Ruiz, Luis Á. [(1)], Crespo-Peremarch, Pablo [(1)], Simó-Martí, Marina [(1)], Carbonell-Rivera, Juan Pedro [(2)]

[(1)] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, València, España.

0000-0001-8644-8604, jetorpe@upv.es ; 0000-0003-0073-7259, laruiz@cgf.upv.es

0000-0003-2241-4493, pabcrepe@cgf.upv.es ; 0000-0001-9605-9645, msimmar@upv.es

[(2)] Integrated Remote Sensing Studio (IRSS), Department of Forest Resources Management, Forest Science Centre, University of British Columbia, Canadá.

0000-0002-6724-6780, jp.carbonellrivera@ubc.ca.

Resumen: La continuidad vertical del combustible es un factor clave en la propagación de incendios forestales, especialmente en ecosistemas mediterráneos donde coexisten estratos arbustivos y arbóreos parcialmente solapados. Sin embargo, su caracterización sigue siendo compleja por su heterogeneidad. Este estudio analiza la continuidad vertical del combustible en 50 parcelas forestales mediante una metodología de descomposición gaussiana aplicada a perfiles de distribución de retornos en altura, derivados de nubes de puntos de escáner láser terrestre (TLS). La estructura vertical se evaluó jerárquicamente en cinco escalas espaciales, desde la parcela completa (≈ 113 m²) hasta columnas de ≈ 0,50 m². Los resultados muestran que la descomposición gaussiana permite representar la transición vertical entre los estratos arbustivo y arbóreo, con un comportamiento que depende de la escala. Las métricas de ajuste indican que el desacople entre la referencia y las curvas gaussianas es mayor en escalas intermedias, mientras que la reducción del error en columnas muy pequeñas responde a una simplificación de la estructura observable asociada a un bajo número de puntos. Las escalas más amplias (parcela completa y primer nivel de subdivisión) muestran el comportamiento más estable.

Palabras clave: Incendios forestales, estructura forestal, combustible en escalera, escáner láser terrestre

Analysis of vertical forest fuel continuity using Gaussian decomposition of TLS point clouds

Abstract: *Vertical forest fuel continuity is a key factor in wildfire propagation, particularly in Mediterranean ecosystems where shrub and tree strata partially overlap. However, characterizing it remains challenging due to its heterogeneity. This study analyzes vertical fuel continuity in 50 forest plots using a Gaussian decomposition methodology applied to height density profiles derived from terrestrial laser scanner (TLS) point clouds. Vertical structure was evaluated hierarchically across five spatial scales, ranging from the complete plot (≈ 113 m²) to columns of ≈ 0.50 m². Results show that Gaussian decomposition captures the vertical transition between shrub and tree strata, although its performance depends on the scale. The goodness-of-fit metrics indicates that the mismatch between the reference data and the Gaussian curves is higher at intermediate scales, whereas the reduction in error observed in very small columns reflects a simplification of the observable structure due to a very low number of points. The coarser scales (the complete plot and the first level of spatial subdivision) show the most stable behavior.*

Keywords: *Forest wildfires, forest structure, ladder fuels, terrestrial laser scanner*

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques mediterráneos actuales presentan una elevada carga de combustible distribuida en distintos estratos verticales, lo que incrementa la probabilidad de incendios de alta intensidad, especialmente cuando existe continuidad vertical entre el estrato arbustivo y el dosel arbóreo. En este contexto, la caracterización de la estructura vertical del combustible es clave para la gestión forestal y la prevención de incendios (Marino *et al*., 2018). Sin embargo, describir la continuidad vertical

y, en particular, la conectividad entre el sotobosque y el dosel sigue siendo un reto metodológico, debido a la complejidad de los perfiles y a la elevada heterogeneidad espacial (Martin-Ducup *et al*., 2025; Torralba *et al*., 2024). Actualmente, el uso de cartografía de modelos de combustible, un conjunto de clases que representan diferentes grados de complejidad de la estructura vertical y de la densidad de combustible, suple esta falta de información cuantitativa necesaria para el mantenimiento preventivo de los bosques. Sin embargo, la creciente disponibilidad de datos y de metodologías de procesamiento debería permitir un cambio de paradigma y una tendencia hacia una caracterización más detallada de la estructura vertical.

Los sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*) han demostrado una elevada capacidad para caracterizar la estructura vertical del bosque, aunque la identificación y cuantificación de estratos que actúan como combustibles de escalera continúa siendo un desafío metodológico (Martin-Ducup *et al*., 2025; Viedma & Moreno, 2025). En este contexto, el escáner láser terrestre (TLS) proporciona perfiles verticales de alta densidad de puntos que permiten analizar la distribución de la vegetación mediante enfoques basados en la densidad de puntos por altura. Sin embargo, extraer métricas objetivas y comparables de continuidad vertical a partir de estos perfiles complejos no es un proceso directo. La descomposición gaussiana de perfiles de altura se ha propuesto como una vía automatizable para representar la estructura vertical mediante curvas gaussianas con significado estructural (Torralba *et al*., 2024; Zhou *et al*., 2017), facilitando la identificación de estratos verticales y la cuantificación de su solape.

Este trabajo plantea una metodología de análisis de la continuidad vertical del combustible mediante la descomposición gaussiana aplicada a perfiles de distribución de retornos en altura de nubes de puntos de TLS, con dos objetivos: (i) analizar la viabilidad de caracterizar la continuidad vertical entre los estratos arbustivo y arbóreo a múltiples escalas espaciales; y (ii) evaluar la coherencia de la descomposición gaussiana para reproducir la organización vertical del combustible.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio se localiza en los bosques mediterráneos del Parque Natural de la Sierra de Espadán (España), caracterizados por masas forestales mayoritariamente coetáneas y por una elevada variabilidad en la densidad arbórea y la fracción de cabida cubierta. El estrato arbóreo está dominado por un fustal bajo a medio de *Pinus halepensis* Mill. y *P. pinaster* Aiton con pies dispersos codominantes de *Quercus suber* L. y *Q. ilex* L. que rara vez forman bosquetes. El sotobosque presenta una cobertura de rala a densa, con una gran diversidad de especies, donde destacan *Salvia rosmarinus* Spenn., *Genista scorpius* (L.). DC., *Cistus albidus* L. y *Pistacia lentiscus* L. (Torralba *et al*., 2024).

Se registraron las mismas 25 parcelas circulares de 6 metros de radio (113 m²) en 2015 y en 2022. La organización vertical del combustible mostró una clara dependencia de la composición del estrato arbóreo dominante, con alturas medias de la base de copa (CBH) más bajas en parcelas dominadas por *P. halepensis* (2,93 ± 1,95 m) y más elevadas en parcelas dominadas por *P. pinaster* (6,92 ± 2,51 m), mientras que en parcelas mixtas con *Q. suber* la CBH fue menor (2,18 ± 1,17 m). En el estrato arbustivo, la altura máxima varió entre 0,52 y 4,15 m, lo que refleja una elevada heterogeneidad estructural. Las 50 parcelas se consideraron unidades de análisis independientes.

2.1. Registro y procesado de datos TLS

Los datos TLS se registraron en 2015 y 2022 mediante un escáner láser de fase Faro Focus 3D 120. En cada parcela se realizaron cinco estaciones de escaneo, una central y cuatro adicionales situadas a 7,5 m en las direcciones cardinales. En cada nube de puntos, se eliminaron de forma supervisada los puntos anómalos y el ruido. El registro entre escaneos se realizó mediante esferas de referencia. Posteriormente, las nubes de puntos se clasificaron en puntos de suelo y de vegetación. Los puntos de suelo se interpolaron para generar un modelo digital del terreno, que se empleó para la normalización de las alturas de la nube de puntos. Finalmente se eliminaron los puntos correspondientes a los troncos de los árboles para evitar la sobreestimación de la continuidad vertical del combustible.

2.2. Extracción de curvas gaussianas

El análisis de la estructura vertical se realizó de forma jerárquica en cinco escalas espaciales. El Nivel 1 correspondió a la parcela completa (113 m²), mientras que los niveles sucesivos se obtuvieron mediante subdivisiones espaciales progresivas hasta generar columnas de análisis de menor tamaño, alcanzando en el Nivel 5 superficies de aproximadamente 0,56 m² (Fig. 1). En los niveles 3, 4 y 5 se descartaron columnas con superficies muy reducidas para garantizar la representatividad estructural de los perfiles analizados.

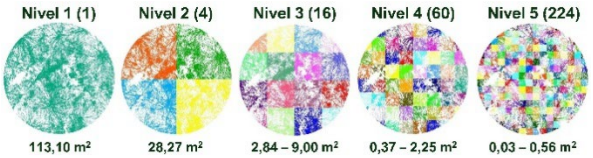


Figura 1. Escalas espaciales de análisis para la extracción de curvas gaussianas. Entre paréntesis se indica el número de subdivisiones en cada nivel. Los colores son aleatorios.

Se construyeron histogramas de la distribución de alturas normalizadas, descartando los puntos por debajo de 0,5 m para evitar la inclusión de puntos del suelo y del estrato herbáceo. El ancho de los *bins* se determinó mediante el algoritmo bayesiano optBINS y se homogeneizó por nivel. Los histogramas se transformaron en curvas continuas y se suavizaron mediante un filtro de Savitzky–Golay (polinomio de orden 2; ventana de 9). Sobre las curvas suavizadas se aplicó un proceso automatizado de descomposición gaussiana basado en Zhou *et al*. (2017), ajustando combinaciones de funciones gaussianas a los picos detectados en el perfil vertical. Para cada gaussiana se estimaron sus parámetros principales (amplitud, media (μ) y desviación estándar), que se utilizaron como descriptores cuantitativos de la estructura vertical. El proceso se

ejecutó de forma iterativa para cada columna y nivel de análisis, con un máximo de cuatro curvas en función de la complejidad estructural del perfil (Fig. 2). La descomposición se realizó secuencialmente entre niveles, acotando el rango vertical de ajuste a partir de la información heredada del nivel inmediatamente superior para mantener la coherencia jerárquica entre escalas. A partir de las curvas gaussianas se derivaron métricas orientadas a la caracterización de la continuidad vertical del combustible. En este trabajo se presentan únicamente los resultados de la métrica OVLtree, que cuantifica la fracción del área de la gaussiana arbórea que se solapa verticalmente con la gaussiana arbustiva respecto al área total de la gaussiana arbórea, como descriptor del grado de solape vertical entre estratos.

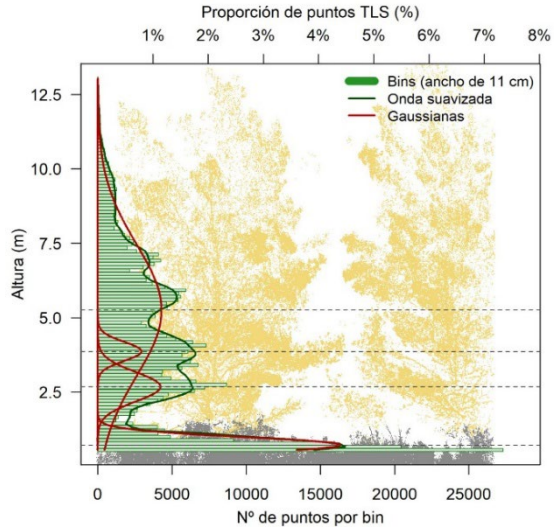


Figura 2. Curvas gaussianas ajustadas en el Nivel 1. El fondo en beige y gris representa los estratos arbóreo y arbustivo, respectivamente. Se muestran el histograma de alturas en verde claro (*bins*), la onda suavizada en verde oscuro y las curvas gaussianas en rojo burdeos. Las líneas discontinuas representan la altura media de cada gaussiana.

2.3. Validación y evaluación

Se segmentaron manualmente las 50 parcelas en estrato arbóreo y estrato arbustivo. Cada estrato se subdividió en columnas (niveles 1 a 5) y en bins de altura, siguiendo el mismo esquema descrito en la Sección 2.2. Esta segmentación permitió obtener la distribución vertical observada de los puntos en cada bin y estrato.

La validación se basó en comparar el solape vertical observado entre estratos con el solape modelizado mediante la descomposición gaussiana. El solape observado se cuantificó a escala de bins, identificando intervalos de altura compartidos por ambos estratos y resumiéndolos mediante el número de bins solapados y las proporciones relativas de puntos en cada estrato. En paralelo, la descomposición gaussiana permitió estimar, para pares de curvas adyacentes, el punto de intersección y el área de solape entre ellas. La coherencia entre ambas representaciones para una parcela o columna se evaluó mediante el error cuadrático medio (MSE), definido como:

$$MSE = \frac{1}{N}\sum\left(P_{ij} - A_{ij}\right)^2 \quad (1)$$

$$P_{ij} = \frac{(P_{árbol} - P_{matorral})}{P_{árbol}} \quad (2)$$

$$A_{ij} = \frac{(A_{árbol} - A_{matorral})}{A_{árbol}} \quad (3)$$

donde N es el número de *bins*, P_{ij} representa la dominancia relativa del estrato arbóreo derivada de los puntos observados, y A_{ij} su equivalente estimado a partir del área de las curvas gaussianas en cada *bin*. El MSE constituye el principal indicador del desacople vertical entre la estructura observada y la representada por la descomposición gaussiana. De forma complementaria, se calculó la correlación de *Pearson* entre las series P_{ij} y A_{ij} evaluadas en los N *bins* de altura, como medida de concordancia de la forma del perfil vertical.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra la distribución de la métrica OVLtree para los cinco niveles de análisis. Se observa un incremento progresivo de los valores de solape vertical desde el Nivel 1 (parcela completa) hasta los niveles definidos por columnas de menor superficie, lo que refleja el efecto de la agregación espacial en la estimación del solape vertical. Al analizar la parcela completa, la transición vertical entre estratos queda parcialmente promediada, mientras que el análisis por columnas de menor área permite detectar con mayor detalle la conexión vertical entre estratos. La elevada dispersión de los valores de OVLtree en todos los niveles refleja una marcada heterogeneidad vertical, con la coexistencia de columnas con solape reducido y otras con solape elevado, asociadas a una fuerte continuidad vertical del combustible.

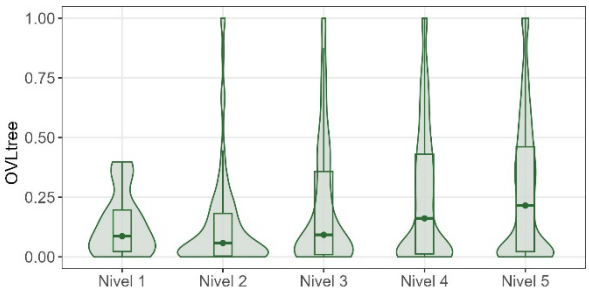


Figura 3. Distribución de OVLtree por nivel de análisis, que cuantifica el solape vertical entre los estratos arbóreo y arbustivo (0 = solape reducido; 1 = solape elevado).

La capacidad de la descomposición gaussiana para reproducir la estructura vertical observada se evaluó mediante la correlación de *Pearson* entre P_{ij} y A_{ij} a lo largo de los N *bins* de altura (Fig. 4.a). En general, se obtuvieron correlaciones elevadas en los niveles 1 y 2, lo que indica que la descomposición gaussiana captura de manera consistente el patrón vertical de la transición entre estratos. En los niveles definidos por columnas de menor superficie, aumenta la dispersión de los valores y aparecen correlaciones más bajas, e incluso negativas, asociadas principalmente a perfiles con un número reducido de puntos y una distribución irregular de

puntos, lo que refleja limitaciones conocidas asociadas a la menor densidad de puntos en este tipo de análisis (Viedma & Moreno, 2025). Estas discrepancias entre la referencia y la descomposición gaussiana no responden a un fallo sistemático de la metodología, sino a la dificultad de representar, mediante curvas gaussianas bien diferenciadas, perfiles verticales muy irregulares o complejos, como suele ocurrir en los niveles 4 y 5.

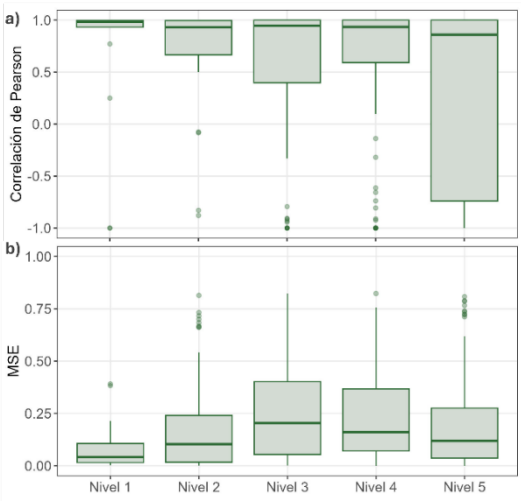


Figura 4. a) Distribución de la correlación de Pearson entre P_{ij} y A_{ij}, por nivel de análisis. b) Distribución del error cuadrático medio (MSE) por nivel de análisis.

El rendimiento global de la metodología, en términos de la magnitud de los residuos, se sintetiza mediante el MSE (Fig. 4.b). En el nivel 1, donde hay muchos puntos, la estructura real es muy compleja con colas largas y asimétricas. En este caso, la gaussiana se ajusta bien en general. El error aumenta progresivamente en los niveles 2 y 3 y, posteriormente, disminuye ligeramente en los niveles 4 y 5. Este patrón indica que el mayor desacople se produce en escalas en las que la estructura vertical está suficientemente bien muestreada, lo que permite que las discrepancias entre la referencia y la aproximación gaussiana sean visibles y cuantificables. La reducción del MSE en los niveles 4 y 5 no implica una mejor representación de la estructura vertical, sino un empobrecimiento de la estructura observable en columnas con pocos puntos. Estos resultados son similares a los obtenidos por Viedma & Moreno (2025) con LiDAR aéreo de baja densidad. En consecuencia, las métricas de error deben interpretarse junto con las métricas estructurales, ya que valores bajos de error no garantizan, por sí solos, una representación más fiel de la señal vertical asociada a la interacción entre estratos, cuya caracterización sigue siendo compleja en ecosistemas estructuralmente continuos (Marino *et al*., 2018).

4. CONCLUSIONES

La descomposición gaussiana aplicada a nubes de puntos TLS permite representar la transición vertical entre los estratos arbustivo y arbóreo como indicador de la continuidad vertical. Los resultados muestran un comportamiento claramente dependiente de la escala de análisis: en niveles de mayor superficie, la descomposición gaussiana reproduce adecuadamente la estructura vertical, mientras que en niveles de menor superficie aumenta la variabilidad debido a la fragmentación y a la irregularidad en la distribución de los puntos. En este sentido, las escalas más amplias (la parcela completa y el primer nivel de subdivisión) se consideran las más adecuadas, al ofrecer un equilibrio entre estabilidad y capacidad de representación de la estructura. Asimismo, la evaluación de la continuidad vertical del combustible no puede basarse únicamente en métricas de error, ya que valores bajos de MSE pueden coexistir con representaciones estructuralmente simplificadas asociadas a un número reducido de puntos. Este enfoque contribuye a una mejor comprensión de la continuidad vertical del combustible forestal, relevante para la gestión de los bosques y la prevención de los incendios forestales.

5. AGRADECIMIENTOS

El trabajo recogido en esta publicación forma parte de las ayudas PID2020-117808RB-C21 y PID2024-158591OB-I00, financiadas por el MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

6. REFERENCIAS

Marino, E., Montes, F., Tomé, J. L., Navarro, J. A., & Hernando, C. (2018). Vertical forest structure analysis for wildfire prevention: Comparing airborne laser scanning data and stereoscopic hemispherical images. International *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 73,* 438–449. https://doi.org/10.1016/J.JAG.2018.07.015

Martin-Ducup, O., Dupuy, J. L., Soma, M., Guerra-Hernandez, J., Marino, E., Fernandes, P. M., Just, A., Corbera, J., Toutchkov, M., Sorribas, C., Bock, J., Piboule, A., Pirotti, F., & Pimont, F. (2025). Unlocking the potential of Airborne LiDAR for direct assessment of fuel bulk density and load distributions for wildfire hazard mapping. Agricultural and Forest *Meteorology, 362*, 110341. https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2024.110341

Torralba, J., Crespo-Peremarch, P., Ruiz, L. Á., & Carbonell-Rivera, J. P. (2024). Análisis multitemporal de la estructura vertical de ecosistemas forestales mediterráneos mediante datos TLS. Teledetección y Cambio Global: Retos y Oportunidades Para Un Crecimiento Azul. XX Congreso de La Asociación Española de Teledetección, 291–294. http://www.aet.org.es/?q=congresos

Viedma, O., & Moreno, J. M. (2025). Impact of LiDAR pulse density on forest fuels metrics derived using LadderFuelsR. *Ecological Informatics, 88*(1), 103135. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103135

Zhou, T., Popescu, S. C., Krause, K., Sheridan, R. D., & Putman, E. (2017). Gold – A novel deconvolution algorithm with optimization for waveform LiDAR processing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 129*, 131–150. https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2017.04.021

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.174

Análisis de la incertidumbre espacial en modelos de susceptibilidad a movimientos en masa mediante Procesos Gaussianos

Cobos-Mora, Sandra [1,2] **Rodríguez-Galiano, Víctor** [2] **Guamán Aucapiña, José** [1]

[1] Universidad Católica de Cuenca, Ecuador

[2] Universidad de Sevilla, España

ORCID: Cobos-Mora 0000-0003-1091-0000 Rodríguez-Galiano 0000-0002-5422-8305 Guamán Aucapiña 0000-0002-4443-4375

Correspondencia: zhandry_cobos@yahoo.com vrgaliano@us.es jo_gu1994@hotmail.com

RESUMEN

El modelado de susceptibilidad a movimientos en masa (MSMM) es una herramienta clave para la evaluación del riesgo geológico y la planificación territorial; sin embargo, la incertidumbre asociada a sus predicciones rara vez se cuantifica explícitamente, particularmente en regiones montañosas complejas como los Andes. La elevada heterogeneidad geomorfológica, climática y geológica, junto con la limitada disponibilidad de inventarios históricos, incrementa la variabilidad espacial de los factores condicionantes y reduce la confiabilidad de los modelos. Este estudio analiza la incertidumbre espacial de un MSMM mediante un enfoque probabilístico basado en Procesos Gaussianos (PG), utilizando variables geomorfológicas, geológicas y ambientales. La optimización del modelo se realizó mediante la Selección Secuencial hacia atrás de características (SBS). La incertidumbre se evaluó mediante la entropía de Shannon. Los resultados muestran que el modelo optimizado mejora el desempeño predictivo (AUC: 0,876–0,905) y reduce la incertidumbre (0,555–0,522). El análisis espacial evidencia mayores niveles de incertidumbre en rangos extremos de pendiente y distancia a vías principales, y mínimos en intervalos intermedios, donde el modelo presenta mayor estabilidad predictiva.

Palabras clave: *modelo de susceptibilidad a movimientos en masa, optimización, procesos gaussianos, Entropía de Shannon, incertidumbre*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis de la incertidumbre espacial en modelos de susceptibilidad a movimientos en masa mediante Procesos Gaussianos

Cobos-Mora, Sandra [1,2], Rodríguez-Galiano, Víctor [2], Guamán Aucapiña, José [1]

[1] Universidad Católica de Cuenca, Ecuador

0000-0003-1091-0000, scobosm@ucacue.edu.ec ; 0000-0002-4443-4375, jrguamana01@est.ucacue.edu.ec.

[2] Universidad de Sevilla, España.

0000-0002-5422-8305, vrgaliano@us.es.

Resumen: El modelado de susceptibilidad a movimientos en masa (MSMM) es una herramienta clave para la evaluación del riesgo geológico y la planificación territorial; sin embargo, la incertidumbre asociada a sus predicciones rara vez se cuantifica explícitamente, particularmente en regiones montañosas complejas como los Andes. La elevada heterogeneidad geomorfológica, climática y geológica, junto con la limitada disponibilidad de inventarios históricos, incrementa la variabilidad espacial de los factores condicionantes y reduce la confiabilidad de los modelos. Este estudio analiza la incertidumbre espacial de un MSMM mediante un enfoque probabilístico basado en Procesos Gaussianos (PG), utilizando variables geomorfológicas, geológicas y ambientales. La optimización del modelo se realizó mediante la Selección Secuencial hacia atrás de características (SBS). La incertidumbre se evaluó mediante la entropía de Shannon. Los resultados muestran que el modelo optimizado mejora el desempeño predictivo (AUC: 0,876–0,905) y reduce la incertidumbre (0,555–0,522). El análisis espacial evidencia mayores niveles de incertidumbre en rangos extremos de pendiente y distancia a vías principales, y mínimos en intervalos intermedios, donde el modelo presenta mayor estabilidad predictiva.

Palabras clave: modelo de susceptibilidad a movimientos en masa, optimización, procesos gaussianos, entropía de Shannon, incertidumbre

Exploratory spatial analysis of uncertainty in Gaussian Process–based landslide susceptibility models

***Abstract**: Landslide susceptibility modeling (LSM) is a key tool for geological risk assessment and land-use planning; however, the uncertainty associated with its predictions is rarely quantified explicitly, particularly in complex mountainous regions such as the Andes. High geomorphological, climatic, and geological heterogeneity, combined with the limited availability of historical inventories, increases the spatial variability of conditioning factors and reduces model reliability. This study analyzes the spatial uncertainty of an LSM using a probabilistic framework based on Gaussian Processes (GP), incorporating geomorphological, geological, and environmental variables. Model optimization was performed using Sequential Backward Feature Selection (SBS). Uncertainty was quantified using Shannon entropy. Results show that the optimized model improves predictive performance (AUC: 0.876–0.905) and reduces uncertainty (0.555–0.522). Spatial analysis reveals higher uncertainty levels in extreme ranges of slope and distance to main roads, and lower values in intermediate ranges, where the model exhibits greater predictive stability.*

***Keywords**: landslide susceptibility model, optimization, Gaussian Processes, Shannon entropy, uncertainty*

1. INTRODUCCIÓN

La ausencia de un análisis explícito de la incertidumbre conduce a que muchos modelos de susceptibilidad a movimientos en masa (MSMM) se interpreten como predicciones determinísticas, cuando en realidad están condicionados por múltiples fuentes de variabilidad que se manifiestan como incertidumbre en las predicciones. Esta incertidumbre puede ser de dos tipos: aleatoria, asociada a la variabilidad inherente de los procesos geomorfológicos, e incertidumbre epistémica, vinculada a limitaciones en los datos, el conocimiento del sistema y la estructura del modelo (Hüllermeier & Waegeman, 2021). En este contexto, factores como la calidad y representatividad de los inventarios de movimientos en masa (MM), la resolución y consistencia de las variables condicionantes, la dinámica espacio-temporal de los procesos y las restricciones de los algoritmos de modelado contribuyen conjuntamente a ambas formas de incertidumbre (Huang *et al*., 2024).

En respuesta a esta problemática, la literatura ha propuesto avanzar en el análisis de la incertidumbre mediante enfoques como el remuestreo del inventario, el análisis de sensibilidad, los ensambles de modelos y los métodos bayesianos (Ferreira *et al*., 2025). En este marco, los Procesos Gaussianos (PG) constituyen una alternativa metodológica robusta para el modelado probabilístico en MSMM, al permitir representar relaciones no lineales complejas y cuantificar explícitamente la incertidumbre a través de su estructura de covarianza (Rasmussen, 2004). Sin embargo, en problemas de clasificación, esta incertidumbre predictiva no siempre es directamente calculada en los entornos computacionales habituales, por lo que suele estimarse mediante métricas derivadas de las probabilidades, como la entropía de Shannon (Addis, 2023).

Estudios recientes en los Andes evidencian que los MSMM pueden alcanzar buenas exactitudes globales (Cobos-Mora *et al*., 2023). Sin embargo, según los autores, no se han identificado estudios que cuantifiquen explícitamente la incertidumbre. Esta región presenta una elevada complejidad geoambiental, caracterizada por topografía abrupta, litologías heterogéneas, intensa actividad tectónica y alta variabilidad climática. Estas condiciones generan fuertes contrastes espaciales y relaciones no lineales que dificultan la interpretación local de los MSMM. Además, la limitada disponibilidad de información puede amplificar la incertidumbre predictiva y reducir la robustez de los modelos en contextos montañosos complejos. Esta limitación configura un vacío de conocimiento. Por ello, el objetivo de esta investigación es analizar y cuantificar la incertidumbre espacial de los MSMM mediante la aplicación de técnicas basadas en PG y la entropía de Shannon, con el fin de mejorar la interpretación espacial de los MSMM y aportar información relevante para la gestión del riesgo y planificación territorial.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La provincia de Azuay está ubicada en la región andina del sur del Ecuador y presenta una elevada complejidad geomorfológica caracterizada por pendientes pronunciadas (25–50 %) y una densa red de drenaje. A ello se suman precipitaciones intensas con marcada estacionalidad y la influencia de factores antrópicos, como el trazado vial, el riego y el cambio de uso del suelo que configuran un entorno altamente susceptible a MM.

2.2 Datos

La Tabla 1 presenta la descripción de las variables predictoras y variable objetivo empleadas para la generación de los MSMM.

Tabla 1. Variables predictoras y variable objetivo utilizadas en el MSMM.

Variable	Unidad	año	Fuente/Colección/Técnica	Resolución
Temperatura*	K	2017-2025	MODIS/061/MOD11A2 MODIS/061/MYD11A2	1000 m
Precipitación (media y máxima anual) *	mm/año	2017-2025	UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY	5566 m
Almacenamiento agua subterránea*	mm	2017-2025	NASA/GLDAS/V022/CLSM/G025/DA1D	27830 m
Humedad del suelo*	Fracción de volumen	2017-2025	NASA/SMAP/SPL4SMGP/007	11000 m
NDVI*	no aplica	2017-2025	COPERNICUS/S2	30 m
Elevación (DEM)*	m	2020	NASA/NASADEM_HGT/001	30 m
Aspectos	grados		Procesamiento SIG	30 m
Curvatura plana	1/m			30 m
Curvatura de perfil	1/m			30 m
Pendientes	grados			30 m
Distancia a ríos	m	2019	Instituto Geográfico Militar (IGM)	1:5000
Distancia a vías principales, secundarias y locales	m			1:5000
Litología	no aplica	S/I	Secretaría Nacional de Gestión de riesgos (SGR)	1:100000
Distancia a fallas geológicas	m	S/I	Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE)	1:100000
Inventario de presencia de movimientos en masa (1153 puntos)	no aplica	S/I 2016-2025 S/I	Prefectura del Azuay SNGR IIGE	S/I
Inventario de ausencia de movimientos en masa (1153 puntos)	No aplica	2025	Probability-proportional-to-size (PPS) sampling	S/I

* variables obtenidas y procesadas a través de la plataforma en la nube Google Earth Engine.

2.3. Métodos

Esta investigación implementó PG como un método de clasificación supervisada probabilística en R (librería mlr) para la generación de los MSMM. El preprocesamiento incluyó la partición de datos en conjuntos de entrenamiento (70 %) y validación (30 %), la estandarización de variables numéricas y la codificación de variables categóricas. La calibración del modelo se realizó mediante validación cruzada espacial por bloques (10 particiones), garantizando independencia espacial entre subconjuntos (Dai *et al*., 2023). La optimización de hiperparámetros se abordó mediante un enfoque bayesiano, utilizando el área bajo la curva ROC (AUC) como función objetivo, y considerando un kernel gaussiano con ajuste del parámetro sigma ($0.001 < \sigma < 0.5$). A partir de todas las variables se calculó el MSMM completo (MSMMC); del cual se aplicó una Selección Secuencial hacia atrás de Características (SBS) para identificar el conjunto óptimo de variables predictoras. De este último modelo se determinó la importancia relativa de las variables mediante el análisis de pérdida de AUC.

El desempeño de los modelos se evaluó con el conjunto de validación mediante métricas derivadas de la matriz de confusión: AUC, exactitud, Kappa, sensibilidad y especificidad. El umbral óptimo para la binarización de las probabilidades se determinó mediante el índice de Youden (Lim *et al*., 2024). Finalmente, la incertidumbre se cuantificó mediante el índice de Brier y la entropía de Shannon, como medidas complementarias de la calidad probabilística y la dispersión de las predicciones (Felsberg *et al*., 2022).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del conjunto total de variables consideradas en el modelado, el MSMM con SBS retiene únicamente ocho predictores: altitud, pendiente, distancia a fallas geológicas, distancia a vías principales, precipitación media, NDVI, almacenamiento de agua subterránea y humedad del suelo. Estas, definen el patrón espacial de la susceptibilidad de la Figura 1a. La incertidumbre asociada a estas predicciones presenta una distribución espacial heterogénea, con amplios sectores caracterizados por valores elevados de incertidumbre (Figura 1b).

El MSMM con SBS presentó una exactitud superior al MSMM completo (MSMMC), evidenciado por mejoras consistentes en sus métricas. En particular, el AUC aumentó de 0,876 a 0,905, la exactitud de 0,799 a 0,823 y el coeficiente Kappa de 0,5995 a 0,646. Asimismo, la sensibilidad se incrementó de 0,754 a 0,806, mientras que la especificidad se mantuvo constante en 0,84, lo que indicó una mejora en la detección de MM sin comprometer la identificación de zonas estables. En términos de incertidumbre global, el índice de Brier disminuyó de 0.147 en el MSMMC a 0.128 en el MSMM con SBS, lo que indicó una mejora en la calidad probabilística de las predicciones. Por otro lado, los valores de entropía de Shannon, superiores a 0.5 en ambos MSMM, reflejaron una incertidumbre relativamente alta; no obstante, la reducción de 0.555 a 0.522 evidencia una disminución sistemática y una mayor certidumbre predictiva en el MSMM con SBS (Tabla 2).

El análisis de pérdida de AUC reveló que la pendiente y a la distancia a vías principales son las variables más importantes del modelo, dado que su exclusión generó la mayor reducción de la capacidad discriminativa, con pérdidas del 20.2% y 19.8% del AUC respectivamente (Figura 2a). La incertidumbre espacial presentó un comportamiento no lineal en función de ambas variables. En relación con la pendiente, la incertidumbre aumentó progresivamente desde valores cercanos a 0.45 hasta un primer máximo alrededor de 20.6°, seguido de una disminución que condujo a un mínimo relativo próximo a 39.5°, volviendo a incrementarse de forma sostenida hasta pendientes superiores a 70° (Figura 2b). De manera análoga, la incertidumbre en función de la distancia a vías principales exhibió un patrón curvilíneo, con un mínimo bien definido alrededor de 7.6 km y un aumento progresivo a mayores distancias (Figura 2c). En conjunto, estos resultados indicaron que la incertidumbre del modelo se concentró en rangos extremos de pendiente y en áreas alejadas de la red vial, mientras que disminuyó en intervalos intermedios donde el modelo presentó un comportamiento más estable y consistente, probablemente asociado a una mayor densidad de registros de MM en zonas próximas a las vías.

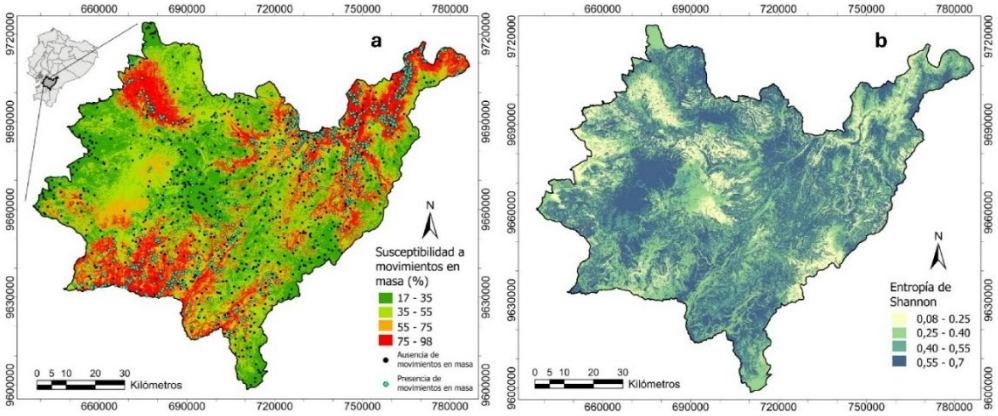


Figura 1. a) MSMM con SBS, b) incertidumbre espacial calculada mediante la entropía de Shannon.

Tabla 2. Métricas de exactitud e incertidumbre de los MSMM completo y con SBS.

	Exactitud										Incertidumbre	
	Índice Youden	auc[1]	exactitud	Kappa	sensibilidad	especificidad	tp[2]	tn[3]	fp[4]	fn[5]	Brier	Shannon
MSMMC[6]	0.482	0,876	0,799	0,599	0,754	0,846	281	261	51	85	0,147	0,555
MSMM con SBS[7]	0.485	0,905	0,823	0,646	0,806	0,840	279	279	53	67	0,128	0,522

[1] área bajo la curva, [2] verdaderos positivos, [3] verdaderos negativos, [4] falsos positivos, [5] falsos negativos, [6] MSMM completo, [7] MSMM con selección de características secuencial hacia atrás

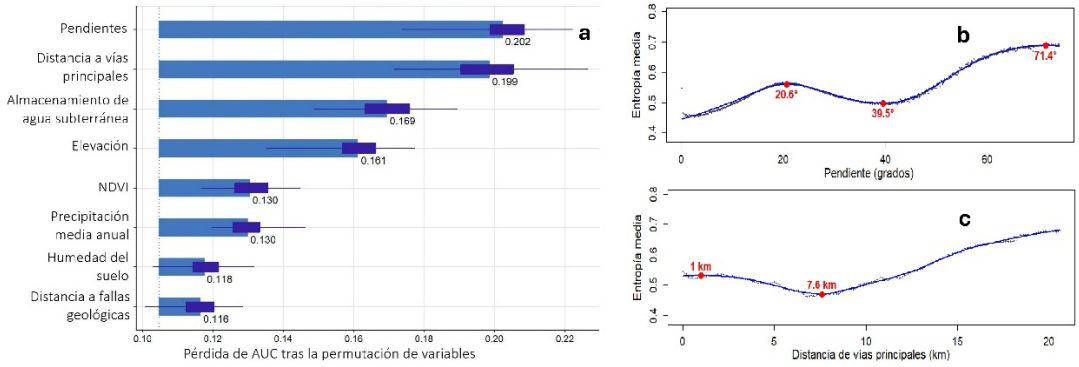


Figura 2. a) Importancia de las variables predictoras en el MSMM con SBS en función del porcentaje de pérdida del AUC, b) análisis de incertidumbre en relación a pendientes; c) análisis de incertidumbre en relación a distancia a vías principales.

4. CONCLUSIONES

En contextos geoambientales complejos como la región andina, caracterizados por alta heterogeneidad espacial y dinámicas no lineales, la incertidumbre no es un componente residual, sino una propiedad inherente del sistema, que condiciona la interpretación de los MSMM. En este sentido, la integración de PG con la entropía de Shannon permitió trascender el enfoque determinista convencional, incorporando una cuantificación de la incertidumbre en la predicción. Con este marco metodológico no solo se mejora la interpretabilidad de los resultados, sino que refuerza su pertinencia para la toma de decisiones en escenarios donde la información es incompleta y las condiciones son altamente variables.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Católica de Cuenca a través del: proyecto de investigación PICTMS24-02 denominado "Optimización de Modelos de Susceptibilidad a Movimientos en Masa con IA y Teledetección y su Vinculación en las Políticas Públicas Territoriales", Laboratorio SIGDATA y al grupo de Investigación *Urban and Earth Data Science.*

6. REFERENCIAS

Addis, A. (2023). GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio and Shannon Entropy Models in Dejen District, Northwestern Ethiopia. *Journal of Engineering*, 2023. https://doi.org/10.1155/2023/1062388

Bryce, E. et al. (2024). An updated landslide susceptibility model and a log-Gaussian Cox process extension for Scotland. *Landslides 2024, 22*(2), 517–535. https://doi.org/10.1007/S10346-024-02368-9

Cobos-Mora, S. et al.(2023). Analysis of landslide explicative factors and susceptibility mapping in an andean context: The case of Azuay province (Ecuador). *Heliyon, 9*(9), e20170. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E20170

Dai, X. et al. (2023). Examining the Spatially Varying Relationships between Landslide Susceptibility and Conditioning Factors Using a Geographical Random Forest Approach: A Case Study in Liangshan, China. *Remote Sensing 2023, Vol. 15*, 15(6). https://doi.org/10.3390/rs15061513

Felsberg, A. et al.(2022). Estimating global landslide susceptibility and its uncertainty through ensemble modeling. *Nat. Hazards and Earth Syst Sci, 22*(9), https://doi.org/10.5194/NHESS-22-3063-2022

Ferreira, Z. et al.(2025). Insights into landslide susceptibility: a comparative evaluation of multi-criteria analysis and machine learning techniques. Geomatics, *Nat. Hazards and Risk , 16*(1), 2471019. https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2471019

Huang, F. et al. (2024). Uncertainties in landslide susceptibility prediction modeling: A review on the incompleteness of landslide inventory and its influence rules. *Geosci Front, 15*(6), 101886. https://doi.org/10.1016/J.GSF.2024.101886

Hüllermeier, E., et al.(2021). Aleatoric and epistemic uncertainty in machine learning: an introduction to concepts and methods. *Mach. Learn. 2021, 110*(3), 457-506. https://doi.org/10.1007/s10994-021-05946-3

Lim, J. et al.(2024). An ensemble neural network approach for space–time landslide predictive modelling. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 132*(11), 104037. https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104037

Rasmussen, C. (2004). Gaussian Processes in Machine Learning. Lect. Notes Compt. *Sci., 3176*, 63–71. https://doi.org/10.1007/978-3-540-28650-9_4

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.191

Análisis de imágenes ante una catástrofe natural a diferentes escalas. El caso de la DANA en Valencia el 29 de octubre de 2024.

Chapinal Cervantes, Libertad [1] **Gil Martín, Celia** [1] **Escudero Muñoz, Catalina** [1] **Mazón Ibáñez, Elena** [1]

[1] Esri España Soluciones Geoespaciales SL

ORCID: Chapinal Cervantes 0009-0001-6120-7596 Gil Martín 0009-0005-9821-6137 Escudero Muñoz 0009-0005-8454-1609

Correspondencia: libertad.chapinal@esri.es celia.gil@esri.es catalina.escudero@esri.es elena.mazon@esri.es

RESUMEN

Las inundaciones son uno de los desastres naturales con mayor impacto humano y económico a escala global. En este contexto, la Observación de la Tierra y los Sistemas de Información Geográfica son herramientas clave para la monitorización de eventos extremos, evaluación de impactos y apoyo a la gestión de emergencias. En este trabajo se presenta un enfoque multiescalar para el análisis de inundaciones, aplicado al episodio de Depresión Aislada en Niveles Altos ocurrido en la provincia de Valencia (España) en octubre de 2024. En este estudio se combinan imágenes satelitales Sentinel-2 Level-2A de resolución media con imágenes de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) de muy alta resolución (3.9cm), tomando como referencia la delimitación oficial de áreas inundadas proporcionada por el Copernicus Emergency Management Service. A escala global, se accedió a imágenes de Sentinel-2A mediante el estándar abierto STAC a través del software ArcGIS Pro y fueron analizadas mediante el índice multiespectral MNDWI. A escala local, se emplearon técnicas de inteligencia artificial sobre imágenes de drones para la detección de obstáculos en la vía pública, utilizando el modelo pre-entrenado TextSAM y un modelo refinado basado en SAMLoRA. Los resultados evidencian que la integración de datos multiescalares, estándares abiertos e inteligencia artificial reducen significativamente los tiempos de obtención de datos para la evaluación de daños y el soporte en la toma de decisiones ante situaciones de emergencia.

Palabras clave: *Imágenes satelitales, drones, ArcGIS Pro, Inteligencia artificial, STAC*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis de imágenes ante una catástrofe natural a diferentes escalas. El caso de la DANA en Valencia el 29 de octubre de 2024.

Chapinal Cervantes, Libertad [(1)], Gil Martín, Celia [(1)], Escudero Muñoz, Catalina [(1)], Mazón Ibáñez, Elena [(1)]

[(1)] Esri España Soluciones Geoespaciales SL.

0009-0001-6120-7596, libertad.chapinal@esri.es ; 0009-0005-9821-6137, celia.gil@esri.es.

0009-0005-8454-1609, catalina.escudero@esri.es ; elena.mazon@esri.es.

Resumen: Las inundaciones son uno de los desastres naturales con mayor impacto humano y económico a escala global. En este contexto, la Observación de la Tierra y los Sistemas de Información Geográfica son herramientas clave para la monitorización de eventos extremos, evaluación de impactos y apoyo a la gestión de emergencias. En este trabajo se presenta un enfoque multiescalar para el análisis de inundaciones, aplicado al episodio de Depresión Aislada en Niveles Altos ocurrido en la provincia de Valencia (España) en octubre de 2024. En este estudio se combinan imágenes satelitales Sentinel-2 Level-2A de resolución media con imágenes de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) de muy alta resolución (3.9cm), tomando como referencia la delimitación oficial de áreas inundadas proporcionada por el Copernicus Emergency Management Service. A escala global, se accedió a imágenes de Sentinel-2A mediante el estándar abierto STAC a través del software ArcGIS Pro y fueron analizadas mediante el índice multiespectral MNDWI. A escala local, se emplearon técnicas de inteligencia artificial sobre imágenes de drones para la detección de obstáculos en la vía pública, utilizando el modelo pre-entrenado TextSAM y un modelo refinado basado en SAMLoRA. Los resultados evidencian que la integración de datos multiescalares, estándares abiertos e inteligencia artificial **reducen significativamente los tiempos de obtención de datos** para la evaluación de daños y el soporte en la toma de decisiones ante situaciones de emergencia.

Palabras clave: Imágenes satelitales, drones, ArcGIS Pro, Inteligencia artificial, STAC.

Analysis of imagery in response to a natural disaster at multiple scales: the case of the DANA in Valencia on October 29, 2024.

***Abstract**: Floods are among the natural disasters with the greatest human and economic impact globally. In this context, Earth Observation and Geographic Information Systems are key tools for monitoring extreme events, assessing impacts, and supporting emergency management. This study presents a multiscale approach for flood analysis, applied to the cut-off low (DANA) event that occurred in the province of Valencia, Spain, in October 2024. Medium-resolution Sentinel-2 Level-2A satellite imagery was combined with very high-resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery (3.9 cm), using the official flood extent delineation provided by the Copernicus Emergency Management Service as a reference. At the global scale, Sentinel-2A imagery was accessed through the open STAC standard via ArcGIS Pro and analyzed using the MNDWI multispectral index. At the local scale, artificial intelligence techniques were applied to drone imagery for obstacle detection on public roads, using the pre-trained TextSAM model and a refined model based on SAMLoRA. The results show that the integration of multiscale data, open standards, and artificial intelligence significantly reduces the time required for data acquisition, damage assessment, and decision support in emergency situations.*

***Keywords**: Satellite images, drones, ArcGIS Pro, Artificial intelligence, STAC.*

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son los desastres naturales más catastróficos y que afectan a numerosas regiones cada año. Según los datos de World Meteorological Organization (2026), se estima que entre 1994 y 2013 se vieron afectadas 2,5 billones de personas y causaron una pérdida económica de unos 40 billones de dólares anuales. Además, el número de personas que viven en áreas potencialmente inundables está aumentando

(Jongman, 2021).

Los datos satelitales proporcionan información clave para el conocimiento de la Tierra y son imprescindible en casos de inundaciones y otros fenómenos naturales (Rolla *et al*., 2025). Los Sistemas de Información Geográfica (GIS) son imprescindibles para la aplicación de enfoques multiescalares de la Observación de la Tierra. El enfoque de múltiples escalas permite integrar datos espaciales y temporales que abarcan desde la escala local hasta la global. Además, gracias a programas como Copernicus, tenemos una gran disponibilidad de conjuntos de datos globales. El panorama de la observación de la Tierra a macro escala es prometedor, ya que, aspectos y programas de observación a nivel nacional y europeo, como la Constelación Atlántica y los nuevos actores del New Space, entre otros, permitirán que dispongamos de datos cada vez más precisos y frecuentes. Estos datos a gran escala se complementan con los obtenidos a menor escala como los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), las plataformas de gran altitud (HAPs) o sensores terrestres que están permitiendo contar con datos de resolución centimétrica, desbloqueando así nuevos casos de uso como la respuesta en tiempo real ante situaciones de emergencia (Román *et al*., 2025).

El objetivo de este estudio es plantear un análisis multiescalar utilizando imágenes con diferentes resoluciones. Concretamente, análisis multiespectral para ver las zonas más afectadas y la utilización de modelos de inteligencia artificial para detectar obstáculos en las vías públicas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El presente estudio se centra en la provincia de Valencia, España, con especial atención a las zonas afectadas por las inundaciones asociadas a la Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) ocurrida el 29 de octubre de 2024. Según los datos oficiales del Copernicus Emergency Management Service (CEMS), esta DANA impactó directamente en más de 4.100 hectáreas en l'Horta Sud y ocasionó daños en 3.906 edificaciones, afectando potencialmente a más de 60.000 personas en la región. La delimitación espacial de estas áreas inundadas se realizó mediante la integración de datos de proveedores públicos y privados, empleando principalmente imágenes satelitales de Sentinel-2, y constituye la referencia oficial para cualquier análisis de impactos y planificación de medidas de respuesta.

Asimismo, para poder definir las áreas más afectadas y, por tanto, prioritarias para llevar a cabo labores de socorro se necesitaban imágenes con mayor resolución espacial. La Policía Municipal de Madrid y la Unidad Militar de Emergencias (UME) colaboraron en la adquisición y procesamiento de imágenes de UAV de una población de la zona afectada, en concreto Paiporta, a partir de ahora AOI (Area Of Interest).

2.2. Datos

Las imágenes satelitales, junto a los avances en estándares abiertos como STAC (SpatioTemporal Asset Catalog), son un recurso esencial para el análisis de fenómenos naturales. El estándar STAC es especialmente relevante ya que permite explorar las imágenes y escenas individuales, así como sus archivos asociados en un modelo uniforme, facilitando las búsquedas por área de interés, fecha, parámetros espectrales y demás criterios (Wei, *et al*., 2021). El uso de este estándar está cada vez más extendido y herramientas de análisis como ArcGIS permiten una conexión a ellos de una forma sencilla. Concretamente, para este estudio utilizamos esta conexión a los datos Sentinel-2 Level-2A con el software ArcGIS Pro (versión 3.6) para obtener las imágenes con menor nubosidad antes y después de la DANA.

Las imágenes óptimas multiespectrales del satélite Sentinel-2 son una herramienta fundamental para la monitorización, evaluación y gestión del riesgo. Especialmente en las inundaciones asociadas a episodios de DANA ya que generan impactos severos, repentinos y a gran escala.

Las imágenes de Sentinel-2 tienen una alta resolución lo que permite visualizar los cambios en el territorio que sucedieron como la anegación completa de zonas como La Albufera e inundaciones en áreas rurales, urbanas y agrícolas. Junto a ellas, se ha utilizado el ortomosaico verdadero resultado del procesamiento fotogramétrico de las imágenes provenientes de un vuelo de UAV realizado el 8 de noviembre de 2024, que tienen una resolución de 3,9 cm sobre el AOI.

2.3. Metodología

El análisis llevado a cabo incluye diferentes metodologías al trabajar con imágenes de distintas resoluciones.

Para el análisis a menor escala, utilizamos imágenes de Sentinel-2 obtenidas gracias al protocolo de STAC en ArcGIS Pro a través de código. Sobre ellas se aplicaron índices multiespectrales como el MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) (Xu, 2006) para obtener la huella de la inundación provocada por la DANA utilizando ArcPy. Además, para conocer más en detalle el impacto producido, se utilizaron algoritmos de detección de cambios (Figura 1).

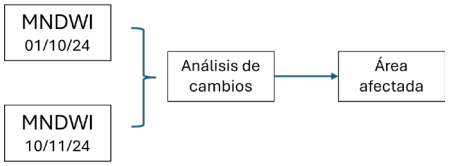


Figura 1. Flujo de trabajo esquematizado utilizado para obtener la huella de la inundación con el índice MNDWI.

El índice MNDWI (Eq.1) nos permite detectar cuerpos de agua y minimizar la confusión espectral con superficies urbanas, vegetación y suelos húmedos en contextos complejos.

$$MNDWI = \frac{\text{GREEN} - \text{SWIR1}}{\text{GREEN} + \text{SWIR1}} \quad (1)$$

Para el análisis a mayor escala se utilizaron imágenes de UAV de mayor resolución espacial y se analizaron utilizando modelos de inteligencia artificial. Uno de los modelos utilizados fue el **modelo pre-entrenado Text SAM** (Zhang *et al*., 2023) disponible en ArcGIS Living Atlas of the World. Los modelos pre-entrenados son modelos listos para usar ya que han sido entrenados previamente. El uso de estos permite acelerar los flujos de trabajo al eliminar el tiempo de entrenamiento, la necesidad de disponer de imágenes etiquetadas y hardware avanzado para entrenar el modelo (Varela *et al*., 2025). El modelo de Text SAM utilizado es un modelo de aprendizaje profundo de visión-lenguaje que permite la detección y segmentación de objetos utilizando texto, permitiendo la extracción de elementos de las imágenes sin clases predefinidas. Esto es posible gracias a la combinación de las capacidades de GroundingDINO (Liu *et al*., 2023) y Segment Anything Model (SAM) (Kirillov *et al*., 2023).

Los resultados obtenidos fueron completos en determinadas zonas del AOI, sin embargo, en las calles dónde los montones de escombro eran más grandes, el modelo no detectaba correctamente todos los escombros. Ante esta situación, se decidió entrenar un **modelo específico de detección de escombros** utilizando un modelo funcional y los resultados obtenidos del modelo pre-entrenado TextSAM (Figura 2). Los modelos fundacionales son modelos de inteligencia artificial entrenados con conjuntos de datos masivos que permiten la creación de modelos específicos para realizar una gran variedad de tareas y sin necesidad de un hardware muy potente. En este análisis se utilizó el **modelo fundacional SAMLoRA (**Zhang & Liu, 2023) y las imágenes de escombro obtenidas del modelo pre-entrenado TextSAM, concretamente, 98 muestras de escombros.

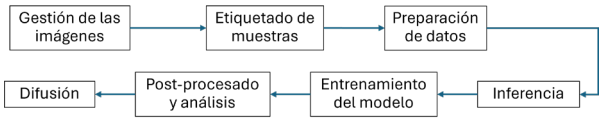


Figura 2. Flujo de trabajo esquematizado para el re-entrenamiento del modelo SAMLoRA.

Los resultados finales del análisis a esta escala fueron la conjunción de ambos procesos de forma que, la detección completa de todos los objetos que obstaculizaban las calles se realizó en varios pasos combinando tareas de Deep learning. Posteriormente se realizaron análisis espaciales SIG para la depuración de los resultados.

3. RESULTADOS

3.1. Cambios en los índices multiespectrales

El análisis utilizando imágenes satelitales de Sentinel-2 permite conocer cuáles han sido las áreas afectadas por la inundación provocada por la DANA el 29 de octubre de 2024. Gracias a la diferencia de valores en el índice MNDWI podemos delimitar la zona afectada. Para automatizar el proceso se compararon ambos índices con la herramienta de detección de cambios entre las dos fechas. La figura 3 muestra el resultado obtenido, el azul más intenso representa la mayor diferencia del índice entre ambos escenarios.

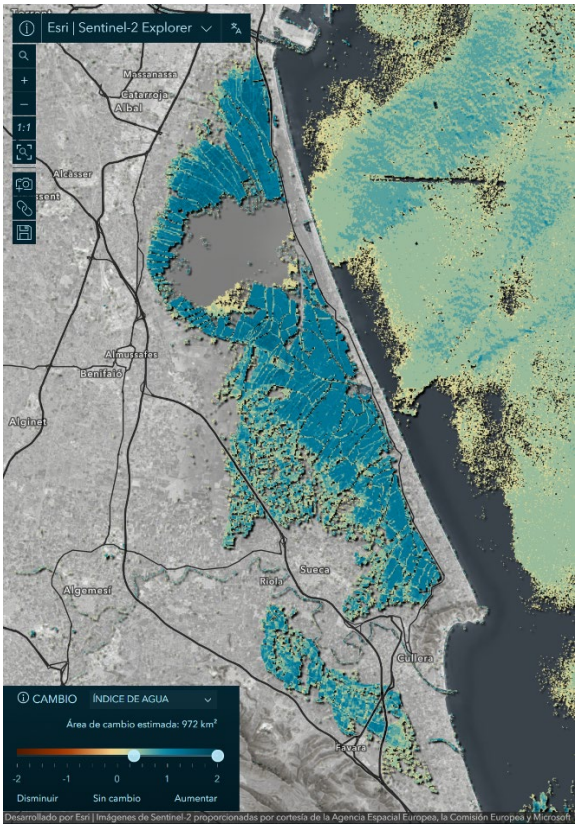


Figura 3. Resultado de la comparación del índice MNDWI entre 01/10/2024 y 10/11/2024.

3.2. Detección de obstáculos en las vías públicas con modelos de inteligencia artificial

Con el uso del modelo pre-entrenado de TextSAM de ArcGIS Living Atlas of the World se pudieron delimitar objetos como coches, escombros y camiones en el ortomosaico del AOI con resolución de 3.9 cm. El resultado cuantitativo de esta clasificación fue de aproximadamente 4.000 objetos detectados dentro del área de estudio en cuestión de minutos (Figura 4).



Figura 4. Muestra de los resultados obtenidos a partir de la ejecución del modelo pre-entrenado TextSAM.

La combinación de distintas tareas de Deep learning comentadas en la metodología permitió la detección total de los obstáculos en las vías públicas. Para una depuración mayor de los resultados (Figura 5), se utilizaron fuentes cartográficas de referencia del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV).



Figura 5. Resultados de la intersección de elementos detectados con la cartografía oficial del ICV.

Los resultados analíticos, sobre todo en situaciones de emergencia de este tipo, han de ser accesibles a los distintos actores implicados en su interpretación y en la toma de decisiones. La tecnología de ArcGIS facilita la creación de portales y aplicaciones web para la integración de todos los resultados (Figura 6).



Figura 6. Cuadro de mando mostrando las calles bloqueadas por escombros.

La integración de un enfoque multiescalar basado en imágenes de diferentes resoluciones permite identificar las áreas más afectadas mediante análisis multiespectral y detectar obstáculos en la vía pública mediante modelos de inteligencia artificial, contribuyendo a reducir los tiempos de análisis y de respuesta ante situaciones de emergencia. En este sentido, las imágenes de muy alta resolución adquiridas mediante UAV resultan clave para el análisis detallado de la catástrofe y para apoyar de forma eficaz la planificación y el seguimiento de las labores de respuesta y recuperación. La metodología planteada es un flujo de trabajo plausible y aplicable en futuras situaciones de emergencia para actuar de forma rápida y en tiempo real.

4. AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a la Unidad Militar de Emergencias y a la Policía Municipal de Madrid su colaboración para compartir públicamente el resultado de esta evaluación rápida de obstáculos en las calles de Paiporta tras la DANA de Valencia de octubre de 2024.

5. REFERENCIAS

Copernicus Emergency Management Service (CEMS) (2026) EMSR773 - Copernicus EMS Mapping | Copernicus EMS On Demand Mapping

Jongman B. (2021). The fraction of the global population at risk of floods is growing. *Nature*, *596*(7870), 37–38. https://doi.org/10.1038/d41586-021-01974-0

Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Berg, A. C., Lo, W.-Y., Dollár, P., & Girshick, R. (2023). Segment Anything. arXiv. https://arxiv.org/abs/2304.02643

Liu, S., Zeng, Y., Zhang, B., Wan, P., Wang, X., Zhang, W., Li, C., & Liu, Z. (2023). Grounding DINO: Marrying DINO with grounded pre-training for open-set object detection. arXiv. https://arxiv.org/abs/2303.05499

Rolla, J., Khuller, A., An, K., Emberson, R., Fielding, E., Schultz, L., & Miner, K. (2025). *Satellite-aided disaster response*. *AGU Advances*. https://doi.org/10.1029/2024AV001395

Román, A., Tovar-Sánchez, A., Larrad, M., Rubiano-Sánchez, F. J., Zafra, J. M., Piñeiro, R., Castillo, Á., López, F. A., Vela, A. L., Allende, A., Sánchez, G., Martínez-Alonso, A., Samper, D., García-Davalillo, J. C., Galindo, I., & Navarro, G. (2025). UAV imagery in natural disasters: Real-time damage assessment of flash flooding events. *Ecological Informatics, 91*, 103433. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103433

Varela, S., Zheng, X., Njuguna, J., Sacks, E., Allen, D., Ruhter, J., & Leakey, A. D. B. (2025). Breaking the barrier of human-annotated training data for machine learning-aided plant research using aerial imagery. *Plant Physiology, 197*(4), kiaf132. https://doi.org/10.1093/plphys/kiaf132

Wei, X., Yan, S., Wang, X., Guizani, M., & Du, X. (2021). *STAC: A spatio-temporal approximate method in data collection applications*. *Pervasive and Mobile Computing, 73*, 101371. https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2021.101371

World Meteorological Organization. (2026). Floods. https://wmo.int/topics/floods

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, *27*(14), 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179

Zhang, R., Han, S., Xu, H., & Zhang, J. (2023). Text-SAM: Towards open-vocabulary segmentation with text prompts. arXiv. https://arxiv.org/abs/2304.18279

Zhang, K., & Liu, D. (2023). Customized Segment Anything Model for Medical Image Segmentation. arXiv. https://arxiv.org/abs/2304.13785

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.197

Seguimiento de la humedad del combustible vivo mediante imágenes Sentinel-2 en la isla de Tenerife

Peña Molina, Esther [1] **Guillen Climent, Maria Luz** [1] **Marino del Amo, Eva** [2] **Monedero de Andrés, Ana** [3] **Medina Méndez, Gustavo Adolfo** [3] **Tomé Morán, Jose Luis** [1] **Ranz Vega, Pedro Pablo** [1] **Arellano Pérez, Stéfano** [1]

[1] Agresta S. Coop., España

[2] Instituto de Ciencias Forestales del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (ICIFOR-INIA, CSIC)

[3] Gestión y Planeamiento Territorial y Medioambiental, S.A.

ORCID: Guillen Climent 0009-0000-3865-4681 Marino del Amo 0000-0002-2397-5543 Tomé Morán 0000-0003-2298-9115 Arellano Pérez 0000-0003-2164-8618

Correspondencia: epena@agresta.org mguillen@agresta.org eva.marino@inia.csic.es amonand@gesplan.es gmedmen@gesplan.es jltome@agresta.org pranz@agresta.org sarellano@agresta.org

RESUMEN

La humedad del combustible vivo (HCV) es un factor clave en la inflamabilidad y en el comportamiento del fuego. No obstante, hasta la fecha no se disponía de registros de HCV en la isla ni en la región macaronésica. Para cubrir esta carencia, el presente estudio propone un enfoque de monitorización continua a nivel espacial y temporal en Tenerife mediante la integración de datos de campo e índices espectrales de Sentinel-2. Bajo este marco, se caracteriza la dinámica de la HCV en especies de vegetación representativas mediante una red de parcelas permanentes establecida en la isla, evaluando el potencial de los modelos resultantes como indicadores de peligro de incendio. Se realizaron muestreos destructivos de HCV entre febrero y octubre de 2025. El diseño incluyó parcelas representativas de pino canario (vertientes N y S), tagasaste y brezo. A partir de imágenes Sentinel-2 se calcularon índices espectrales y se ajustaron modelos empíricos (Random Forest y modelos lineales) por especie y de forma agregada. Los resultados muestran una variabilidad temporal en tagasaste y brezo, mientras que el pinar presenta cambios más amortiguados y diferencias entre vertientes. En la estimación, los mejores desempeños se obtienen en tagasaste y en el modelo global, con un rendimiento menor en brezo y pino. Finalmente, se ilustra el potencial operativo con un caso de estudio en la zona del incendio de Arafo (2023), donde la evolución estimada refleja un descenso previo a un evento de incendio.

Palabras clave: *humedad del combustible vivo, Sentinel 2, Random Forest, riesgo de incendio*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Seguimiento de la humedad del combustible vivo mediante imágenes Sentinel-2 en la isla de Tenerife

Peña Molina, Esther [1], Guillen Climent, Maria Luz [1], Marino del Amo, Eva [2], Monedero de Andrés, Ana [3], Medina Méndez, Gustavo Adolfo [3], Tomé Morán, Jose Luis [1], Ranz Vega, Pedro Pablo [1], Arellano Pérez, Stéfano [1]

[1] Agresta S. Coop., España
epena@agresta.org ; 0009-0000-3865-4681, mguillen@agresta.org
0000-0003-2298-9115, jltome@agresta.org ; pranz@agresta.org
0000-0003-2164-8618, sarellano@agresta.org

[2] Instituto de Ciencias Forestales del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (ICIFOR-INIA, CSIC).
0000-0002-2397-5543, eva.marino@inia.csic.es

[3] Gestión y Planeamiento Territorial y Medioambiental, S.A.
amonand@gesplan.es ; gmedmen@gesplan.es

Resumen: La humedad del combustible vivo (HCV) es un factor clave en la inflamabilidad y en el comportamiento del fuego. No obstante, hasta la fecha no se disponía de registros de HCV en la isla ni en la región macaronésica. Para cubrir esta carencia, el presente estudio propone un enfoque de monitorización continua a nivel espacial y temporal en Tenerife mediante la integración de datos de campo e índices espectrales de Sentinel-2. Bajo este marco, se caracteriza la dinámica de la HCV en especies de vegetación representativas mediante una red de parcelas permanentes establecida en la isla, evaluando el potencial de los modelos resultantes como indicadores de peligro de incendio. Se realizaron muestreos destructivos de HCV entre febrero y octubre de 2025. El diseño incluyó parcelas representativas de pino canario (vertientes N y S), tagasaste y brezo. A partir de imágenes Sentinel-2 se calcularon índices espectrales y se ajustaron modelos empíricos (Random Forest y modelos lineales) por especie y de forma agregada. Los resultados muestran una variabilidad temporal en tagasaste y brezo, mientras que el pinar presenta cambios más amortiguados y diferencias entre vertientes. En la estimación, los mejores desempeños se obtienen en tagasaste y en el modelo global, con un rendimiento menor en brezo y pino. Finalmente, se ilustra el potencial operativo con un caso de estudio en la zona del incendio de Arafo (2023), donde la evolución estimada refleja un descenso previo a un evento de incendio.

Palabras clave: humedad del combustible vivo, Sentinel 2, Random Forest, riesgo de incendio

Live fuel moisture content monitoring on the island of Tenerife using Sentinel-2 images

***Abstract**: Live fuel moisture content (LFMC) is a key factor influencing flammability and fire behavior. However, to date, no systematic LFMC records have been available for the island or the Macaronesian region. To address this gap, the present study proposes a continuous spatial and temporal monitoring approach in Tenerife through the integration of field data and Sentinel-2 spectral indices. Within this framework, LFMC dynamics in representative vegetation species are characterized using a network of permanent plots established on the island, evaluating the potential of the resulting models as fire danger indicators. Destructive sampling of LFMC was carried out between February and October 2025. The design included eight representative plots of Canary Island pine (north- and south-facing slopes), tagasaste, and heather. From Sentinel-2 data, spectral indices were computed and empirical models (Random Forest and linear models) were fitted by species and jointly.The results show temporal variability in tagasaste and heather, while pine stands exhibit more buffered changes and differences between slopes. In the estimation, the best performance is obtained for tagasaste and in the global model, with lower performance for heather and pine. Finally, the operational potential is illustrated with a case study in the Arafo area, where the estimated evolution shows a decline prior to a wildfire event, which is useful as a complementary indicator in monitoring systems.*

***Keywords**: LFMC, Sentinel 2, Random Forest, wildfire forest, fire risk*

1. INTRODUCCIÓN

La humedad del combustible vivo (HCV o *live fuel moisture content*, LFMC) condiciona la inflamabilidad de la vegetación y, por tanto, la probabilidad de ignición y la dinámica de propagación del fuego. Su seguimiento resulta relevante en ambientes mediterráneos e insulares con marcada estacionalidad e intensa variabilidad interanual. En paralelo, la disponibilidad de bases de datos y series temporales de HCV ha permitido consolidar su uso como variable clave en evaluación de peligro y modelización, tanto a escala regional como global (Yebra *et al*., 2024).

Los métodos de campo aportan medidas directas, pero su cobertura espacial es limitada y su despliegue continuo es costoso. En este contexto, la teledetección ofrece una vía para estimar la HCV mediante relaciones entre el estado hídrico de la vegetación y variables espectrales derivadas de imágenes satélites. En los últimos años, Sentinel-2 ha impulsado la estimación empírica de HCV por su resolución espacial y frecuencia de revisita, con estudios que combinan índices espectrales y, en ocasiones, variables meteorológicas (Arcos *et al*., 2024). En trabajos previos también se han descrito relaciones operativas entre LFMC e índices como NDVI en contextos mediterráneos, con dependencias por tipo de cobertura y fenología (Domenech Agenjo *et al*., 2022). En términos metodológicos, la literatura evidencia que los enfoques empíricos suelen ser competitivos frente a aproximaciones basadas en modelos de transferencia radiativa cuando se busca aplicabilidad operativa y precisión (Marino *et al*., 2020).

Aun así, persisten retos asociados a la transferibilidad de modelos entre especies, regiones y condiciones atmosféricas, lo que refuerza la necesidad de calibraciones locales y redes de observación que sostengan su uso en gestión del riesgo (Marino *et al*., 2024). En este marco, el presente trabajo desarrolla y evalúa un sistema de seguimiento de HCV en Tenerife basado en una red de parcelas permanentes y en índices espectrales Sentinel-2. Los objetivos son: (i) caracterizar la evolución temporal de la HCV en distintas especies, (ii) ajustar modelos empíricos de estimación de HCV con Sentinel-2, (iii) evaluar su rendimiento mediante validación cruzada y (iv) explorar su aplicabilidad operativa mediante un caso de estudio de incendio histórico (Arafo, 2023).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y diseño de muestreo

El estudio se desarrolló en la isla de Tenerife (Islas Canarias), seleccionando parcelas representativas de formaciones de pino canario (*Pinus canariensis*) en dos contextos de orientación/vertiente (N y S), así como de matorral dominado por tagasaste (*Chamaecytisus proliferus*) y brezo (*Erica* spp.). Se establecieron ocho parcelas circulares permanentes (radio 25 m) en zonas relativamente homogéneas para facilitar la comparación con observaciones satelitales. La localización de parcelas y el contexto espacial se muestran en la Figura 1.

2.2. Muestreo de humedad del combustible vivo (HCV)

La HCV se estimó mediante muestreo destructivo de biomasa foliar, siguiendo el enfoque estándar de determinación gravimétrica (contenido de humedad como proporción del peso seco). Las campañas se realizaron entre febrero y octubre de 2025, incrementando la frecuencia durante el periodo estival en toda la red.

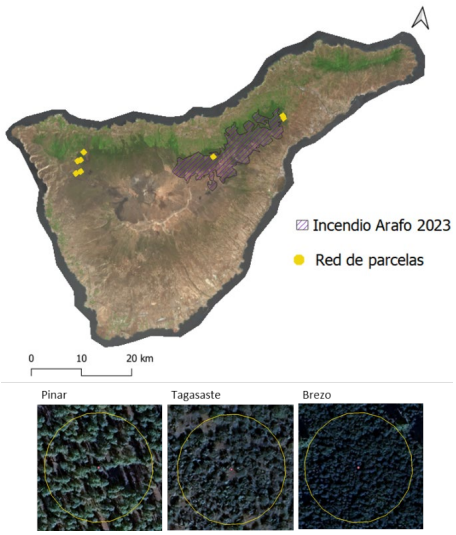


Figura 1. (i) Localización de red de parcelas en la isla de Tenerife (ii) Ejemplo de áreas de muestreo de 25 m de radio en pinar, tagasaste y brezo.

2.3. Datos de Sentinel-2 e índices espectrales

Se identificaron imágenes Sentinel-2 coincidentes temporalmente con las fechas de muestreo o en ventanas temporales de +/- 3 días. A partir de las reflectancias, se calcularon índices espectrales ampliamente utilizadas en estimación empírica de HCV con Sentinel-2. En concreto se utilizaron 16 índices espectrales, calculados a partir de reflectancias Sentinel-2. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDMI (Normalized Difference Moisture Index), GVMI (Global Vegetation Moisture Index), GNDVI (Green NDVI), NDWI (Normalized Difference Water Index), NDI45 (Normalized Difference Red-Edge Index), NDGI (Normalized Difference Glacier Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index), VARI (Visible Atmospherically Resistant Index), Vgreen (Vegetation Index Green), TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption Index), RVI (Ratio Vegetation Index), MSI (Moisture Stress Index), NMDI (Normalized Multi-Band Drought Index) y el ratio TCARI/OSAVI (Marino *et al*., 2020 y 2024).

2.4. Modelización empírica de HCV

Se ajustaron modelos empíricos de estimación de HCV a partir de los índices Sentinel-2, tanto por especie/formación como de forma conjunta, es decir se obtuvieron modelos para tagasaste, brezo y pinar, así como para matorral, pinar conjunto y global, incluyendo todas las formaciones. Se exploraron los siguientes modelos:

i) Random Forest (RF) (Breiman, 2001),

ii) Modelos lineales de regresión lineal (RLM) y modelos lineales mixtos (LMM).

2.5. Validación

Dado el tamaño muestral y la estructura temporal de la campaña, el rendimiento se evaluó mediante validación cruzada leave-one-out (LOOCV), reportando métricas de ajuste y error (R^2 y RMSE/MAE). Este proceso consiste en aplicar el modelo tantas veces como datos tenemos, dejando siempre un dato fuera en cada iteración para estimar su valor de humedad. De este modo, se obtiene un conjunto completo de estimaciones independientes que puede compararse directamente con los valores observados. Estos enfoques permiten aprovechar al máximo los datos disponibles, proporcionando estimaciones a pesar de las limitaciones en la cantidad de información de campo. La elección de esquemas de validación es relevante en HCV por la sensibilidad a la extrapolación (Arcos *et al*., 2024) y por problemas de transferibilidad entre especies y regiones (Marino *et al*., 2024).

2.6. Aplicabilidad operativa

Para evaluar el potencial de los modelos, se aplicó el modelo RF obtenido para tagasaste a un área incendiada en Arafo (Figura 1), analizando la evolución temporal del HCV estimado durante los tres meses previos al incendio (15 de agosto de 2023). Este análisis de "trayectorias preincendio" permite identificar posibles umbrales de riesgo asociados al HCV. Aunque su robustez requiere series temporales más largas y calibraciones locales (Marino *et al*., 2024; Yebra *et al*., 2024), resulta útil para validar la aplicabilidad de los modelos.

3. RESULTADOS

3.1. Dinámica temporal de la HCV y variabilidad por cobertura

La base de datos de campo muestra diferencias claras entre formaciones. Tagasaste y brezo presentan mayor variabilidad de HCV que el pino canario.

Tabla 1. Estadísticas de HCV de la base de datos de campo.

	Pinar	Tagasaste	Brezo
Mínimo (%)	68.41	58.48	61.12
Máximo (%)	135.35	205.56	141.92
Media (%)	94.55	113.79	105.69
Desv. Est	12.71	31.57	17.53

Concretamente, el tagasaste muestra un rango de variación de aproximadamente el 147% en su humedad, seguido del brezo con un 80%. Por el contrario, el pino canario presenta rangos más reducidos, con valores del 67%. Los valores analizados están representados en la Tabla 1.

3.2. Comportamiento de los índices de vegetación

A nivel de especie, el tagasaste muestra las correlaciones más altas y coherentes con los índices, destacando NMDI (r = 0.83). En brezo, las correlaciones son positivas pero débiles (máximo en NMDI, r = 0.38). En pino canario, la relación es predominantemente inversa y dependiente de la vertiente (p. ej., EVI/SAVI/OSAVI con r entre -0.64 y -0.67 en pinar norte), y al agrupar ambas vertientes se pierde señal (correlaciones por debajo de |0.30|), sugiriendo que la variabilidad norte–sur diluye el patrón espectral a escala de "pinar conjunto". En el conjunto global de especies, NMDI vuelve a ser el índice más sólido, con r = 0.60.

El análisis de las series temporales por parcela permite comparar visualmente la HCV de campo con la evolución de índices espectrales (Figura 2).

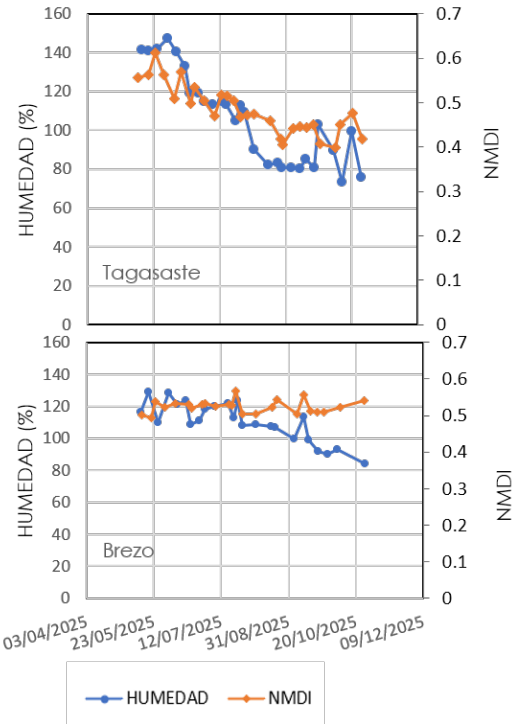


Figura 2. Evolución de HCV y NMDI obtenido con Sentinel 2 para el periodo de muestreo en campo.

En tagasaste se observa un descenso de HCV a la vez que de NMDI, y este patrón se observa en todas las parcelas de esta especie. En brezo, se observa un descenso progresivo de la HCV a lo largo del periodo 2025, alcanzando valores en torno al 80% a finales de octubre, mientras que el índice NMDI permanece relativamente constante en torno a 0.5 en 2025, lo que ayuda a explicar el menor ajuste de los modelos para esta especie. La Figura 2 muestra un ejemplo de las variaciones de HCV e índices para una de las parcelas de tagasaste y otra de brezo.

3.3. Resultado de los modelos empíricos

La comparación de modelos mediante LOOCV muestra que Random Forest ofrece el mejor desempeño relativo en la mayoría de conjuntos (tagasaste y matorral). En particular, el ajuste más alto se obtiene para tagasaste (RF, R^2 = 0.69; RMSE = 17.56; MAE = 12.30).

En brezo y pinar el rendimiento es limitado. En el caso del pinar, mejora al modelizarlos en conjunto, obteniendo R^2 = 0.44 con LMM, pero siendo insuficiente para un uso operativo con los datos actuales.

Tabla 2. Modelos seleccionados y métricas LOOCV y formulación de los modelos seleccionados

Especie/ formación	Modelo	R2 ; RMSE	Ecuación
Tagasaste	RF	0.69; 17.56	Todos los índices y un mtry=10.
Brezo	RLM	0.38; 10.16	HCV = -33.66 + 184.06 * NMDI + 626.46 * TCARI + -57.79 * VARI
Pinar conjunto	LMM	0.44; 20.93	HCV = 51.088 + 139.274 * NDWI + 41.136 * Especie + u + ε
Matorral	RF	0.63; 16.97	Todos los índices y un mtry=9

3.4. Aplicación a zona de incendio: caso Arafo

Dado que el tagasaste fue el conjunto de datos que mostró resultados con mayor capacidad predictiva, se testeó su modelo RF en tres localizaciones de este matorral dentro del incendio de Arafo. Analizando la evolución HCV predicha en los tres meses previos a la ocurrencia del incendio.

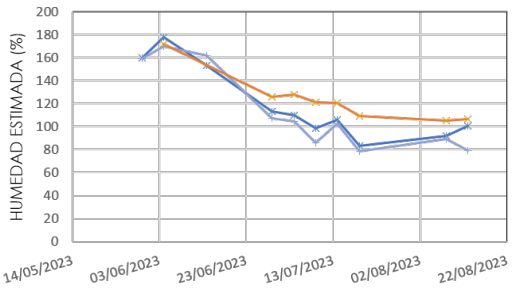


Figura 3. Humedad estimada mediante RF en tagasaste durante meses previos a la ocurrencia del incendio de Arafo (15 agosto 2023).

Se observa una fase inicial con valores altos y un descenso sostenido durante junio y primera mitad de julio. A finales de julio se registra el mínimo más marcado, con valores de HCV predicha de hasta ~80–85% en una de las ubicaciones (Figura 3).

3.5. Discusión de los resultados

Los resultados muestran una dinámica diferenciada por tipo de cobertura. Tagasaste y el brezo presentan una variabilidad temporal acusada, el pino canario muestra rangos de HCV mucho más estables. Esta mayor inercia hídrica en las masas arbóreas frente a las formaciones de matorral es un patrón observado en ambientes mediterráneos. El índice NMDI destacó como el predictor más sólido globalmente y para tagasaste. Investigaciones previas, entre otras la de Marino *et al*. 2024 también encontraron relaciones con este índice de vegetación y HCV. No obstante, en el brezo, el NMDI se mantuvo estable a pesar del descenso medido en campo.

4. DISCUSIÓN

Este estudio demuestra la viabilidad de monitorizar la HCV en Tenerife mediante datos de campo y Sentinel-2, destacando los modelos Random Forest y el índice NMDI. La estabilidad observada en el pinar frente a la sensibilidad del matorral subraya la importancia de consolidar una red de seguimiento permanente. Solo ampliando la serie temporal se podrá determinar si las anomalías detectadas se deben a rasgos funcionales de la vegetación o a limitaciones técnicas del sensor sobre el terreno volcánico. Estos avances fortalecerán los sistemas de alerta temprana y la gestión del riesgo de incendio en la región macaronésica.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación y el liderazgo del Servicio Técnico Forestal del Cabildo de Tenerife. Y a la ayuda PTQ2024-013817 otorgada por el MICIU/AEI/10.13039/501100011033 a Esther Peña.

6. REFERENCIAS

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Domenech Agenjo, O., Cardona Ametller, C., Ribas Costa, V., & De Simón Bañón, E. (2022). Estudio de la evolución de la humedad del combustible fino vivo en un ámbito forestal mediterráneo insular (Illes Balears). *Actas del 8º Congreso Forestal Español (8CFE)* (Resumen 209).

Marino, E., Yebra, M., Guillén-Climent, M., Algeet, N., Tomé, J. L., Madrigal, J., Guijarro, M., & Hernando, C. (2020). Investigating live fuel moisture content estimation in fire-prone shrubland from remote sensing using empirical modelling and RTM simulations. *Remote Sensing, 12*(14), Article 2251. https://doi.org/10.3390/rs12142251

Marino, E., Yáñez, L., Guijarro, M., Madrigal, J., Senra, F., Rodríguez, S., & Tomé, J. L. (2024). Transferability of empirical models derived from satellite imagery for live fuel moisture content estimation and fire risk prediction. *Fire, 7*(8), Article 276. https://doi.org/10.3390/fire7080276 .

Yebra *et al*. (2024) Globe-LFMC 2.0, an enhanced and updated dataset for live fuel moisture content research. *Scientific Data 11*:332.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.212

Aplicación de la teledetección y los modelos de aprendizaje automático para la detección y seguimiento de daños causados por la banda marrón (*Lecanosticta acicola*) en masas de *Pinus radiata* en Euskadi

Martín-Molina, David [1] **Pugni-Stanek, Tomás** [1] **Merino-de-Miguel, Silvia** [1]

[1] ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural (Universidad Politécnica de Madrid) C/ José Antonio Novais, 10 Madrid 28040, España

ORCID: Martín-Molina 0009-0002-5746-348X Pugni-Stanek 0009-0000-2527-1657 Merino-de-Miguel 0000-0002-4764-5311

Correspondencia: dav.m.molina@gmail.com tomas.pugni@upm.es silvia.merino@upm.es

RESUMEN

Ante los daños persistentes sobre Pinus radiata ocasionados por la enfermedad de la banda marrón en Euskadi, la teledetección se presenta como una herramienta fundamental. Este trabajo explora la capacidad de los modelos de aprendizaje automático basados en datos Sentinel-2 para su monitorización. Se desarrolló un modelo Random Forest de clasificación para detectar los daños ocasionados según cuatro niveles de defoliación observada. La muestra de píxeles verdad-terreno se clasificó sobre ortofotografías de 25cm, calculándose como predictores un conjunto de índices de vegetación, así como variables topográficas. El modelo resultante quedó definido por tres índices, suficientes para un rendimiento del modelo estable con una precisión del 70%. Destacó su capacidad de identificar correctamente las clases extremas, sano y grave, en contraposición con la confusión en las clases intermedias, leve y moderado. Estos resultados son coherentes con la defoliación progresiva de los árboles afectados, lo que se traduce en un solape espectral entre los niveles de defoliación. Sin embargo, se ven penalizados por la decisión de definir una primera clase (sano) restrictiva, donde sólo se incluyeron píxeles sin afección. Estos resultados apuntan al potencial de los materiales y métodos empleados para aplicaciones futuras al seguimiento del estado de salud del pino.

Palabras clave: *Pinus radiata, Sentinel-2, Random Forest, salud forestal*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Aplicación de la teledetección y los modelos de aprendizaje automático para la detección y seguimiento de daños causados por la banda marrón (*Lecanosticta acicola*) en masas de *Pinus radiata* en Euskadi

Martín-Molina, David [(1)], Pugni-Stanek, Tomás [(1)], Merino-de-Miguel, Silvia [(1)]

[(1)] ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural (Universidad Politécnica de Madrid),Madrid, España.
0009-0002-5746-348X, dav.m.molina@gmail.com ; 0009-0000-2527-1657, tomas.pugni@upm.es.
0000-0002-4764-5311, silvia.merino@upm.es

Resumen: Ante los daños persistentes sobre *Pinus radiata* ocasionados por la enfermedad de la banda marrón en Euskadi, la teledetección se presenta como una herramienta fundamental. Este trabajo explora la capacidad de los modelos de aprendizaje automático basados en datos Sentinel-2 para su monitorización. Se desarrolló un modelo *Random Forest* de clasificación para detectar los daños ocasionados según cuatro niveles de defoliación observada. La muestra de píxeles verdad-terreno se clasificó sobre ortofotografías de 25cm, calculándose como predictores un conjunto de índices de vegetación, así como variables topográficas. El modelo resultante quedó definido por tres índices, suficientes para un rendimiento del modelo estable con una precisión del 70%. Destacó su capacidad de identificar correctamente las clases extremas, sano y grave, en contraposición con la confusión en las clases intermedias, leve y moderado. Estos resultados son coherentes con la defoliación progresiva de los árboles afectados, lo que se traduce en un solape espectral entre los niveles de defoliación. Sin embargo, se ven penalizados por la decisión de definir una primera clase (sano) restrictiva, donde sólo se incluyeron píxeles sin afección. Estos resultados apuntan al potencial de los materiales y métodos empleados para aplicaciones futuras al seguimiento del estado de salud del pino.

Palabras clave: *Pinus radiata*, Sentinel-2, Random Forest, salud forestal

Application of remote sensing and machine learning models for the detection and monitoring of damage caused by brown spot needle bligh (Lecanosticta acicola) in Pinus radiata stands in the Basque Country

***Abstract**: Given the persistent damage on Pinus radiata caused by the disease of the brown spot needle bligh in the Basque Country, remote sensing emerges as an essential monitoring tool. This study examines the potential of machine learning models based on Sentinel-2 data for monitoring it. A Random Forest classification model was developed to detect damage according to four levels of observed defoliation. The sample of ground-truth pixels was classified based on 25cm orthophotographs, calculating as predictors a set of vegetation indices and topographic variables. The resulting model was defined by three indices, which are enough for stable model performance of 70% accuracy. It stood out for its ability to successfully identify the extreme categories, healthy and severe, as opposed to the confusion in the intermediate categories, mild and moderate. These results are consistent with the progressive defoliation of the affected trees, which leads to spectral overlapping between the defoliation levels. However, they are negatively affected by the decision to establish a restrictive category (healthy), which only included unaffected pixels. The findings suggest the potential of the materials and methods used for future forest pine health applications.*

***Keywords**: Pinus radiata, Sentinel-2, Random Forest, forest health.*

1. INTRODUCCIÓN

La enfermedad de la banda marrón causada por el hongo *Lecanosticta acicola* es una de las micosis que forman parte de las denominadas bandas del pino. La infección se produce tras la germinación de las esporas asexuales, las cuales acceden a las acículas a través de los estomas. Las condiciones necesarias para que se produzca son una humedad relativa elevada (>75%), acompañada de altas temperaturas (Mesanza *et al*., 2021). El momento de máxima infección ocurre entre mayo y agosto. El hongo actúa en primer lugar generando manchas amarillentas de 1 a 3,5 mm en las acículas, las cuales terminan por ensancharse hasta que rodean completamente la acícula ocasionando la muerte de la parte distal. Las infecciones más intensas junto con la sucesión de episodios que se producen de manera continuada durante varios años pueden derivar en la

pérdida de ramillos, de parte de la copa o incluso causar la muerte del árbol (Muñoz López *et al*., 2011).

La región más afectada por esta enfermedad hasta el momento ha sido Euskadi. Se estima que unas 40 000 hectáreas se vieron afectadas por el agresivo brote ocurrido en el año 2018 (Bueso, 2018), y su presencia se ha hecho permanente en las masas se pino radiata de la región, afectando con diferente intensidad, pero de manera recurrente desde entonces. La expansión de la banda marrón sobre *Pinus radiata* en España alcanza toda la cornisa cantábrica. También ha sido detectada recientemente por primera vez en Cataluña durante labores de seguimiento de la banda roja en *Pinus nigra*.

Todas las especies del género *Pinus* de la península ibérica son susceptibles de verse afectadas por la banda marrón. Análisis realizados en países de nuestro entorno han confirmado su presencia sobre *Pinus halepensis, P. nigra, P. sylvestris* y *P. uncinata*, así como en varias de las especies no nativas presentes en España (EPPO, n.d.). Por tanto, pese a que no hay reportes de presencia confirmada sobre *Pinus pinea* y *Pinus pinaster*, el potencial de propagación de la enfermedad es elevado y los efectos sobre los pinos locales aún desconocidos.

La teledetección, a través de la utilización de datos abiertos del programa Copernicus, representa una oportunidad para la monitorización del estado sanitario de los bosques, permitiendo el desarrollo de sistemas de seguimiento y predicción de la evolución de los bosques. El presente trabajo tiene como objetivo aplicar la teledetección al desarrollo de un modelo de *Random Forest* para la detección de la defoliación causada por la banda marrón y la clasificación de la superficie de pino radiata según el nivel de daño, evaluando y cuantificando la incidencia en Euskadi entre los años 2018 y 2024.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló tomando como localización Euskadi (España), empleando para el entrenamiento la provincia de Gipuzkoa y aplicando el modelo a la comunidad autónoma en su conjunto (Fig. 1).



Figura 1. Área de estudio. Fuente: elaboración propia a partir del MFCAE.

La superficie considerada se corresponde con la superficie forestal ocupada por *Pinus radiata*. Esta especie, según datos oficiales para el año 2018, se extendía sobre 117 582 hectáreas, representando aproximadamente el 30% de la superficie forestal arbolada de Euskadi (HAZI Fundazioa, 2018).

2.2. Materiales

La cartografía utilizada para determinar el área objetivo fueron las sucesivas actualizaciones anuales del Mapa Forestal de España (MFE25), publicadas como Mapa Forestal del País Vasco (MFCAE) por el Eusko Jaurlaritza / Gobierno Vasco (n.d.). A partir de esta fuente, se obtuvo la superficie ocupada por las teselas cuya especie principal fuera el *Pinus radiata* (SP1=28) para cada año dentro del periodo de estudio (2018-2024).

La información satelital se derivó del programa Copernicus de la Unión Europea, concretamente de las misiones Sentinel-2. Las imágenes empleadas fueron las de nivel de procesado L2A, el mayor disponible, seleccionadas a su vez por la ausencia de nubes. La franja temporal de las imágenes, septiembre-octubre, se estableció por su idoneidad para la evaluación de los efectos de la enfermedad por coincidir con el momento en el que se observa la mayor severidad de la banda marrón. Se utilizó una imagen de baja nubosidad Sentinel-2 para cada año estudiado entre 2018-2024.

Los atributos topográficos evaluados como posibles variables del modelo se extrajeron de los productos MDT (Modelo Digital del Terreno), pendientes y orientaciones de 25m de resolución espacial, de máxima actualidad, que proporciona el Gobierno Vasco a través del portal GeoEuskadi y a los que se accedió como datos WCS. Estos datos provienen de la Base Topográfica Armonizada del Gobierno Vasco realizada en 2009, cuyo origen de datos es el vuelo fotogramétrico del año 2008, y que se actualiza allí donde se detectan cambios significativos a partir del vuelo que se realiza anualmente.

Se recurrió a la misma fuente de información para la generación de la muestra de verdad-terreno, clasificada según distintos niveles de afección. Para ello, se emplearon las ortofotografías anuales color verdadero y falso color infrarrojo de 25 cm de píxel (Fig. 2). La captura de estas imágenes coincide también temporalmente con el momento deseado, ya que su adquisición es a lo largo del mes de septiembre.

2.3. Variables de entrada

La muestra verdad-terreno se obtuvo a partir de los píxeles centrales de 20 m contenidos en ventanas de 3 × 3 píxeles (60 × 60 m) completamente incluidas dentro de las teselas de *Pinus radiata* del MFCAE actualizado a 2018, y localizadas exclusivamente en la provincia de Gipuzkoa.

El tamaño de muestra inicial se estableció siguiendo las recomendaciones para modelos de *machine learning* de disponer de un número mínimo de muestras por cada clase y variable considerada en el modelo. Utilizando un muestreo piloto para determinar la existencia o no de fuerte desbalanceo entre clases. Ello quedó descartado y se estableció, siendo conservadores, un valor “k” de 75 en la Ecuación 1.

$$n = \text{k x nº clases x nº predictores} \quad (1)$$

Esta muestra de píxeles se clasificó en cuatro niveles de afección según la defoliación observada dentro del píxel de 20x20m en la ortofotografía: sano (0%), leve (0-20%), moderado (20-60%) y grave (>60%) (Fig. 2). Se filtraron las nubes según la banda SCL (*Scene Classification*) de Sentinel-2, y se emplearon sólo aquellos píxeles con presencia de vegetación arbórea y sin elementos artificiales, caminos o construcciones.

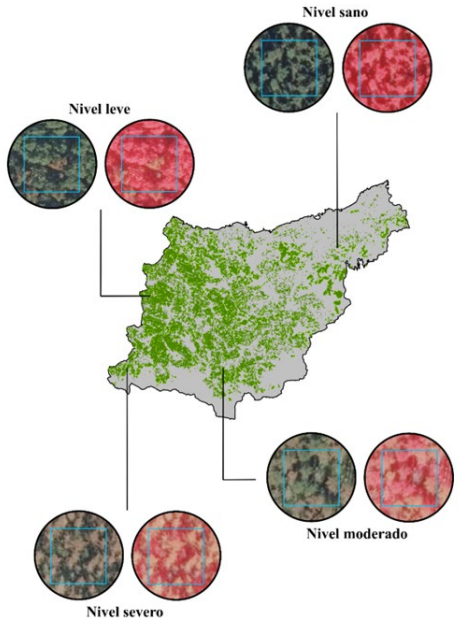


Figura 2. Ejemplos del criterio visual de clasificación: nivel sano, leve, moderado y severo sobre ortofotografía color natural y falso color infrarrojo.

Las variables consideradas fueron todas las bandas de Sentinel-2 MSI disponibles a 20 m de resolución espacial de la tesela 30TWN para la fecha 26-09-2018, las características topográficas y geográficas de cada píxel (altitud, pendiente, orientación y latitud) y los índices de vegetación: NDVI, NDRE, CI green, CCCI, EVI, NDMI, MSI, GVMI, NBR2, SIPI, PRI, TCARI, MCARI CI re, PSRI, NBR y MSAVI2, según las expresiones recogidas en la Index DataBase (Henrich *et al*., s.f.). El entrenamiento se llevó a cabo únicamente en 2018.

2.4. Modelo *Random Forest*

El modelo de clasificación elegido fue *Random Forest* (RF), propuesto por Breiman (2001). Se desarrolló a través del código programado en Python utilizando la librería *Scikit learn v1.8.0*, así como otras librerías complementarias para la preparación de los datos. Pese a que RF no es sensible a la multicolinealidad de las variables, éstas fueron sometidas a un proceso de preselección basado en el cálculo del coeficiente de correlación de Spearman, estableciéndose un umbral de 0.95. Sin embargo, la decisión final de incorporar al modelo una variable predictora fue coherente con evitar la redundancia espectral sin reducir la información disponible, evitando comprometer la interpretabilidad del modelo.

Se entrenó un primer modelo con las restantes variables. Este proceso de entrenamiento incluyó la optimización de los hiperparámetros críticos del modelo utilizando el método *RandomizedSearchCV*. Este procedimiento permitió determinar la combinación que maximizaba el rendimiento del modelo en términos de *F1-macro*, es decir, aquella que mejor detectara correctamente todas las clases asignando la misma relevancia a todas ellas.

El algoritmo ofrece una medida de la influencia de cada variable en las predicciones del modelo, denominada importancia, calculada como la reducción media del índice de Gini. Con esta medida, es posible establecer a partir de qué número de variables el rendimiento del modelo se estabiliza, y la incorporación de nuevas variables no redunda en una mejora significativa o incluso aporta ruido. Así se determinó el número definitivo de variables y se repitió el proceso de optimización de hiperparámetros ya que algunos son sensibles al número de predictores.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La muestra verdad-terreno definitiva contó con 3500 píxeles válidos para el desarrollo del modelo, tras desechar los que no cumplían con las condiciones mínimas de calidad. Dicha muestra se distribuyó por niveles tal y como muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Resultado del muestreo

Nivel de afección	Nº píxeles
Sano	781 (22,3%)
Leve	723 (20,7%)
Moderado	1002 (28,6%)
Grave	994 (28,4%)

El modelo RF quedó definido por los hiperparámetros optimizados y un total de tres variables a partir del cual su rendimiento se estabilizaba, tal y como se muestra en la Figura 3. Dichas variables fueron los índices de vegetación SIPI, NDGI y GVMI, en orden de importancia.

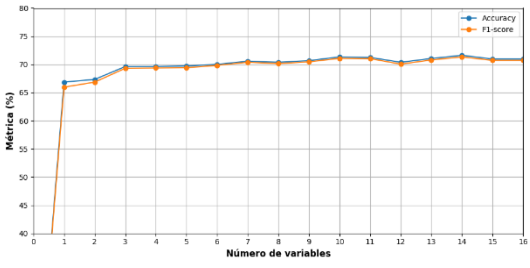


Figura 3. Influencia del número de variable en el rendimiento

El modelo RF, tal y como refleja la Figura 4, tiene un buen desempeño en las clases extremas, sano y grave, las cuáles además son perfectamente separables entre sí. Sin embargo, se diluye en las intermedias especialmente en la clase leve. Ello es coherente con la naturaleza gradual del proceso de infección, ya que las clases

establecidas representan un fenómeno continuo, y los resultados son el reflejo del solape espectral entre las clases. Al mismo tiempo refleja las limitaciones del modelo para la detección temprana de la infección. Por ese motivo algunos estudios equivalentes unifican en una clase los niveles sano y leve (Sun et al., 2025).

	Sano	Leve	Moderado	Grave
Sano	175	45	13	1
Leve	59	108	47	3
Moderado	7	40	202	52
Grave	0	4	44	250

	Sano	Leve	Moderado	Grave	Media	Media ponderada
Precision	0,726	0,548	0,660	0,817	0,688	**0,696**
Recall	0,748	0,498	0,671	0,839	0,689	**0,700**
F1-score	0,737	0,522	0,666	0,828	0,688	**0,698**

Accuracy	**0,700**

Figura 4. Matriz de confusión

Se realizó una comparación a nivel de píxel de los resultados obtenidos para el año 2021, con los facilitados por Hazi Fundazioa. Su metodología, basada en valores de NBR, contempla una división también por porcentaje de daño, pero con diferentes umbrales entre clases. Existiendo una equivalencia directa con la clasificación propuesta en este trabajo. Siendo: Sano + Leve = Tipo 5 (0-20%); Moderado = Tipo 4-3 (20-60%); y Grave = Tipo 2-1 (>60%). Este análisis reflejó una coincidencia espacial entre ambos métodos del 56%, produciéndose la mayor parte de las discrepancias en las clases que el modelo tiende a confundir, las intermedias.

El modelo finalmente sirvió para clasificar la superficie afectada por la banda marrón en masas de pino radiata en Euskadi durante el periodo 2018-2025. La Tabla 2 muestra la distribución por provincias.

Tabla 2. Evolución de la superficie afectada (ha)*

Año	Gipuzkoa	Bizkaia	Araba/Álava
2018	18819	21222	2711
2019	17708	17392	3548
2020	25736	33129	6869
2021	13832	18618	3208
2022	22640	34612	6858
2023	21220	31396	6202
2024	7100	7901	1607

*Superficie afectada incluye moderado y grave

Para la visualización del nivel de afección de la enfermedad fruto de la aplicación del modelo para todo Euskadi, se ha desarrollado el visor accesible a través del siguiente enlace: https://mmolina-david.github.io/Mapa-BandaMarron-Euskadi/

4. CONCLUSIONES

Mediante la aplicación de técnicas de aprendizaje automático utilizando datos Sentinel-2 MSI se consiguió desarrollar un modelo de clasificación para la banda marrón, el cual podría utilizarse para la identificación de superficies afectadas. No obstante, la definición propuesta en este estudio de los distintos niveles de afección debe tenerse en cuenta para una correcta interpretación de su rendimiento.

Una futura continuación de este trabajo podría abordar un calibrado de la manera en que se asignan los píxeles a uno u otro nivel de afección, durante la elaboración de la muestra en base a datos de campo. También se podría dirigir el estudio hacia otros modelos, otras fuentes de información satelital, ampliar el área de estudio a otras regiones afectadas o hacer uso de la información temporal lo que podría ayudar en la detección en fases tempranas y en la detección de estados intermedios.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la disponibilidad de datos abiertos del Inventario Forestal Nacional y del programa Copernicus de la Unión Europea. Así como al Eusko Jaurlaritza / Gobierno Vasco por hacer accesible la actualización anual del MFE25 para Euskadi, y por la disponibilidad de ortofotografías e información topográfica. Y en especial a Alejandro Cantero Amiano por compartir los resultados obtenidos para el año 2021, haciendo posible la comparación entre metodologías.

6. REFERENCIAS

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine learning, 45, 5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Bueso, G. (2018). Un tercio de los pinos del País Vasco, afectado por enfermedades fúngicas. Phytoma, 303.

EPPO (n.d.). EPPO Global Database. Retrieved May 15, 2025, https://gd.eppo.int/

Eusko Jaurlaritza / Gobierno Vasco. (n.d.). Mapa Forestal del País Vasco. https://www.euskadi.eus/mapa-forestal-del-pais-vasco/web01-a3ingair/es/

HAZI Fundazioa (2018). El bosque vasco en cifras 2018. http://www.nasdap.net/inventarioforestal

Henrich, V., Krauss, G., Götze, C., & Sandow, C. (s. f.). Index-Database: A database for remote sensing indices. Recuperado el 20 de octubre de 2025, de https://www.indexdatabase.de/

Mesanza, N., García-García, D., Raposo, E. R., Raposo, R., Iturbide, M., Pascual, M. T., Barrena, I., Urkola, A., Berano, N., de Zerain, A. S., & Iturritxa, E. (2021). Weather variables associated with spore dispersal of lecanosticta acicola causing pine needle blight in Northern Spain. *Plants, 10*(12). https://doi.org/10.3390/plants10122788

Muñoz López, C., Pérez Fortea, V., Cobos Suárez, P., Hernández Alonso, R., & Sánchez Peña, G. (2011). Sanidad forestal (3.a ed. rev.). Ediciones Mundi-Prensa.

Sun, G., Huang, X., Dashzebeg, G., Ariunaa, M., Bao, Y., Bao, G., Tong, S., Dorjsuren, A., & Davaadorj, E. (2025). Discrimination of larch needle pest severity based on Sentinel-2 super-resolution and spectral derivatives—A case study of Erannis jacobsoni Djak. *Forests, 16*(1), 88. https://doi.org/10.3390/f16010088

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.213

Ampliación del Gemelo Digital del Mar Menor al Territorio Regional: Metodología y Resultados Iniciales

Navarro frutos, Alvaro [1] **Erena Arrabal, Manuel** [2] **Cabrera Díez, Marina** [1] **López Andreu, Francisco Javier** [2] **Lóez Morales, Juan Antonio** [2] **Sanchez Alcaraz, Marta** [2]

[1] ESRI, España

[2] IMIDA, España

ORCID: Navarro frutos 0000-0001-7891-8717 Erena Arrabal 0000-0003-0335-2274 Cabrera Díez 0009-0002-7428-6219 López Andreu 0000-0002-4808-8940 Lóez Morales 0000-0002-7930-6680 Sanchez Alcaraz 0000-0001-7024-5570

Correspondencia: alvaro.navarro@esri.es manuel.erena@carm.es marina.cabrera@esri.es franciscoj.lopez26@carm.es juanantonio.lopez@carm.es marta.sanchez3@carm.es

RESUMEN

Los gemelos digitales territoriales se han consolidado como una herramienta estratégica para la gestión ambiental, la planificación urbana y la toma de decisiones informadas. En 2024 se construyó un primer gemelo digital centrado en el Mar Menor y su cuenca vertiente, integrando datos LiDAR, cartografía catastral y modelos de peligrosidad por inundación fluvial. A partir de estos se generó un modelo 3D del territorio, transformando la nube de puntos clasificada en un modelo digital de elevaciones y extruyendo ~273.000 edificaciones. Este entorno 3D permitió un análisis preliminar de afectación por escenarios de inundación sobre la infraestructura edificada. En 2026 se aborda una ampliación sustancial del alcance: la creación del Gemelo Digital de la Región de Murcia, que abarca todo el territorio y 1.356.000 edificaciones. El objetivo principal es construir una réplica virtual regional que integre diferentes fuentes de datos geoespaciales, visualizar el territorio en 3D mediante servicios web y habilitar capacidades analíticas, sentando las bases para futuros módulos avanzados de simulación. La plataforma será desplegada en ArcGIS Enterprise, con una arquitectura diseñada para garantizar escalabilidad, interoperabilidad y mantenimiento a largo plazo. El proyecto incluye la configuración de la infraestructura, la carga y publicación de datasets 2D y 3D, la implementación de aplicaciones web y visores 3D. Este artículo describe el proceso metodológico, los retos técnicos y los primeros resultados obtenidos en el desarrollo del gemelo digital regional, destacando su potencial como herramienta estratégica para la transformación digital del territorio murciano.

Palabras clave: *Gemelo Digital, 3D SIG, LiDAR, Catastro, Mapas de peligrosidad*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Ampliación del Gemelo Digital del Mar Menor al Territorio Regional: Metodología y Resultados Iniciales

Navarro frutos, Alvaro [(1)], Erena Arrabal, Manuel [(2)], Cabrera Díez, Marina [(1)], López Andreu, Francisco Javier [(2)], Lóez Morales, Juan Antonio [(2)], Sanchez Alcaraz, Marta [(2)]

[(1)] ESRI, España.

0000-0001-7891-8717, alvaro.navarro@esri.es ; 0009-0002-7428-6219, marina.cabrera@esri.es

[(2)] IMIDA, España.

0000-0003-0335-2274, manuel.erena@carm.es ; 0000-0002-4808-8940, franciscoj.lopez26@carm.es

0000-0002-7930-6680, juanantonio.lopez@carm.es. ; 0000-0001-7024-5570, marta.sanchez3@carm.es

Resumen: Los gemelos digitales territoriales se han consolidado como una herramienta estratégica para la gestión ambiental, la planificación urbana y la toma de decisiones informadas. En 2024 se construyó un primer gemelo digital centrado en el Mar Menor y su cuenca vertiente, integrando datos LiDAR, cartografía catastral y modelos de peligrosidad por inundación fluvial. A partir de estos se generó un modelo 3D del territorio, transformando la nube de puntos clasificada en un modelo digital de elevaciones y extruyendo ~273.000 edificaciones. Este entorno 3D permitió un análisis preliminar de afectación por escenarios de inundación sobre la infraestructura edificada. En 2026 se aborda una ampliación sustancial del alcance: la creación del Gemelo Digital de la Región de Murcia, que abarca todo el territorio y 1.356.000 edificaciones. El objetivo principal es construir una réplica virtual regional que integre diferentes fuentes de datos geoespaciales, visualizar el territorio en 3D mediante servicios web y habilitar capacidades analíticas, sentando las bases para futuros módulos avanzados de simulación. La plataforma será desplegada en ArcGIS Enterprise, con una arquitectura diseñada para garantizar escalabilidad, interoperabilidad y mantenimiento a largo plazo. El proyecto incluye la configuración de la infraestructura, la carga y publicación de datasets 2D y 3D, la implementación de aplicaciones web y visores 3D. Este artículo describe el proceso metodológico, los retos técnicos y los primeros resultados obtenidos en el desarrollo del gemelo digital regional, destacando su potencial como herramienta estratégica para la transformación digital del territorio murciano.

Palabras clave: Gemelo Digital, 3D SIG, LiDAR, Catastro, Mapas de peligrosidad

Scaling the Mar Menor Digital Twin to the Regional Territory: Methodology and Initial Results

***Abstract**: Territorial digital twins have become a strategic tool for environmental management, urban planning, and informed decision-making. In 2024, an initial digital twin was developed focusing on the Mar Menor and its drainage basin, integrating LiDAR data, cadastral cartography and fluvial flood hazard models. From these datasets, a 3D model of the territory was generated, transforming the classified point cloud into a digital elevation model and extruding approximately 273,000 buildings. This 3D environment enabled a preliminary assessment of flood-scenario impacts on built infrastructure. In 2026, a major expansion of the project was launched: the creation of the Digital Twin of the Region of Murcia, covering the entire regional territory and 1,356,000 buildings. The main objective is to construct a regional-scale virtual replica that integrates multiple geospatial data sources, provides 3D visualization through web services, and enables analytical capabilities, laying the foundation for future advanced simulation modules. The platform will be deployed on ArcGIS Enterprise, with an architecture designed to ensure scalability, interoperability, and long-term maintainability. The project includes infrastructure configuration, ingestion and publication of 2D and 3D datasets, and the implementation of web applications and 3D viewers. This article describes the methodological workflow, technical challenges, and preliminary results obtained during the development of the regional digital twin, highlighting its potential as a strategic tool for the digital transformation of the Murcia territory.*

***Keywords**: Digital Twin, 3D GIS, LiDAR, Cadastre, Hazard Maps*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los avances en teledetección, cartografía 3D y tecnologías SIG han impulsado la consolidación de gemelos digitales territoriales concebidos no solo como modelos 3D del entorno, sino como herramientas estratégicas de apoyo a la toma de decisiones. Estos sistemas permiten integrar grandes volúmenes de datos geoespaciales, analizar escenarios alternativos y facilitar la planificación territorial y ambiental. En paralelo, numerosos trabajos han demostrado la utilidad de tratamiento de los datos LiDAR y catastrales para zonas urbanas; en el caso de la región de Murcia, estudios como el de Miranda (2021) han puesto de manifiesto la utilidad de los modelos 3D en la gestión urbana.

Sobre esta base científica y tecnológica, el Observatorio del Mar Menor (OMM) desarrolló un primer gemelo digital orientado a integrar múltiples fuentes de información ambiental y territorial. Este sistema combinó teledetección, sensores IoT, modelos atmosféricos, hidrológicos superficial y subterráneos, e hidrodinámica lagunar, junto con una representación 3D detallada del territorio basada en datos LiDAR y cartografía catastral. La integración de estos componentes permitió generar una representación coherente y operativa del ecosistema, empleada para visualizar escenarios, apoyar la monitorización continua y proporcionar información relevante para la toma de decisiones en un entorno ambiental especialmente complejo.

El proyecto actual extiende específicamente la componente 3D desarrollada en el ámbito del Mar Menor al conjunto de la Región de Murcia, ampliando de forma significativa la escala territorial, el volumen de datos y la complejidad del modelado. A diferencia de la fase anterior, centrada en integrar modelos ambientales acoplados, esta ampliación se focaliza en la construcción de una infraestructura regional de datos 3D, orientada a soportar visualización avanzada, análisis territoriales básicos y la futura incorporación de nuevas fuentes y módulos de simulación. De este modo, el gemelo digital regional se concibe desde su diseño como una plataforma escalable, preparada para integrar datos oficiales de actualización periódica, incorporar aplicaciones temáticas y servir como base para herramientas de análisis y apoyo a la decisión en el ámbito de la gestión territorial, la planificación urbana y la evaluación de riesgos. El objetivo general del proyecto consiste en construir una réplica virtual regional que permita integrar y visualizar en 3D la información geoespacial relevante para la Región de Murcia. De forma específica: (i) integrar diversas fuentes oficiales (LiDAR, Catastro y cartografía temática); (ii) generar un modelo 3D regional mediante la creación de un MDE y la extrusión de 1.356.000 edificaciones; (iii) publicar servicios web 2D y 3D y desarrollar visores interactivos y (iv) sentar las bases metodológicas para la futura incorporación de capacidades avanzadas de simulación y análisis.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos de entrada

A continuación, se detallan los datos de entrada empleados como base del flujo de procesamiento geoespacial y generación del modelo 3D (Tabla 1). Todas las operaciones y herramientas de tratamiento de datos se ejecutaron en ArcGIS Pro 3.6, incluyendo la importación masiva de la cartografía catastral mediante la extensión Data Interoperability (integración FME), utilizada para automatizar y unificar la conversión y preparación de los datasets originales.

Tabla 1. Datos de entrada utilizados para la generación del modelo 3D.

Tipo de dato	Fuente	Características
Ráster de inundaciones	Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI)	Períodos de retorno de 10, 100 y 500 años. 218 archivos, 100 GB.
Archivos LAS	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	Región de Murcia. 3152 archivos, 424 GB.
Feature Layers	Servicios INSPIRE – Dirección General del Catastro	~1.356.000 de entidades

2.2. Generación del modelo 3D del territorio

La construcción del modelo tridimensional se inició con la creación de un LAS Dataset que integra la totalidad de la 2ª cobertura LiDAR disponible para la Región de Murcia, proporcionada por el IGN.

A partir del LAS Dataset regional, y utilizando únicamente las clases de puntos correspondientes a suelo (*ground*) y edificaciones (*buildings*), se generaron varias superficies de elevación mediante interpolación ráster. Estas superficies constituyen la base del proceso de modelización 3D: (1) Modelo Digital del Terreno (DTM), (2) Modelo Digital de Superficie (DSM), Modelo Digital de Superficie Normalizado (nDSM) y (4) Ráster *Level of Detail 2* (LOD2).

A partir del DTM, DSM, nDSM y LOD2 se calcularon los atributos necesarios para la modelización 3D de las edificaciones. Para cada huella catastral se calcularon los siguientes campos (BASEELEV, BLDGHEIGHT, EAVEHEIGHT, ROOFFORM y ROOFDIR), donde BASEELEV corresponde a la cota del terreno bajo la edificación, BLDGHEIGHT a la altura total estimada a partir del nDSM, EAVEHEIGHT a la altura del tejado, ROOFFORM al tipo de cubierta (plana, a dos aguas, a cuatro aguas o inclinada) y ROOFDIR indica la orientación dominante de la pendiente del tejado (Figura 1).

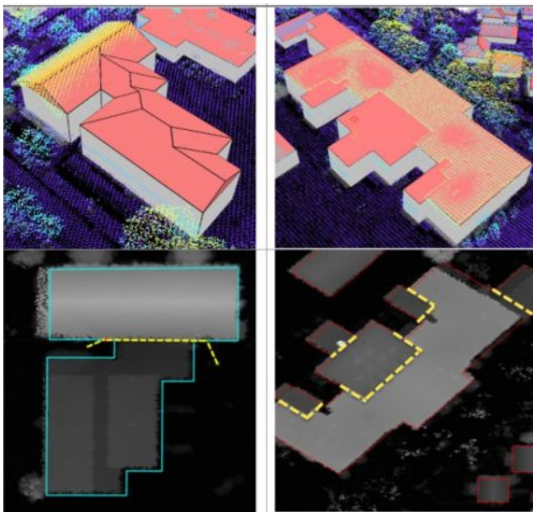


Figura 1. Ejemplo del proceso de modelización 3D a partir de datos LiDAR y cartografía catastral (arriba). Caracterización de cubiertas según la pendiente del DSM (abajo). Fuente: Esri.

Con estos atributos, se aplicó una regla procedimental para generar la geometría tridimensional de los edificios, reproduciendo cubiertas planas, a dos aguas, a cuatro aguas o inclinadas según los valores de forma y orientación calculados.

2.3. Análisis básico de inundabilidad

Se prepararon los rásters de inundación a partir de los datos del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) correspondientes a los tres escenarios de peligrosidad (T10, T100 y T500). Estos datos se diferenciaron en: rásteres de profundidad de inundación y rásteres que representan la cota absoluta de la lámina de agua, *Water Surface Elevation* (WSE). Esta diferenciación permitió procesarlos de forma conjunta y visualizar los escenarios como superficies 3D coherentes con el modelo digital del terreno. Además, para cada edificio se interpoló el valor de inundación asociado a cada uno de los tres escenarios, incorporando esta información como atributos adicionales de la capa de edificaciones, y clasificándolos en categorías de riesgo alto, medio y bajo. Esto permitió evaluar de forma preliminar la afectación potencial de las edificaciones ante distintos niveles de peligrosidad, replicando y ampliando el procedimiento aplicado previamente en el ámbito del Mar Menor.

2.4. Arquitectura, publicación y análisis

La solución se despliega sobre ArcGIS Enterprise 11.5, en una arquitectura corporativa que integra varios servidores, bases de datos y seguridad. Sobre esta base, se publican servicios 2D y 3D (map, feature y scene services - 3D tiles) y se configuran escenas web y aplicaciones 3D, permitiendo la gestión de capas y herramientas de análisis, consulta y medición.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos confirman la viabilidad técnica de escalar el núcleo 3D desarrollado inicialmente en el Mar Menor y su cuenca vertiente al conjunto de la Región de Murcia, generándose un MDE regional continuo a partir de la 2ª cobertura LiDAR, gracias al cual se generaron los rásteres derivados DSM, nDSM y LOD2 necesarios para la reconstrucción 3D. Sobre esta base, se ha completado la extrusión preliminar de más de un millón de edificaciones (Figura 2), calculando automáticamente los atributos altimétricos y morfológicos para obtener una representación LOD2 homogénea a escala regional.



Figura 2. Distribución de la densidad de edificaciones en la Región de Murcia mediante teselado hexagonal; se destaca en naranja el ámbito del proyecto inicial (Fase 1 – OMM). Fuente: Elaboración propia.

Estos datos se han publicado como Scene Layers en ArcGIS Enterprise, logrando tiempos de carga y navegación adecuados en visores web 3D y garantizando la interoperabilidad con servicios 2D y 3D existentes. Asimismo, se han realizado primeras evaluaciones de afectación por inundación empleando los escenarios oficiales, verificando la capacidad del gemelo digital para soportar análisis territoriales. El comportamiento de la plataforma se ha validado mediante pruebas de integración y rendimiento, confirmando la estabilidad del sistema y la correcta visualización en entorno web de la cartografía 3D (Figura 3), así como la idoneidad de la arquitectura para ampliaciones futuras.



Figura 3. Visualización 3D del análisis básico de inundación, mostrando las edificaciones afectadas y el escenario de inundación T500. Fuente: Elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que la ampliación del gemelo digital 3D del Mar Menor y su cuenca vertiente al conjunto de la Región de Murcia es técnicamente viable y comparable a desarrollos recientes de gemelos digitales territoriales que combinan LiDAR, 3D GIS y servicios web para análisis ambientales, como los descritos en Ranatunga *et al*. (2024) sobre el uso Gemelos Digitales-GIS en la toma de decisiones geoespaciales. No obstante, uno de los retos principales del proyecto es la desincronización temporal entre datasets, dado que la segunda cobertura LiDAR (2015–2021) no refleja adecuadamente la evolución del parque edificatorio hasta la fecha más reciente disponible en Catastro (diciembre de 2025), lo que genera inconsistencias en las edificaciones más recientes. La incorporación futura de la tercera cobertura LiDAR del IGN (2022–2025) permitirá mejorar significativamente la alineación entre la geometría del terreno, las alturas edificadas y el parcelario actualizado, aumentando la fidelidad del modelo regional.

En relación con los rásteres de inundación empleados, es importante señalar que, si bien los escenarios T10, T100 y T500 del SNCZI proporcionan una base homogénea y oficialmente estandarizada para el análisis preliminar, presentan limitaciones debido a la resolución de los modelos. Su uso debe interpretarse como una aproximación conservadora del alcance potencial de la lámina de agua. Asimismo, la integración de estos rásteres con el modelo 3D revela que pequeñas variaciones en la precisión altimétrica —especialmente en zonas urbanas densas— pueden influir en la identificación puntual de edificaciones afectadas. Aun así, el empleo conjunto de las superficies WSE y de profundidad de inundación permitió estructurar un análisis coherente a escala regional y asignar un nivel de riesgo a cada edificio (alto, medio o bajo), sentando una base sólida para futuras evaluaciones más detalladas con modelos hidrodinámicos avanzados o con datos procedentes de la tercera cobertura LiDAR del IGN.

En conjunto, la plataforma resultante demuestra ser una solución robusta y escalable, proporcionando una base sólida para futuras ampliaciones analíticas y para la incorporación progresiva tanto de capacidades avanzadas de simulación ambiental como de nuevas fuentes de datos. No obstante, es importante señalar que el proyecto se encuentra todavía en fase de desarrollo. En esta etapa inicial, el trabajo se ha centrado en la construcción e integración de la infraestructura 3D, por lo que no se incluyen aún métricas cuantitativas de rendimiento ni comparativas explícitas con otros gemelos digitales regionales. La incorporación de nuevas fuentes y la estabilización de los flujos de procesado permitirán, en fases posteriores, llevar a cabo evaluaciones específicas sobre eficiencia y comparabilidad, reforzando así la interpretación y el posicionamiento del modelo regional dentro del contexto de los gemelos digitales territoriales.

5. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado ha permitido consolidar un modelo 3D regional coherente basado en datos oficiales de elevación y edificaciones, integrados en una infraestructura geoespacial unificada y operativa en ArcGIS Enterprise. La generación del MDE regional, la extrusión de las edificaciones y la publicación de Scene Layers proporcionan una base consistente para la visualización y el análisis 3D a escala territorial. Asimismo, la integración de los escenarios de inundación del SNCZI ha permitido estructurar un análisis preliminar de afectación, demostrando la capacidad del gemelo digital para soportar evaluaciones territoriales a diferentes escalas.

Más allá de estos resultados, la plataforma desarrollada se configura como un punto de partida abierto y escalable, preparado para incorporar nuevas fuentes oficiales, integrar datos temáticos adicionales y soportar la creación de aplicaciones de visualización, aplicaciones temáticas o soluciones específicas 2D y 3D orientadas a la gestión pública y a la toma de decisiones. En conjunto, el gemelo digital regional ofrece una infraestructura sólida y extensible sobre la que podrán construirse futuras capacidades analíticas y servicios avanzados, acompañando la evolución de las necesidades de gestión territorial de la Región de Murcia.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al IGN, a la Dirección General del Catastro, al SNCZI, al Observatorio del Mar Menor gestionado por el IMIDA por los datos utilizados en este trabajo y al Proyecto Ruraltech- Ecosistema emprendedor para un territorio rural y costero inteligente, financiado con fondos-NextGenerationEU en colaboración con la Agencia de Transformación Digital de la Región de Murcia -Fundación Integra.

7. REFERENCIAS

Miranda, Mónica (2021). Generación de Modelos Urbanos Tridimensionales con estándar CityGML. Thesis (Doctoral), E.T.S. Arquitectura (UPM). https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.67409

Esri España (2024) Gemelo Digital del Mar Menor: Caso de éxito IMIDA-Esri. https://www.esri.es/es-es/descubre-los-gis/casos-de-exito/medio-ambiente/2024/cs-gemelodigital-marmenor

Observatorio del Mar Menor (2024). Modelado integral del Mar Menor y su cuenca vertiente. https://sigdata.imida.es/omm/

Ranatunga, S., Ødegård, R. S., Onstein, E., & Jetlund, K. (2024). Digital twins for geospatial decision-making. ISPRS Annals of the Photogrammetry, R*emote Sensing and Spatial Information Sciences, X-4-2024*, 271–278. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-2024-271-2024

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.225

Creación de una base de datos de incendios extremos a escala global (2003-2022)

Solano-Romero, Erika [1] **Segura-Garcia, Carlota** [1] **Pettinari, M. Lucrecia** [1] **Khairoun, Amin** [1] **Torres-Vázquez, Miguel Ángel** [1] **Chuvieco, Emilio** [1]

[1] Universidad de Alcalá, España

ORCID: Solano-Romero 0009-0009-7040-1161 Segura-Garcia 0009-0001-8749-8360 Pettinari 0000-0002-7472-4373 Khairoun 0000-0002-5757-5126 Torres-Vázquez 0000-0001-8897-9337 Chuvieco 0000-0001-5618-4759

Correspondencia: erika.solano@uah.es carlota.segurag@uah.es mlucrecia.pettinari@uah.es amin.khairoun@uah.es miguela.torres@uah.es emilio.chuvieco@uah.es

RESUMEN

Los incendios extremos representan una amenaza significativa debido a sus impactos ambientales y sociales; sin embargo, su definición sigue siendo controversial en la literatura científica. En este estudio, desarrollado en el marco del proyecto X-Fires de la Agencia Espacial Europea (ESA), se generó una base de datos global de eventos de fuego extremo (EFEs) para el período 2003-2022. Para ello, se analizaron el área quemada (Burned Area, BA), obtenida del producto mensual FireCCI51, y la intensidad del fuego, estimada mediante el Fire Radiative Power (FRP) a partir del producto MCD14ML, ambos agregados mensualmente en una cuadrícula regular de 0.25° de resolución espacial. Los EFEs se definieron como aquellas celdas-mes que superaron simultáneamente dos desviaciones estándar en ambas variables dentro de regiones ecológicamente comparables basadas en biomas continentales. Se identificaron 19,951 EFEs, destacando 2010 como el año de mayor incidencia y 2013 como el de menor.

Palabras clave: *Incendios extremos, Área quemada, Intensidad del fuego, Eventos de Fuego Extremo*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Creación de una base de datos de incendios extremos a escala global (2003-2022)

Solano-Romero, Erika [(1)], Segura-Garcia, Carlota [(1)], Pettinari, M. Lucrecia [(1)], Khairoun, Amin [(1)], Torres-Vázquez, Miguel Ángel [(1)], Chuvieco, Emilio [(1)]

[(1)] Universidad de Alcalá, España.

0009-0009-7040-1161, erika.solano@uah.es ; 0009-0001-8749-8360, carlota.segurag@uah.es
0000-0002-7472-4373, mlucrecia.pettinari@uah.es ; 0000-0002-5757-5126, amin.khairoun@uah.es
0000-0001-8897-9337, miguela.torres@uah.es ; 0000-0001-5618-4759, emilio.chuvieco@uah.es

Resumen: Los incendios extremos representan una amenaza significativa debido a sus impactos ambientales y sociales; sin embargo, su definición sigue siendo controversial en la literatura científica. En este estudio, desarrollado en el marco del proyecto X-Fires de la Agencia Espacial Europea (ESA), se generó una base de datos global de eventos de fuego extremo (EFEs) para el período 2003-2022. Para ello, se analizaron el área quemada (Burned Area, BA), obtenida del producto mensual FireCCI51, y la intensidad del fuego, estimada mediante el Fire Radiative Power (FRP) a partir del producto MCD14ML, ambos agregados mensualmente en una cuadrícula regular de 0.25° de resolución espacial. Los EFEs se definieron como aquellas celdas-mes que superaron simultáneamente dos desviaciones estándar en ambas variables dentro de regiones ecológicamente comparables basadas en biomas continentales. Se identificaron 19,951 EFEs, destacando 2010 como el año de mayor incidencia y 2013 como el de menor.

Palabras clave: Incendios extremos, Área quemada, Intensidad del fuego, Eventos de Fuego Extremo.

Creation of a global database of extreme fires (2003-2022)

***Abstract**: Extreme wildfires represent a significant threat due to their environmental and social impacts; however, their definition remains controversial in the scientific literature. In this study, developed within the framework of the X-Fires project of the European Space Agency (ESA), a global database of extreme fire events (EFEs) was generated for the period 2003-2022. For this purpose, burned area (BA), obtained from the monthly FireCCI51 product, and fire intensity, estimated through Fire Radiative Power (FRP) from the MCD14ML product, were analyzed, both aggregated monthly on a regular grid with a spatial resolution of 0.25°. EFEs were defined as those month-cells that simultaneously exceeded two standard deviations in both variables within ecologically comparable regions based on continental biomes. A total of 19,951 EFEs were identified, with 2010 being the year of highest incidence and 2013 as the year with the lowest.*

***Keywords:** Extreme fires, Burned Area, Fire intensity, Extreme Fire Events*

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios extremos representan una amenaza creciente para los ecosistemas y la sociedad debido a sus efectos sobre la vegetación, los recursos hídricos, la criosfera y la salud humana (Bell *et al*., 2018; Bowman *et al*., 2020), además de su contribución al cambio climático mediante la emisión de gases de efecto invernadero y partículas (Bowman *et al*., 2020; Kelley *et al*., 2025; Peterson *et al*., 2021).

Aunque la superficie global quemada ha disminuido en las últimas décadas por cambios en el uso del suelo y la gestión humana (Andela *et al*., 2017), algunos autores han estimado un aumento en la frecuencia de incendios denominados extremos (Abatzoglou *et al*., 2025; Cunningham *et al*., 2024). Sin embargo, la ambigüedad en la definición de "incendio extremo", basada en criterios como tamaño, intensidad, comportamiento del fuego o resistencia al control (Bowman *et al*., 2017; Cunningham *et al*., 2024; Linley *et al*., 2022; Tedim *et al*., 2018), dificulta la comparación y la aplicación de criterios globales para su caracterización.

En este contexto, en el presente estudio se desarrolló una base de datos global de incendios extremos para el período 2003-2022, basada en observaciones satelitales de área quemada (BA) y potencia radiativa del fuego (FRP). Los eventos extremos se identificaron mediante anomalías estandarizadas de ambas variables (Balik *et al*., 2024; McFarland *et al*., 2025), calculadas a partir de datos MODIS agregados mensualmente a una resolución espacial de 0.25° y analizados en una escala regional correspondiente a biomas continentales.

Además, las celdas se complementaron con información cualitativa de perímetros de incendio, extraídos de la base de datos FRY Versión 2.0. Este enfoque permitió

una caracterización coherente y comparable de los incendios extremos a escala global.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología se estructuró en cuatro etapas:

2.1. Unidad de análisis

Se definieron las celdas de 0.25° × 0.25° como unidad principal de análisis, utilizando dos variables: BA, derivada del producto FireCCI51 (Lizundia-Loiola *et al*., 2020) y la suma de FRP, derivada del producto MCD14ML (Giglio *et al*., 2016) para el mismo periodo temporal. Además de estas variables de la cuadrícula, se incorporó información sobre perímetros de incendio, a partir del algoritmo FRY versión 2.0 (Chen, 2025). Este código identifica perímetros de incendio considerando píxeles quemados vecinos, calculando luego algunos parámetros de cada incendio (tamaño, duración en días, FRP medio, velocidad de propagación y severidad). En conjunto, las celdas de la cuadrícula y los perímetros de incendio individuales constituyen las unidades espaciales de análisis.

2.2. Referencia geográfica

Para establecer el carácter extremo de un evento, cada celda-mes y cada perímetro de incendio se comparó únicamente con otras unidades del mismo bioma continental, de manera que la extremidad se definiera dentro del contexto ecológico de la región. Para ello, se asignó cada celda y perímetro al bioma continental correspondiente, utilizando los biomas de Dinerstein *et al*. (2017) y modificándolos según el hemisferio en el caso de los trópicos. Finalmente, se delimitaron 55 regiones de referencia, denominadas Biomas Continentales Modificados (BCM), lo que permitió contextualizar los incendios dentro de entornos ecológicamente similares a nivel global.

2.3. Análisis de anomalías

Para identificar valores extremos, a las variables de las celdas (BA y FRP) se les aplicó una transformación logarítmica, para aproximarlas a una distribución normal, y posteriormente fueron estandarizadas de acuerdo a su media y desviación típica según cada región de referencia. Se aplicó la misma transformación y métricas a las cinco variables de los perímetros FRY.

2.4. Definición e integración de Eventos de Fuego Extremo (EFEs)

Se definió como Evento de Fuego Extremo (EFE) toda celda-mes que superaba el umbral de *media + 2 desviaciones estándar* simultáneamente en BA y FRP. En el caso de los perímetros quemados, las cinco variables derivadas de la base de datos FRY se analizaron de forma individual, considerando un perímetro como extremo cuando superaba este mismo umbral en al menos una de estas variables. Posteriormente, se realizó un solapamiento espacial, asignando de manera binaria (0: No extremo, 1: Extremo) las variables de cada perímetro quemado a las celdas extremas correspondientes**.** De este modo, cada EFE combina los valores cuantitativos de BA y FRP de la celda con información cualitativa sobre los perímetros quemados en cada celda.

3. RESULTADOS

La base de datos contiene 240 archivos NetCDF, correspondientes a cada mes del periodo 2003-2022. Cada archivo incluye 11 capas con información sobre incendios extremos (Tabla 1). La capa principal (efes_id) clasifica cada celda-mes según la presencia o no de incendios extremos. Las capas *efes_gBA* y *efes_gsumFRP* indican si las variables de área quemada y el FRP fueron extremas (0 si no fue extrema, 1 si lo fue) y las capas con el prefijo *efes_FRY* indican si la celda se superpone con alguna variable de los perímetros de incendio considerados también como extremos. Además, se incluyen capas con el área quemada total, el FRP acumulada y el identificador regional de cada BCM para cada celda.

Tabla 1. Descripción de las capas incluidas en la base de datos de incendios extremos (EFE).

Nombre de la capa	Valores
efes_id	0 (BA = 0 & sumFRP = 0) 1 (EFE por criterio BA+sumFRP) 2 (no es EFE por criterio, pero hubo actividad de incendios)
efes_gBA efes_gsumFRP efes_FRYsize efes_FRYmedfrp efes_FRYros efes_FRYseverity efes_FRYduration	Indican si la celda-mes se identificó como extremo por la variable FRY específica (0 si no fue extrema, 1 si lo fue).
burned_area y sum_frp	BA (directamente de FireCCI51 producto grid) y sumFRP (después de filtrar FRP y sumarlo)
Región_ID	0-55 (ID para el bioma continental modificado)

Durante el periodo de análisis (2003-2022) se identificaron 19,951 celdas-mes como EFEs a nivel global (Fig. 1), de las cuales 96% se asocia con al menos una variable de los perímetros extremos FRY. De las 55 regiones, 52 evidenciaron al menos un EFE en el periodo de estudio. Aproximadamente el 50 % de todos los EFEs se concentraron en solo seis regiones, destacando especialmente los bosques tropicales y subtropicales húmedos de hoja ancha y las sabanas tropicales y subtropicales del hemisferio sur en Sudamérica, con 2,591 y 2,331 EFEs, respectivamente. En contraste, 30 regiones aportaron menos del 10 % del total de EFEs; entre ellas se encuentran los desiertos y matorrales xéricos del hemisferio norte en África y los bosques tropicales y subtropicales secos de hoja ancha en Australia, con 4 EFEs cada una.

Los EFEs identificados en la base de datos mostraron una marcada variabilidad temporal. La Figura 2 muestra que el recuento interanual varió considerablemente durante el periodo 2003-2022, con una media de 997.5

eventos al año y sin una tendencia temporal clara. El valor máximo se registró en 2010, con 1,572 EFEs, mientras que el mínimo se observó en 2013, con 448 EFEs.

Entre los eventos más destacados, se encuentran el incendio de Portugal del año 2017 en el municipio de Pedrógão Grande, el "Verano Negro" en Australia que ocurrió entre noviembre de 2019 y enero de 2020, registrado como uno de los peores incendios de la historia del país, y los incendios de Siberia en el año 2021.

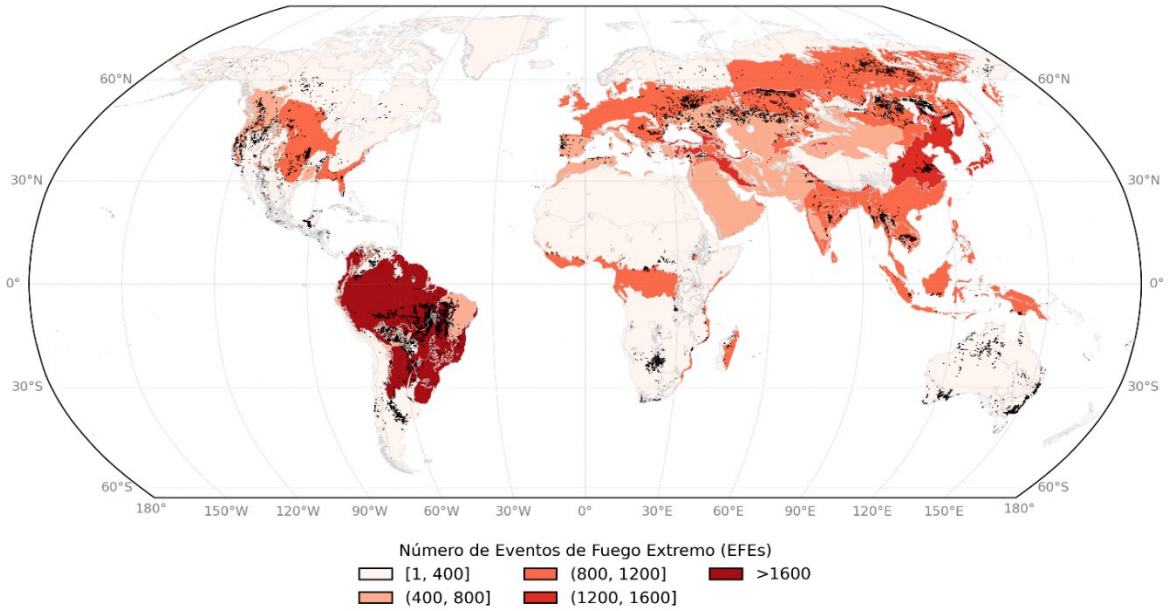


Figura 1. Distribución espacial del número total de eventos de fuego extremo (EFEs) acumulados por Bioma Continental Modificado (BCM) a escala global entre 2003-2022. El color de cada BCM representa el número total de EFEs registrados dentro de esa región, agrupado en intervalos de frecuencia creciente. Los puntos negros indican la localización de las celdas en las que se identificaron EFEs dentro de cada BCM.

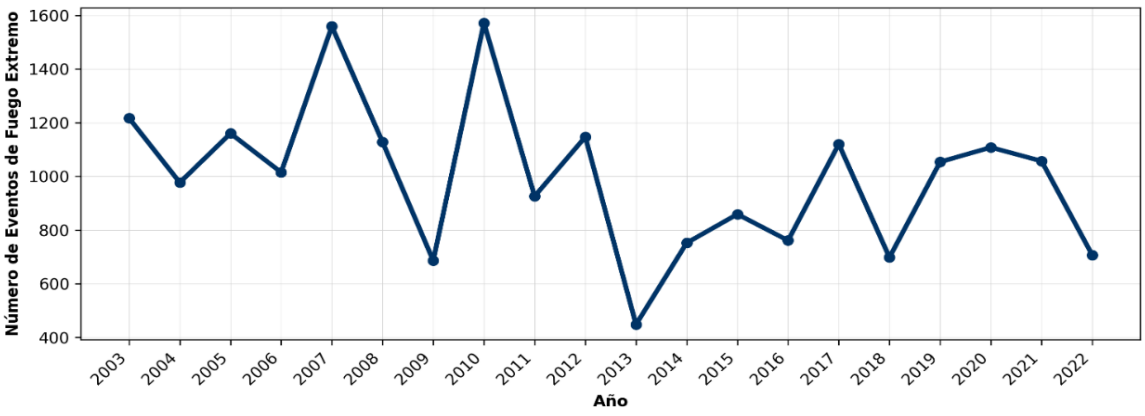


Figura 2. Número de Eventos de Fuego Extremo (EFEs) identificados anualmente a nivel global en la base de datos.

4. CONCLUSIONES

La base de datos EFEs es el primer conjunto global creado para caracterizar los incendios extremos de forma integral. A diferencia de estudios anteriores, que han analizado estos eventos a escala global utilizando una única variable y sin generar un dataset específico para ello, la base de datos EFEs integra dos métricas clave (como el BA y el FRP), junto con información adicional derivada de perímetros de incendio y considerando las diferencias entre biomas. Esto permite describir mejor los patrones, la variabilidad y la recurrencia de los incendios extremos, y abre la posibilidad de analizar sus causas al integrarse con factores climáticos, de vegetación o socioeconómicos. En conjunto, es una herramienta más robusta para el análisis y la modelización de incendios a escala global.

5. AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por el proyecto XFires de la Agencia Espacial Europea (ESA), contrato Nº 4000145352/24/I-LR.

6. REFERENCIAS

Abatzoglou, J. T., Kolden, C. A., Cullen, A. C., Sadegh, M., Williams, E. L., Turco, M., & Jones, M. W. (2025). Climate change has increased the odds of extreme regional forest fire years globally. *Nature communications, 16*(1), 6390. https://doi.org/10.1038/s41467-025-61608-1

Andela, N., Morton, D. C., Giglio, L., Chen, Y., van der Werf, G. R., Kasibhatla, P. S., DeFries, R. S., Collatz, G., Hantson, S., & Kloster, S. (2017). A human-driven decline in global burned area. *science, 356*(6345), 1356-1362. https://doi.org/10.1126/science.aal4108

Balik, J. A., Coop, J. D., Krawchuk, M. A., Naficy, C. E., Parisien, M.-A., Parks, S. A., Stevens-Rumann, C. S., & Whitman, E. (2024). Biogeographic patterns of daily wildfire spread and extremes across North America. *Frontiers in Forests and Global Change, 7*, 1355361. https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1355361

Bell, J. E., Brown, C. L., Conlon, K., Herring, S., Kunkel, K. E., Lawrimore, J., Luber, G., Schreck, C., Smith, A., & Uejio, C. (2018). Changes in extreme events and the potential impacts on human health. *Journal of the Air & Waste Management Association, 68(*4), 265-287. https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1401017

Bowman, D. M., Kolden, C. A., Abatzoglou, J. T., Johnston, F. H., van der Werf, G. R., & Flannigan, M. (2020). Vegetation fires in the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment, 1(*10), 500-515. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0085-3

Bowman, D. M., Williamson, G. J., Abatzoglou, J. T., Kolden, C. A., Cochrane, M. A., & Smith, A. M. (2017). Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. *Nature ecology & evolution, 1*(3), 0058. https://doi.org/10.1038/s41559-016-0058

Chen, W. (2025). FRY version 2.0 provisional. [OSF data project]. OSF. https://osf.io/rjvz5/

Cunningham, C. X., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. (2024). Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature ecology & evolution, 8*(8), 1420-1425. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2

Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N. D., Wikramanayake, E., Hahn, N., Palminteri, S., Hedao, P., & Noss, R. (2017). An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *BioScience, 67*(6), 534-545. https://doi.org/10.1093/biosci/bix014

Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment, 178*, 31-41. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054

Kelley, D. I., Burton, C., Di Giuseppe, F., Jones, M. W., Barbosa, M. L., Brambleby, E., McNorton, J. R., Liu, Z., Bradley, A. S., & Blackford, K. (2025). State of Wildfires 2024–2025. *Earth System Science Data, 17*(10), 5377-5488. https://doi.org/10.5194/essd-17-5377-2025

Linley, G. D., Jolly, C. J., Doherty, T. S., Geary, W. L., Armenteras, D., Belcher, C. M., Bliege Bird, R., Duane, A., Fletcher, M. S., & Giorgis, M. A. (2022). What do you mean,'megafire'? *Global Ecology and Biogeography, 31*(10), 1906-1922. https://doi.org/10.1111/geb.13499

Lizundia-Loiola, J., Otón, G., Ramo, R., & Chuvieco, E. (2020). A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of Environment, 236*, 111493. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493

McFarland, J. R., Coop, J. D., Balik, J. A., Rodman, K. C., Parks, S. A., & Stevens-Rumann, C. S. (2025). Extreme fire spread events burn more severely and homogenize postfire landscapes in the southwestern United States. *Global change biology, 31*(2), e70106. https://doi.org/10.1111/gcb.70106

Peterson, D. A., Fromm, M. D., McRae, R. H., Campbell, J. R., Hyer, E. J., Taha, G., Camacho, C. P., Kablick III, G. P., Schmidt, C. C., & DeLand, M. T. (2021). Australia's Black Summer pyrocumulonimbus super outbreak reveals potential for increasingly extreme stratospheric smoke events. *NPJ climate and atmospheric science, 4*(1), 38. https://doi.org/10.1038/s41612-021-00192-9

Tedim, F., Leone, V., Amraoui, M., Bouillon, C., Coughlan, M. R., Delogu, G. M., Fernandes, P. M., Ferreira, C., McCaffrey, S., & McGee, T. K. (2018). Defining extreme wildfire events: Difficulties, challenges, and impacts. *Fire, 1*(1), 9. https://doi.org/10.3390/fire1010009

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.237

Detección de períodos severos de sequía en zonas forestales protegidas mediante análisis del balance hídrico estimado mediante Teledetección

Cristóbal Rosselló, Jordi [1] **Bozorgi, Mahsa** [2] **Altava-Ortiz, Vicent** [3]

[1] Universitat Autònoma de Barcelona, España

[2] Programa de l'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, IRTA

[3] Servei Meteorològic de Catalunya, Generalitat de Catalunya

ORCID: Cristóbal Rosselló 0000-0001-6244-4289 Bozorgi 0009-0006-2935-2597 Altava-Ortiz 0000-0001-6974-1905

Correspondencia: jordi.cristobal@uab.cat Mahsa.Bozorgi@irta.cat vicent.altava@gencat.cat

RESUMEN

La sequía, como evento climático extremo con presencia creciente a nivel mundial, desempeña un papel importante en la gestión forestal y conservación de espacios naturales, especialmente en la cuenca mediterránea. Este estudio estima el balance hídrico superficial a escala regional en la Reserva de la Biosfera del Montseny mediante el análisis de estimaciones de evapotranspiración (ET) obtenidas por Teledetección mediante datos Sentinel (2017-2022) y Terra/Aqua MODIS (2000-2022) aplicando el modelo TSEB (Two-Source Energy Balance) para evaluar la dinámica del balance hídrico en dos cuencas forestales monitorizadas. Los resultados muestran que el marco de modelización SenET con datos Sentinel y MODIS se aplicó exitosamente a escala regional, con un RMSE medio aproximado de 1 mm·día-1. Se identificaron dos períodos severos de sequía (2006-2007 y 2021-2022) mediante el análisis de anomalías del balance hídrico superficial. La ET mostró una tendencia negativa mientras que la ET potencial presentó tendencia positiva durante 2017-2022, capturando de forma efectiva el período de sequía severa.

Palabras clave: *: Evapotranspiración, Balance hídrico, TSEB, Sequía, Montseny*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Detección de períodos severos de sequía en zonas forestales protegidas mediante análisis del balance hídrico estimado mediante Teledetección

Cristóbal Rosselló, Jordi [1], Bozorgi, Mahsa [2], Altava-Ortiz, Vicent [3]

[1] Universitat Autònoma de Barcelona, España.
0000-0001-6244-4289, jordi.cristobal@uab.cat

[2] Programa de l'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, IRTA.
0009-0006-2935-2597, Mahsa.Bozorgi@irta.cat

[3] Servei Meteorològic de Catalunya, Generalitat de Catalunya.
0000-0001-6974-1905, vicent.altava@gencat.cat.

Resumen: La sequía, como evento climático extremo con presencia creciente a nivel mundial, desempeña un papel importante en la gestión forestal y conservación de espacios naturales, especialmente en la cuenca mediterránea. Este estudio estima el balance hídrico superficial a escala regional en la Reserva de la Biosfera del Montseny mediante el análisis de estimaciones de evapotranspiración (ET) obtenidas por Teledetección mediante datos Sentinel (2017-2022) y Terra/Aqua MODIS (2000-2022) aplicando el modelo TSEB (*Two-Source Energy Balance*) para evaluar la dinámica del balance hídrico en dos cuencas forestales monitorizadas. Los resultados muestran que el marco de modelización SenET con datos Sentinel y MODIS se aplicó exitosamente a escala regional, con un RMSE medio aproximado de 1 mm·día^{-1}. Se identificaron dos períodos severos de sequía (2006-2007 y 2021-2022) mediante el análisis de anomalías del balance hídrico superficial. La ET mostró una tendencia negativa mientras que la ET potencial presentó tendencia positiva durante 2017-2022, capturando de forma efectiva el período de sequía severa.

Palabras clave: Evapotranspiración, Balance hídrico, TSEB, Sequía, Montseny

Detection of severe drought periods in protected forest areas through analysis of the water balance estimated using remote sensing.

***Abstract**: Drought, as an extreme climatic event with growing presence worldwide, plays an important role in forestry management and conservation of natural areas, especially in the Mediterranean basin. This study estimates the regional surface water balance in the Montseny Biosphere Reserve through analysis of remote sensing evapotranspiration (ET) estimates. Sentinel data (2017-2022) and Terra/Aqua MODIS data (2000-2022) were used applying the TSEB (Two-Source Energy Balance) model to evaluate water balance dynamics in two monitored forested catchments. Results show that the SenET modeling framework with Sentinel and MODIS data was successfully applied at regional scale, with evaluation yielding mean RMSE of approximately 1 mm·day^{-1}. Two severe drought periods (2006-2007 and 2021-2022) were identified through surface water balance anomaly analysis. ET showed a negative trend while potential ET presented a positive trend during 2017-2022, effectively capturing the severe drought period.*

***Keywords**: Evapotranspiration, Water balance, TSEB, Drought, Montseny*

1. INTRODUCCIÓN

La sequía representa uno de los eventos climáticos extremos con mayor impacto en la gestión forestal y la conservación de espacios naturales protegidos. En la cuenca mediterránea, este fenómeno adquiere especial relevancia debido a la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales frente al cambio climático. La expansión de la masa forestal derivada de la forestación de antiguos cultivos y campos de pastoreo favorece la naturalización del territorio, pero también conduce a alteraciones del balance hídrico tanto a escala local como regional. Este incremento de la cobertura forestal tiene efectos significativos sobre el aumento del riesgo de incendios forestales, así como sobre la disminución del caudal de agua necesario para mantener la fauna y flora,

especialmente en hábitats riparios. La cuantificación precisa del balance hídrico y de uno de sus principales componentes, la evapotranspiración (ET), resulta fundamental para comprender estas dinámicas hídricas y establecer estrategias de gestión adaptativa en áreas protegidas.

El objetivo principal de este estudio es estimar el balance hídrico superficial a escala regional en la Reserva de la Biosfera - Parque Natural del Montseny (RB-PNM) mediante el análisis de estimaciones de ET obtenidas por Teledetección. Para ello se usarán datos Sentinel para el período 2017-2022 y datos Terra/Aqua MODIS para el período extendido 2000-2022, permitiendo identificar dos períodos severos de sequía y evaluar sus impactos en cuencas forestales monitorizadas a largo plazo.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La RB-PNM se localiza en el noreste de la Península Ibérica, constituyendo un espacio natural protegido de alto valor ecológico (Fig. 1). La evaluación del balance hídrico de este estudio se centra en la cuenca experimental de la Castanya donde hay dos cuencas instrumentadas con un registro de caudal superficial del agua de más de 30 años de datos: la cuenca TM0, con una superficie de 2.05 km², y la cuenca TM9, con 0.05 km² (Fig. 1). Cada cuenca tiene una estación de aforo que proporcionan datos continuos de caudal y precipitación necesarios para evaluar las estimaciones del balance hídrico superficial. Ambas cuencas se encuentran en el área núcleo de la RB-PNM, caracterizadas por ecosistemas forestales mediterráneos de montaña formados por encinares (*Quercus ilex*) (85%), hayedos (*Fagus sylvatica*) (10%) y matorrales sub-alpinos (*Juniperus communis subsp. Alpina*, *Calluna vulgaris*) en las zonas culminales (5%). La diversidad altitudinal y la heterogeneidad de la cobertura forestal en estas cuencas las convierten en sitios representativos para evaluar la respuesta hidrológica de los ecosistemas mediterráneos de montaña frente a eventos de sequía.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Modelización de la evapotranspiración

La estimación de la ET instantánea se realizó mediante el modelo TSEB (*Two-Source Energy Balance model*) desarrollado por Norman *et al.* (1995). Este modelo separa la contribución del suelo y la vegetación en el balance energético superficial, proporcionando estimaciones robustas de ET en ecosistemas heterogéneos.

Para su cálculo diario a nivel regional se implementó el marco de modelización SenET utilizando la librería pyTSEB (github.com/hectornieto/pyTSEB) con datos Sentinel-2 a 20m de resolución espacial para el periodo 2017-2022, siguiendo las metodologías validadas por Guzinski *et al.* (2021); y su reciente implementación con datos MODIS desarrollado por Bozorgi *et al.* (2023) con una resolución espacial de 1000m para el periodo 2000-2022.

El método SenET ha sido extensamente validado con datos de torres de flujos de energía en zonas de vegetación natural y cultivos presentado, en general, un RMSE promedio igual o inferior a 1 mm·día^{-1}. En el caso de su aplicación con imágenes MODIS, se obtuvo un RMSE medio de 1.2 mm·día^{-1} evaluado con datos de 11 estaciones de flujos de energía de la red FLUXNET. Aun así, es necesario evaluarlo en zonas forestales a escala de cuenca.

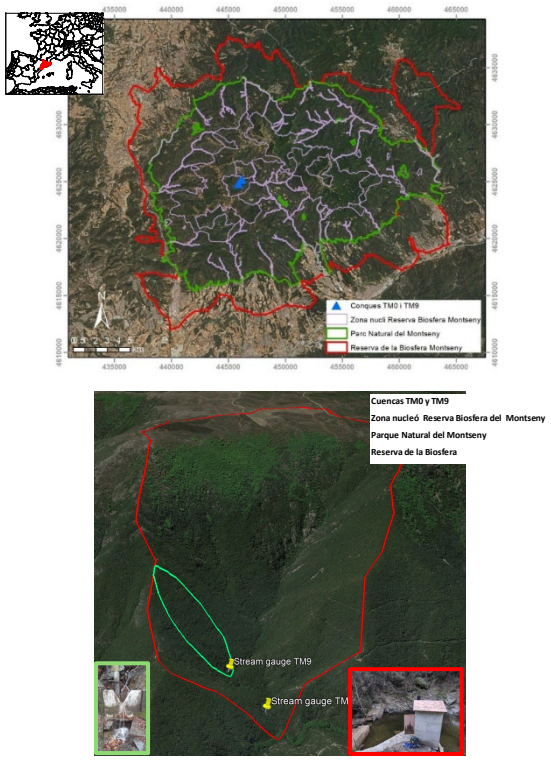


Figura 1. Zona de estudio del RB-PNM, coordenadas en UTM-31N ETRS89 (panel superior). Ubicación y detalle de las cuencas experimentales de la Castanya (imagen de fondo Google Earth) con imágenes de los aforos.

3.2. Modelización de la precipitación

La estimación espacial de precipitación se realizó mediante análisis de regresión múltiple e interpolación de residuos. Las covariables que se utilizaron en la modelización de la precipitación fueron la altitud, la distancia al mar y la latitud extraídas de un MDE. Se utilizaron datos de estaciones meteorológicas del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para generar campos continuos de precipitación a nivel diario a la resolución espacial de los datos de Teledetección (20 y 1000m, para Sentinel-2 y MODIS, respectivamente).

3.3. Estimación del balance hídrico superficial

El balance hídrico superficial se calculó como la diferencia entre precipitación y evapotranspiración (P-ET) para cada año hidrológico a partir de los datos diarios de la ET y de la P modelizados. Posteriormente, se generaron series temporales de anomalías del balance hídrico con respecto a la media del período para identificar años de déficit o superávit hídrico comparados con los datos de las cuencas experimentales.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de la ET y dinámica temporal

La evaluación de las estimaciones de ET mediante datos Sentinel-2, Terra MODIS y Aqua MODIS mostró valores de RMSE generalmente iguales o inferiores a 1.1 mm·día^{-1} (Tabla 1). Los datos de Aqua MODIS presentaron los mejores resultados, con RMSE promedio de 0.8 mm·día^{-1} para el conjunto de años evaluados, mientras que Terra MODIS obtuvo 0.9 mm·día^{-1}. Por otro lado, la ET modelizada con datos Sentinel alcanzó un RMSE promedio de 1.1 mm·día^{-1} (Tabla 1). Estos datos son comparables con los descritos por otros estudios en zonas de vegetación natural y de cultivos (Guzinski *et al*., 2021).

El último evento extremo de sequía en Catalunya se originó durante el período 2019 al 2024. El análisis temporal conjunto de la ET de Sentinel y MODIS desde 2017 a 2022 mostró una tendencia progresiva y decreciente de la ET (la Figura 2 muestra las líneas de tendencia y las respectivas funciones, así como al el R^2), mientras que la ET potencial presentó tendencia creciente, evidenciando el incremento de la demanda evaporativa atmosférica en el contexto de la sequía. Teniendo en cuenta la adaptación de la vegetación mediterránea y en especial de las esclerófilas a la sequía, se puede observar también la resistencia de esta a la pérdida de agua. Aún así, cabe remarcar la presencia de individuos de encina muertos debido a las diversas sequías consecutivas alrededor de las cuencas experimentales de la Castanya. La Figura 2 no refleja cambios en la dinámica de la ET debido a la mortalidad de encinas ya los efectos de la sequía sobre vegetación natural normalmente requieren de series temporales más extensas que actualmente se están procesando para el área de estudio.

Tabla 1. Evaluación de la ET en las cuencas experimentales de la Castanya.

	RMSE (mm·dia^{-1})		
Año hidrológico	Sentinel	Terra	Aqua
2000-2001		0.5	
2001-2002		0.3	
2007-2008		1.2	0.6
2008-2009		1.2	0.9
2009-2010		1.3	1.2
2011-2012		0.5	0.2
2012-2013		0.6	0.4
2014-2015		0.8	0.6
2015-2016		1.1	0.8
2016-2017		0.8	0.6
2017-2018	1.4	1.5	1.4
2021-2022	0.9	1.1	0.9
Promedio	1.1	0.9	0.8

4.2. Dinámica del balance hídrico superficial

El análisis del balance hídrico superficial mediante datos Aqua MODIS para el período 2000-2022 reveló variabilidad interanual significativa, con valores que oscilaron entre déficits superiores a -300 mm·año^{-1} y superávits superiores a 700 mm·año^{-1} (Figura 3). Los años hidrológicos 2007-2008, 2011-2012, 2021-2012 presentaron anomalías negativas pronunciadas, indicando condiciones de sequía. Los datos Sentinel para el período 2017-2022 confirmaron el patrón de déficit hídrico, particularmente intenso durante los años 2021-2022. La distribución espacial del balance hídrico mostró mayor déficit en áreas de menor altitud y mayor densidad forestal, mientras que las zonas de alta montaña mantuvieron balances más equilibrados (Figura 4). Durante el año hidrológico 2020-2021 el temporal Gloria afectó el área de estudio produciendo un balance hídrico positivo pero que colmató el aforo las cuencas de estudio haciendo imposible la toma de datos de caudal y la posterior evaluación del balance hídrico durante el siguiente año hidrológico. Aun así, los efectos de la sequía aún persistieron hasta el final de la serie analizada.

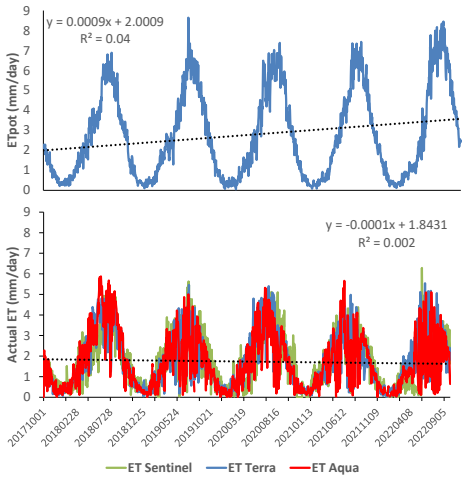


Figura 2. Dinámica del promedio de la ET y de la ET potencial en las cuencas experimentales de la Castanya para el periodo 2017-2022. Se incluyen las líneas de tendencia, su función y el R^2.

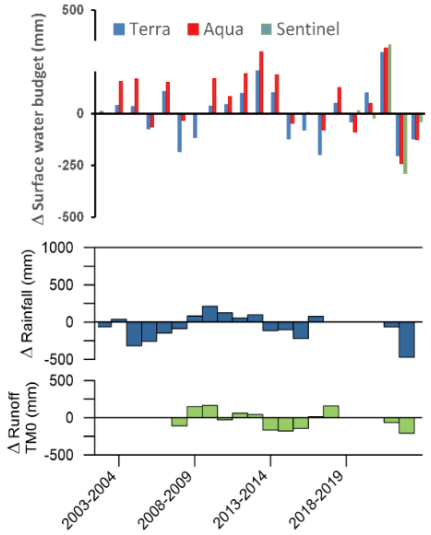


Figura 3. Anomalías de la escorrentía, precipitación y del balance hídrico calculado con datos MODIS y Sentinel-2 y modelización SIG de la precipitación en las cuencas experimentales de la Castanya para el periodo 2000-2022.

4.3. Dinámica de las anomalías del balance hídrico superficial

El análisis de anomalías para el período reciente (2000-2022) identificó dos eventos de sequía severa. El primero, iniciado en 2006-2007, se extendió varios años con anomalías que alcanzaron -500 mm en algunas áreas. El segundo, correspondiente al bienio 2021-2022, presentó anomalías similares en magnitud, afectando extensamente la RB-PNM. Los tres sensores (Terra, Aqua y Sentinel) capturaron consistentemente estos eventos de sequía, aunque con ligeras diferencias en la magnitud de las anomalías. La concordancia entre sensores refuerza la robustez de las estimaciones y confirma la severidad de los períodos de déficit hídrico identificados.

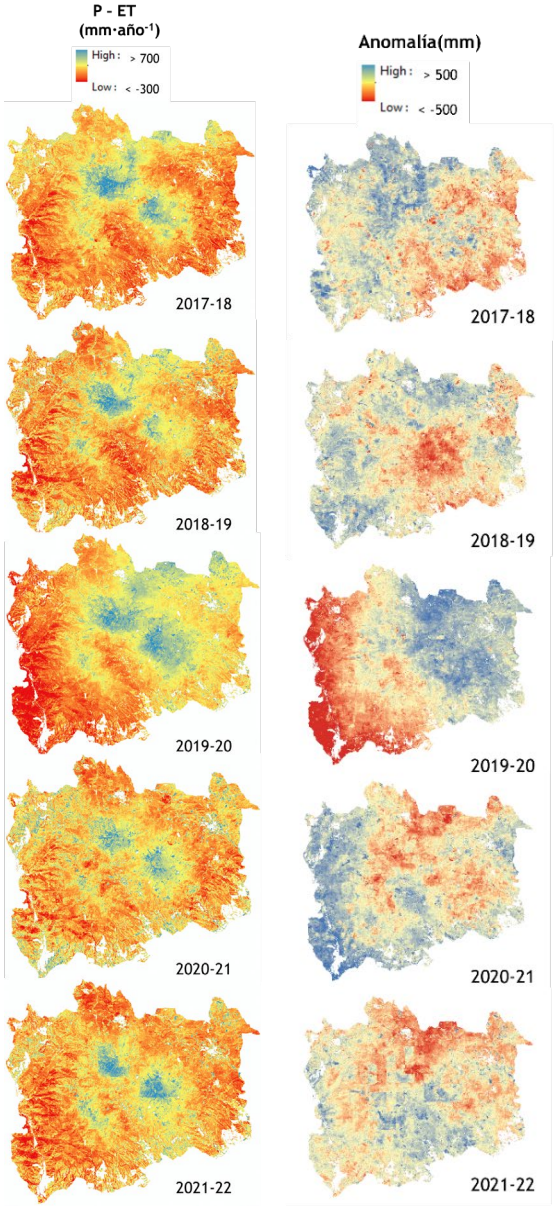


Figura 3. Balance hídrico (P-ET) y anomalías estimadas con dataos Sentinel para el periodo 2017-2022.

5. CONCLUSIONES

El marco de modelización SenET con datos Sentinel y MODIS se aplicó exitosamente a escala regional en la RB-PNM, obteniendo evaluaciones con un RMSE promedio aproximado de 1 mm·día^{-1} a escala de cuenca, siendo Aqua MODIS el sensor con mejores resultados. La ET mostró una tendencia negativa mientras que la ET potencial exhibió tendencia positiva durante 2017-2022, capturando efectivamente el período de sequía severa reciente en Catalunya.

El análisis de anomalías del balance hídrico superficial identificó claramente los períodos severos de sequía iniciados en 2006-2007 y 2021-2022, proporcionando información valiosa para la gestión forestal adaptativa de espacios naturales protegidos en el contexto mediterráneo. Estos resultados destacan la utilidad de la Teledetección para el monitoreo continuo de la disponibilidad hídrica en ecosistemas forestales vulnerables al cambio climático.

La investigación futura se orientará hacia la mejora de la modelización de ET mediante parametrización local del modelo TSEB (coeficiente Pristely-Taylor y del LAI), utilización de datos de reanálisis de mayor resolución espacial (ERA-Land) y la aplicación del modelo DTD (Anderson *et al.*, 1997). Asimismo, se extenderá el análisis de anomalías utilizando datos Landsat de resolución media (30 metros) desde 1984 hasta la actualidad, permitiendo una perspectiva temporal más amplia de las dinámicas hídricas en la región.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto ET4DROUGHT (PID2021-127345OR-C31) y CALIB-FIRE (PID2023-151124NB-I00). Los autores agradecen a la RB-PNM por facilitar datos e infraestructura para la realización de este estudio.

7. REFERENCIAS

Anderson, M. C., Norman, J. M., Diak, G. R., Kustas, W. P., & Mecikalski, J. R. (1997). A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment, 60*(2), xx–xx. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-5

Bozorgi, M., Cristóbal, J., & Pàmies-Sans, M. (2024). Evaluating the two-source energy balance model using MODIS data for estimating evapotranspiration time series on a regional scale. *Remote Sensing, 16*(23), 4587. https://doi.org/10.3390/rs16234587

Guzinski, R., Nieto, H., Sandholt, I., & Karamitilios, G. (2020). Modelling high-resolution actual evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 data fusion. *Remote Sensing, 12*(9), 1433. https://doi.org/10.3390/rs12091433

Norman, J., Kustas, W., & Humes, K. (1995). A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology, 77*, 263–293. https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.238

Caracterización de las descargas eléctricas que provocan incendios forestales en la Comunitat Valenciana

Orozco Bagou, Daniel [1] **Barberà Bisbal, Maria Jesús** [1] **Soriano Sancho, José Luis** [1] **Cervera Montero, Agustín** [1] **Botella Bou, Raúl** [1] **Estefano Olaiz, Miguel** [1] **Verdú López, Concepción** [1] **Romero Vivó, Mario** [2]

[1] VAERSA (Valenciana d'Estratègies i Recursos per a la Sostenibilitat Ambiental), España

[2] Generalitat Valenciana

ORCID: Orozco Bagou 0009-0009-6025-9886 Barberà Bisbal 0000-0002-8259-285X Soriano Sancho 0009-0009-6993-4315 Cervera Montero 0009-0008-5853-0537 Botella Bou 0000-0001-7853-5601 Estefano Olaiz 0009-0001-2553-088X Verdú López 0009-0002-9845-5849 Romero Vivó 0009-0002-2756-4503

Correspondencia: orozco.dan@vaersa.org barberab.mar@vaersa.org jlsoriano@vaersa.org cervera.agu@vaersa.org botella.rau@vaersa.org miguel.estefano@vaersa.org verdu.con@vaersa.org romero_mar@gva.es

RESUMEN

En este trabajo se analizan las características físicas de las descargas eléctricas que han provocado incendios forestales durante el periodo 2021 - 2025 en la Comunitat Valenciana, tales como la intensidad, polaridad, ubicación, hora de impacto y longitud de los semiejes. Los datos utilizados para ello son la base de datos de incendios forestales de la Dirección General de Prevención de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana y la base de datos de descargas eléctricas de la Agencia Estatal de Meteorología. Se han seleccionado para el análisis un total de 87 incendios forestales provocados por descargas eléctricas de los que el 61% presenta polaridad negativa y el 39% positiva. La climatología de las descargas eléctricas indica que el porcentaje con polaridad positiva es bastante menos frecuente que la negativa, ya que requieren mayor desarrollo vertical de la tormenta. Los resultados obtenidos muestran que las descargas positivas tienen mayor probabilidad de desencadenar un incendio y por tanto mayor riesgo. En general la intensidad de las descargas eléctricas presenta alta dispersión que es mayor en las descargas positivas. El periodo en el que se registran mayor número de descargas eléctricas es durante la tarde, debido a la formación de tormentas vespertinas típicas de verano. El objetivo de este trabajo es priorizar la vigilancia de las descargas eléctricas según su polaridad y ubicación en el terreno, permitiendo así optimizar los recursos que dispone el Servicio de Vigilancia Preventiva de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana.

Palabras clave: *incendios forestales, descargas eléctricas, polaridad, intensidad*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 21 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Caracterización de las descargas eléctricas que provocan incendios forestales en la Comunitat Valenciana

Orozco Bagou, Daniel [(1)], Barberà Bisbal, Maria Jesús [(1)], Soriano Sancho, José Luis [(1)], Cervera Montero, Agustín [(1)], Botella Bou, Raúl [(1)], Estefano Olaiz, Miguel [(1)], Verdú López, Concepción [(1)], Romero Vivó, Mario [(2)]

[(1)] VAERSA (Valenciana d'Estratègies i Recursos per a la Sostenibilitat Ambiental), España.

0009-0009-6025-9886, orozco.dan@vaersa.org ; 0000-0002-8259-285X, barberab.mar@vaersa.org

0009-0009-6993-4315, jlsoriano@vaersa.org ; 0009-0008-5853-0537, cervera.agu@vaersa.org

0000-0001-7853-5601, botella.rau@vaersa.org ; 0009-0001-2553-088X, miguel.estefano@vaersa.org

0009-0002-9845-5849, verdu.con@vaersa.org

[(2)] Generalitat Valenciana.

0009-0002-2756-4503, romero_mar@gva.es.

Resumen: En este trabajo se analizan las características físicas de las descargas eléctricas que han provocado incendios forestales durante el periodo 2021 - 2025 en la Comunitat Valenciana, tales como la intensidad, polaridad, ubicación, hora de impacto y longitud de los semiejes. Los datos utilizados para ello son la base de datos de incendios forestales de la Dirección General de Prevención de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana y la base de datos de descargas eléctricas de la Agencia Estatal de Meteorología. Se han seleccionado para el análisis un total de 87 incendios forestales provocados por descargas eléctricas de los que el 61% presenta polaridad negativa y el 39% positiva. La climatología de las descargas eléctricas indica que el porcentaje con polaridad positiva es bastante menos frecuente que la negativa, ya que requieren mayor desarrollo vertical de la tormenta. Los resultados obtenidos muestran que las descargas positivas tienen mayor probabilidad de desencadenar un incendio y por tanto mayor riesgo. En general la intensidad de las descargas eléctricas presenta alta dispersión que es mayor en las descargas positivas. El periodo en el que se registran mayor número de descargas eléctricas es durante la tarde, debido a la formación de tormentas vespertinas típicas de verano. El objetivo de este trabajo es priorizar la vigilancia de las descargas eléctricas según su polaridad y ubicación en el terreno, permitiendo así optimizar los recursos que dispone el Servicio de Vigilancia Preventiva de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana.

Palabras clave: incendios forestales, descargas eléctricas, polaridad, intensidad

Characterization of Lightning Strikes Causing Forest Fires in the Valencian Community

***Abstract**: In this study, the physical characteristics of lightning strikes that triggered forest fires in the Valencian Community during the 2021–2025 period are analyzed, including intensity, polarity, location, time of impact and semi-axis lengths. The data used for this analysis come from the forest fire database of the Dirección General de Prevención de Incendios Forestales of the Generalitat Valenciana and the lightning strike database of the State Meteorological Agency (AEMET). A total of 87 wildfires caused by lightning were selected for analysis, of which 61% were associated with negative polarity strikes and 39% with positive polarity strikes. Climatological records indicate that positive lightning strikes are considerably less frequent than negative ones, as they require greater vertical development of the storm. The results show that positive strikes have a higher probability of igniting forest fires and therefore represent a greater risk. In general, lightning strike intensity shows high variability, which is more pronounced in positive strikes. The period with the highest number of recorded lightning strikes occurs in the afternoon, due to the formation of typical summer convective storms. The objective of this study is to prioritize the monitoring of lightning strikes according to their polarity and geographic location, thereby optimizing the resources available to the Servicio de Vigilancia Preventiva de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana.*

***Keywords**: forest fires, lightning strikes, polarity, intensity*

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales representan una problemática de especial relevancia en la zona de estudio, la Comunitat Valenciana (CV). Esta situación se explica por diversos factores, entre los que destacan sus características geográficas, su compleja orografía, la composición y estructura de la vegetación, el clima y el arraigado uso cultural del fuego.

En la Figura 1 se representan los incendios ocurridos y la superficie quemada desde el año 1989 a 2024. En 1995 se crea el Servicio de Vigilancia Preventiva, con un impacto directo tanto en el número de incendios como en la superficie afectada, ya que la tendencia a partir de ese año, en ambos casos, es decreciente. (https://mediambient.gva.es/es/web/prevencion-de-incendios/estadistica-de-incendios-forestales)

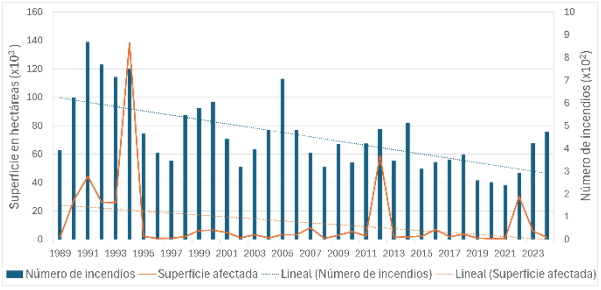


Figura 1. Evolución de los incendios forestales en la CV 1989-2024

El Grupo Operativo de Investigación de Incendios Forestales (GOIIF) de la Generalitat Valenciana (GVA) es el encargado de investigar las causas que provocan los incendios y alimentar la base de datos del registro de incendios forestales. En el periodo 2014-2023 se han producido un total de 3358 incendios. Los incendios forestales provocados por descargas eléctricas o rayos tienen una relevancia significativa, quemando el 62% de la superficie afectada (Fig. 2).



Figura 2. Porcentaje de incendios ocurridos por causa (izquierda) y hectáreas afectadas (derecha) de 2014 a 2023

El Servicio de Vigilancia Preventiva frente al riesgo de Incendios Forestales dispone de diferentes recursos entre los que se encuentran, las Unidades de Prevención, los Observatorios Forestales, la Unidad Técnica o el Sistema Integrado de Gestión de Incendios Forestales (SIGIF). El SIGIF recibe diariamente los datos de las descargas eléctricas detectadas por la red de detección de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). La información de las características de esta red como puede ser el tipo y localización de los sensores o los resultados de la climatología de las descargas en la Península Ibérica etc. se detallan en Núñez, *et al*., 2019. Durante los días de tormenta las unidades de vigilancia del Servicio de Vigilancia Preventiva de la GVA realizan seguimiento de las descargas eléctricas sin tener en cuenta las características de los rayos. Este estudio trata de encontrar correlaciones entre las características físicas de las descargas eléctricas, tales como la intensidad o la polaridad y la ocurrencia de incendios provocados por esta causa, con el objetivo de distribuir los recursos disponibles de la forma óptima en función del riesgo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos utilizados

Se han analizado los datos del periodo comprendido entre 2021 y 2025 de las siguientes fuentes:

- Datos de incendios forestales de la Dirección General de Prevención de Incendios Forestales
- Datos de descargas eléctricas de AEMET

2.2. Metodología

Desde 2021 se analizan los incendios forestales causados por rayo en la CV de los que se dispone información precisa sobre ubicación y hora de inicio, documentada por el Servicio de Vigilancia Preventiva de Incendios Forestales. Estos datos se cruzan con las descargas eléctricas proporcionadas por AEMET, lo que permite identificar, de forma manual por observación, el rayo más cercano al incendio según la hora de impacto y de inicio del fuego. De este modo, se determina el rayo con mayor probabilidad de haber sido el causante y se recogen sus características: intensidad, polaridad, ubicación, hora de impacto y longitud de los semiejes. Asimismo, se calcula la distancia entre la ubicación teórica (considerada como la ubicación del rayo) y la real (la del incendio), así como el tiempo transcurrido desde el impacto hasta el inicio del incendio. Toda esta información se integra en una base de datos que permite el seguimiento de los episodios tormentosos y su influencia en los incendios forestales.

Para analizar la aproximación y fase de desarrollo de las tormentas se emplean los productos de los satélites de la serie METEOSAT tanto de segunda como de tercera generación (MSG y MTG). Estos recursos permiten observar la evolución convectiva y, mediante el radar ECHOTOP, identificar las zonas potencialmente afectadas por descargas de polaridad positiva. Esta información junto con las fotografías tomadas en la zona del incendio (Figura 3) son herramientas que ayudan a localizar en el espacio y tiempo el incendio, permitiendo la caracterización de los rayos.



Figura 3. Incendio causado por una descarga eléctrica en Teresa de Cofrentes (València) durante el verano de 2025. Fuente: GOIIF

3. RESULTADOS

3.1. Estadística de las descargas eléctricas en el periodo analizado

Durante el periodo de 2021 a 2025 se han iniciado 1709 incendios de los que el 28% (483) han sido causados por descargas eléctricas. En cuanto a la superficie, han afectado al 76% de la superficie total quemada (38999,69 ha). La estadística mensual muestra que entre mayo y septiembre se concentran el 90% del total anual de incendios forestales causados por descargas eléctricas. La mayor incidencia se encuentra el mes de agosto con un 29% de los incendios, seguida de junio con el 21%, julio el 20%, mayo con el 12% y finalmente septiembre con el 8%.

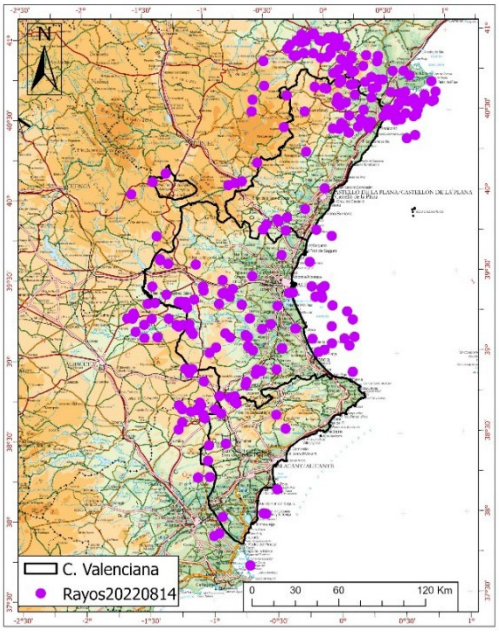


Figura 4. Descargas eléctricas registradas entre el 13 y 14 de agosto de 2022 por la red de AEMET

Cada año se registran miles de descargas eléctricas sobre la CV. Según los datos analizados de AEMET relativos al periodo 2021-2025, se observa un incremento en el número total de rayos, tanto nube-nube como nube-tierra, superándose en los tres últimos años las 250000 descargas eléctricas anuales sobre el territorio.

En plena época de máximo riesgo de incendio, las tormentas pueden descargar miles de rayos en pocas horas —como señala el informe posincendio de Venta del Moro 2022, Orozco, *et al*., 2025— con escasa o nula precipitación. Esta circunstancia puede originar múltiples igniciones y, en consecuencia, incendios simultáneos a lo largo del territorio. En la Figura 4 se muestra, como ejemplo el mapa de las descargas eléctricas registradas el día 13/08/2022 que provocó el incendio de La Vall d'Ebo.

3.2. Características de las descargas eléctricas que provocan incendios

En este primer análisis se han seleccionado 87 incendios forestales ocurridos entre 2021 y 2025 causados por descargas eléctricas (Figura 5). Estos incendios han sido directamente detectados sobre el territorio por el Servicio de Vigilancia Preventiva de Incendios Forestales, por lo que se dispone de información precisa relativa a la ubicación y la hora de inicio. Tras analizar las descargas eléctricas que causaron estos incendios, se observa que el 61% presenta polaridad negativa y el 39% restante positiva. Las descargas eléctricas positivas se producen cuando la nube cumulonimbo asociada a la tormenta supera aproximadamente los 10 km de altura; por ello, su frecuencia es menor que la de los rayos negativos ya que requieren un mayor desarrollo vertical de la tormenta (Solà, 2023). Según la climatología de descargas eléctricas en la Península Ibérica el porcentaje anual de descargas de polaridad positiva es de solo el 11% (Núñez, *et al*., 2019). Sin embargo, como el 39% de los incendios iniciados por descargas eléctricas tienen polaridad positiva, esto implica que estas descargas tienen mayor probabilidad de desencadenar un incendio, lo que está de acuerdo con estudios realizados previamente (Moris *et al*., 2020).

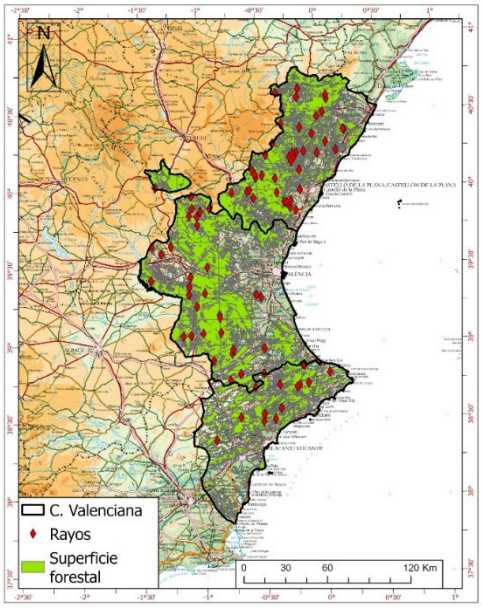


Figura 5. Localización de las descargas eléctricas que han provocado incendios durante el periodo de análisis

En la Figura 6 se puede visualizar la hora y la intensidad (en kA) de las descargas eléctricas que han dado lugar a incendios forestales. Además, en la Tabla 1 se muestran algunos valores estadísticos de todas las descargas eléctricas, las negativas y las positivas, aquí se puede observar una alta dispersión relativa a la media que es mayor en las descargas positivas. La mayoría de los rayos que han provocado incendios se concentran entre las 15:00 y las 20:00 horas, generando igniciones pocos minutos después del impacto. Al diferenciar por polaridad, se aprecia que las descargas eléctricas negativas sólo superan en un caso los -50 kA, mientras que las positivas suelen presentar mayor intensidad y provocar un mayor número de incendios entre las 18:00 y las 19:00 horas. Parte de la muestra registra impactos nocturnos que no generan ignición de forma inmediata, sino que "despiertan" al día siguiente cuando las condiciones de sequedad de la vegetación son favorables.

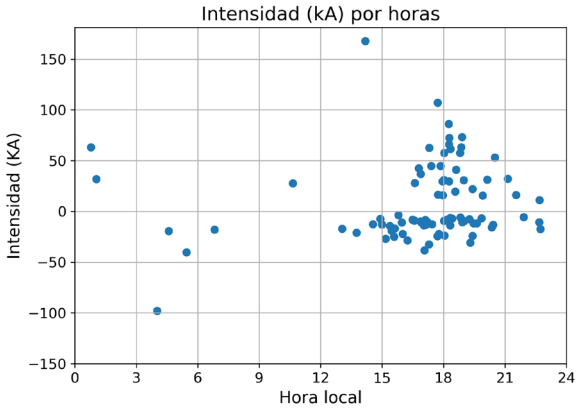


Figura 6. Intensidad por hora de las descargas eléctricas que han provocado incendios en la CV de 2021 a 2025

Tabla 1. Valores estadísticos de la intensidad (kA) de las descargas eléctricas

	Todas	Negativas	Positivas
Media	8,2	-17,0	46,8
Mediana	-8,1	-12,9	38,9
Desvest	38,5	14,2	31,1
Máximo	167,9	-3,7	167,9
Mínimo	-97,8	-97,8	11,2

A partir de mediados de 2021 se observa una reducción en la distancia entre la ubicación teórica del rayo y la ubicación real del incendio, probablemente debido a la mejora del sistema de detección, tal como se señala en Núñez *et al*., 2019. Asimismo, se ha detectado que algunos incendios provocados por descargas eléctricas fueron inicialmente clasificados por el sistema como descargas nube-nube.

4. CONCLUSIONES

Profundizar en el conocimiento sobre las características físicas de las descargas eléctricas que producen incendios forestales es fundamental para mejorar la prevención de éstos. Con este estudio se pretende priorizar la vigilancia de descargas eléctricas según su polaridad y ubicación en el terreno y así permitir una vigilancia sobre ellos de manera proactiva. Es necesario continuar analizando la interacción de las descargas eléctricas con los incendios forestales ampliando la muestra de incendios e incluyendo otros factores como la influencia de la precipitación, la disponibilidad de la vegetación, etc.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Grupo Operativo de Investigación de Incendios Forestales (GOIIF) por su gran desempeño en la determinación de las causas de los incendios forestales y a AEMET por proporcionar los datos de descargas eléctricas.

6. REFERENCIAS

Generalitat Valenciana. (s.f.). Estadística de incendios forestales. Conselleria de Medio Ambiente, Infraestructuras y Territorio. Recuperado el 10 de febrero de 2026, de https://mediambient.gva.es/es/web/prevencion-de-incendios/estadistica-de-incendios-forestales

Moris, J. V., Conedera, M., Nisi, L., Bernardi, M., Cesti, G. & Pezzatti, G. B. (2020). Lightning-caused fires in the Alps: Identifying the igniting strokes. *Agricultural and Forest Meteorology (290)*. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107990

Núñez Mora, J. A., Riesco Martín, J. & Mora García, M. A. (2019). Climatología de descargas eléctricas y de días de tormenta en España. Agencia Estatal de Meteorología. ISBN: 978-84-7837-100-6. https://doi.org/10.31978/639-19-007-7

Orozco Bagou, D., Botella Martínez, M. A., Soriano Sancho, J. L. & Cervera Montero, A. (2025). Informe post incendio Venta del Moro 03/07/2022. Dirección General de Prevención de Incendios Forestales GVA. https://prevencionincendiosgva.es/Documents/Uploads/InformesPostIncendio/032_2022_Informe_post_UT902_VentadelMoro_20220703_20250523153336.pdf

Solà de las Fuentes, G. (2023). Localizaciones con impactos de rayos recurrentes: aportación a la distribución geográfica de rayos con corrientes extremas y a la caracterización de rayos que afectan aerogeneradores. Tesis Doctoral. https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-404787

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.240

Estimación del peligro de incendio con índices de humedad y de sequía meteorológica: experiencias de los grandes incendios de 2025

Torres-Vázquez, Miguel Ángel [1] **Oliva, Patricia** [1] **Solano-Romero, Erika** [1] **Pampanoni, Valerio** [2] **Franquesa, Magí** [3] **Chuvieco, Emilio** [1]

[1] Environmental Remote Sensing Research Group, Department of Geology, Geography and the Environment, Universidad de Alcalá, Calle Colegios 2, 28801, Alcalá de Henares, Spain

[2] School of Aerospace Engineering, Sapienza University, 00138 Rome, Italy

[3] Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Zaragoza, 50059, Spain

ORCID: Torres-Vázquez 0000-0001-8897-9337 Oliva 0000-0001-5051-3662 Solano-Romero 0009-0009-7040-1161 Pampanoni 0000-0002-9946-1303 Franquesa 0000-0003-3101-0394 chuvieco 0000-0001-5618-4759

Correspondencia: miguela.torres@uah.es patricia.oliva@uah.es erika.solano@uah.es valerio.pampanoni@uniroma1.it magifranquesa@gmail.com emilio.chuvieco@uah.es

RESUMEN

El aumento reciente de grandes incendios bajo condiciones de sequía intensa ha reforzado la necesidad de contar con indicadores espaciales y actualizables del estado hídrico del combustible. En este estudio se evaluó la utilidad del Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI), derivado de Sentinel-3, para caracterizar las condiciones previas a incendios extremos, comparándolo con el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración a 3 meses (SPEI-3) como referencia de sequía meteorológica. El análisis se centró en diez grandes incendios (>10.000 ha) ocurridos en agosto de 2025 en el sector noroccidental de la península Ibérica. Se compararon tres ámbitos espaciales: el interior de los perímetros quemados, un buffer externo de 5 km y zonas alejadas utilizadas como control. Los resultados muestran un deterioro sostenido de las condiciones hídricas durante el verano. El SPEI-3 evolucionó hacia valores más negativos, alcanzando niveles severos a extremos (≤ -2) en las dos últimas semanas de agosto. El NDWI descendió gradualmente desde junio y presentó una caída abrupta al final de agosto dentro de los perímetros, más moderada en el buffer y menos marcada en las zonas alejadas. La relación entre NDWI y SPEI-3, evaluada mediante el coeficiente de correlación de Pearson, fue mayor en los perímetros (0,68) y en el buffer (0,64) que en las zonas alejadas (0,51).

Palabras clave: *Incendios forestales, índices de humedad, sequía, Sentinel-3*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Estimación del peligro de incendio con índices de humedad y de sequía meteorológica: experiencias de los grandes incendios de 2025

Torres-Vázquez, Miguel Ángel [(1)], Oliva, Patricia [(1)], Solano-Romero, Erika [(1)], Pampanoni, Valerio [(2)], Franquesa, Magí [(3)], Chuvieco, Emilio [(1)]

[(1)] Environmental Remote Sensing Research Group, Department of Geology, Geography and the Environment, Universidad de Alcalá, Spain.

0000-0001-8897-9337, miguela.torres@uah.es ; 0000-0001-5051-3662, patricia.oliva@uah.es

0009-0009-7040-1161, erika.solano@uah.es ; 0000-0001-5618-4759, emilio.chuvieco@uah.es

[(2)] School of Aerospace Engineering, Sapienza University Rome, Italy.

0000-0002-9946-1303, valerio.pampanoni@uniroma1.it

[(3)] Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Spain.

0000-0003-3101-0394, magifranquesa@gmail.com

Resumen: El aumento reciente de grandes incendios bajo condiciones de sequía intensa ha reforzado la necesidad de contar con indicadores espaciales y actualizables del estado hídrico del combustible. En este estudio se evaluó la utilidad del Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI), derivado de Sentinel-3, para caracterizar las condiciones previas a incendios extremos, comparándolo con el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración a 3 meses (SPEI-3) como referencia de sequía meteorológica. El análisis se centró en diez grandes incendios (>10.000 ha) ocurridos en agosto de 2025 en el sector noroccidental de la península Ibérica. Se compararon tres ámbitos espaciales: el interior de los perímetros quemados, un buffer externo de 5 km y zonas alejadas utilizadas como control. Los resultados muestran un deterioro sostenido de las condiciones hídricas durante el verano. El SPEI-3 evolucionó hacia valores más negativos, alcanzando niveles severos a extremos (≤ -2) en las dos últimas semanas de agosto. El NDWI descendió gradualmente desde junio y presentó una caída abrupta al final de agosto dentro de los perímetros, más moderada en el buffer y menos marcada en las zonas alejadas. La relación entre NDWI y SPEI-3, evaluada mediante el coeficiente de correlación de Pearson, fue mayor en los perímetros (0,68) y en el buffer (0,64) que en las zonas alejadas (0,51).

Palabras clave: Incendios forestales, índices de humedad, Índices de sequía, Sentinel-3

Estimating fire danger using moisture indices and meteorological drought indices: experiences from the large 2025 wildfires

Abstract: *The recent increase in large wildfires under intense drought conditions has reinforced the need for spatially explicit and updatable indicators of fuel water status. This study assessed the usefulness of the Normalized Difference Water Index (NDWI), derived from Sentinel-3, for characterizing pre-fire conditions associated with extreme wildfires, and compared it with the 3-month Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI-3) as a reference indicator of meteorological drought. The analysis focused on ten large wildfires (>10,000 ha) that occurred in August 2025 in the northwestern sector of the Iberian Peninsula. Three spatial domains were compared: the interior of the burned perimeters, a 5-km external buffer, and distant areas used as controls. The results show a sustained deterioration of hydric conditions during the summer. SPEI-3 evolved towards more negative values, reaching severe to extreme levels (≤ -2) during the last two weeks of August. NDWI decreased gradually from June onward and showed an abrupt drop at the end of August within the perimeters, more moderate in the buffer and less pronounced in the distant areas. The relationship between NDWI and SPEI-3, assessed using Pearson's correlation coefficient, was stronger within the perimeters (0.68) and in the buffer (0.64) than in the distant areas (0.51).*

Keywords*: Wildfires, moisture indices, drought indices, Sentinel-3*

1. INTRODUCCIÓN

Si bien a escala global existe cierto consenso sobre la reducción de la superficie afectada por incendios (Andela *et al*., 2017), también parece evidenciarse un incremento de los incendios extremos y catastróficos, asociado a condiciones climáticas anómalas, en particular olas de calor y sequías extremas (Cunningham *et al*., 2024). Estas temporadas representan un desafío creciente para reducir la vulnerabilidad social y ambiental ante estos eventos. Para ello, es necesario mejorar la capacidad de predecir estas situaciones, tanto a medio plazo, atendiendo a los factores estructurales de riesgo, como a corto plazo, considerando los aspectos meteorológicos (Torres-Vázquez *et al*., 2025). Además, la evaluación del riesgo debe considerar no sólo el peligro, sino también la vulnerabilidad y la exposición, desde una perspectiva holística (Chuvieco *et al*., 2023). En este contexto, la teledetección resulta de gran interés, ya que proporciona información espacialmente completa y en tiempos relativamente cortos, tanto para la evaluación pre-incendio como para el análisis de sus consecuencias (Chuvieco *et al*., 2020).

La temporada de incendios del verano de 2025 en la península Ibérica puso de manifiesto las limitaciones de los sistemas actuales de evaluación del riesgo y la necesidad de contar con herramientas de teledetección capaces de monitorizar los incendios activos y las áreas recientemente quemadas. La magnitud de los incendios registrados, con miles de personas desplazadas y valores históricos de superficie quemada, confirmó la necesidad de disponer de información actualizada, precisa y completa para comprender mejor estos episodios y apoyar la gestión de su evolución y recuperación posterior (Sánchez-Hernández *et al*., 2025).

Entre los principales factores de peligro destacan la humedad y la cantidad de combustible, la probabilidad de ignición y las condiciones topográficas. Sin embargo, la evaluación actual del riesgo se basa todavía en gran medida en variables meteorológicas y no incorpora de forma suficiente información sobre el estado y la dinámica del combustible. Por ello, resulta necesario mejorar la estimación del peligro mediante métodos que proporcionen información fiable y espacialmente completa sobre el contenido de humedad del combustible (FMC, por sus siglas en inglés). Aunque el FMC puede estimarse a partir de variables meteorológicas o mediante mediciones directas en campo, ambos enfoques presentan limitaciones (Ruffault *et al*., 2018; Yebra *et al*., 2019). Frente a ello, las observaciones satelitales ofrecen una alternativa sólida, basada principalmente en la absorción del agua en el infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés) y, en menor medida, en el infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés; Yebra *et al*., 2013, 2024).

El objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de los índices de humedad derivados de imágenes de satélite para predecir el riesgo de incendios extremos, utilizando como caso de estudio los grandes incendios que afectaron al sector noroccidental de la península Ibérica en agosto de 2025. Asimismo, se compara su capacidad predictiva con la de otros indicadores de sequía, en particular el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés) propuesto por Vicente-Serrano *et al*. (2010).

2. MÉTODOS

Para analizar el impacto de los grandes incendios del verano de 2025, se delimitaron los perímetros a partir de datos Sentinel-3 y se seleccionaron únicamente los eventos con una superficie superior a 10.000 ha. Posteriormente, los polígonos se recortaron al límite administrativo de España. La Figura 1 muestra la localización de los incendios analizados y los tres ámbitos de estudio definidos a partir de esta cartografía: (i) el interior de los perímetros (área quemada), (ii) un buffer externo de 5 km alrededor de cada perímetro, excluyendo la superficie quemada, y (iii) áreas alejadas en las provincias de Soria, Burgos y Teruel, seleccionadas como zonas de control por situarse fuera de la influencia directa de los incendios analizados. En los tres ámbitos se consideraron los tipos de combustible (FT, por sus siglas en inglés) elaborados por Aragoneses *et al*. (2023). En las áreas alejadas se aplicó, además, un muestreo aleatorio estratificado del 30% de las celdas según las clases de FT.

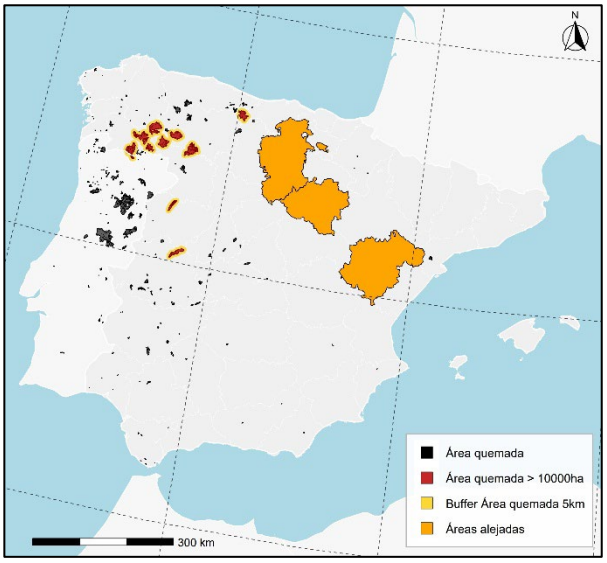


Figura 1. Localización de los incendios registrados durante el verano de 2025 en la península ibérica (en negro), de los incendios de más de 10.000 ha seleccionados en España (en rojo), de sus áreas buffer externas (en amarillo) y de las áreas distantes utilizadas como zonas de control (en naranja).

El contexto meteorológico se evaluó mediante el índice SPEI a escala de tres meses (SPEI-3), utilizando datos semanales en formato NetCDF del Monitor de Sequía Meteorológica del CSIC, correspondientes al periodo entre la primera semana de junio y la última de agosto de 2025 (12 pasos temporales; véase https://monitordesequia.csic.es/monitor/). La respuesta de la vegetación se representó mediante el Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI, por sus siglas en inglés), empleado como indicador de cambios en el contenido hídrico de la vegetación y, de forma indirecta, en la humedad del combustible (Gao, 1996):

$$NDWI = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad (1)$$

Para su cálculo se utilizaron mosaicos Sentinel-3 Synergy/SLSTR en geometría nadir, con las bandas S3N (865 nm; NIR) y S5N (1,61 µm; SWIR1), disponibles como compuestos de 8 días. Cuando fue necesario, tanto el NDWI como el SPEI-3 se reproyectaron a la rejilla FT mediante interpolación bilineal. Después, ambas variables se enmascararon según las tres zonas de análisis y se extrajeron valores por celda y clase de FT para su análisis temporal y comparación espacial. Cada compuesto de NDWI se emparejó con el valor semanal de SPEI-3 más próximo, con una tolerancia de ±1 día. La relación entre ambas variables se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson. El conjunto final incluyó 10 perímetros, asociados principalmente a incendios ocurridos en las dos últimas semanas de agosto de 2025. Por ello, las series temporales abarcan tanto el periodo pre-incendio, desde comienzos de junio, como la fase de impacto directo del fuego a finales de agosto. Dado el tamaño de píxel de Sentinel-3, los valores de NDWI dentro de los perímetros pueden verse afectados por píxeles mixtos. En consecuencia, parte de la variabilidad observada puede reflejar no solo cambios en la humedad del combustible, sino también diferencias en la composición y fenología de la vegetación.

3. RESULTADOS

En los 10 perímetros de incendio, la clase de cobertura vegetal dominante fue matorral alto (~26%), seguida de turbera herbácea (~20%), pastizal bajo (~16%) y turbera forestal (~15%). El cultivo de cereal aportó ~7%, mientras que el resto de las clases individuales registró porcentajes inferiores. La Figura 2 muestra, para cuatro clases FT (bosque frondoso caducifolio cerrado, bosque de coníferas perennifolio cerrado, turbera herbácea y matorral alto), la evolución semanal (12 semanas; junio–agosto) del NDWI (paneles a–d) y del SPEI-3 (paneles e–h) en tres zonas: perímetros, buffer de 5 km y áreas distantes. El NDWI descendió de forma gradual desde junio en las tres zonas, pero mostró una caída abrupta en las dos últimas fechas de agosto (17 y 24) dentro de los perímetros, visible en todas las coberturas. En el buffer de 5 km, ese descenso final fue más moderado, mientras que las áreas distantes mantuvieron valores relativamente más estables. Por su parte, el SPEI-3 mostró una progresión hacia valores más negativos a lo largo del periodo, con un empeoramiento marcado en las dos últimas semanas, cuando perímetros y buffer alcanzaron valores excepcionalmente extremos (SPEI-3 ≤ -2), mientras que en las áreas distantes persistió una sequía moderada.

La correlación de Pearson entre NDWI y SPEI-3 se calculó por celda y se resumió como promedio por zona y tipo de cubierta. Considerando todas las coberturas, la asociación fue mayor en el interior de los perímetros (0,68) y en el buffer de 5 km (0,64) que en las zonas distantes (0,51). Por clases, destacaron valores altos en cereal (0,82 en perímetros), matorral alto (0,74 en perímetros; 0,71 en buffer) y bosque frondoso caducifolio cerrado (0,70 en perímetros; 0,68 en buffer). En contraste, la asociación fue muy débil en turbera forestal en zonas distantes (0,09) y baja o negativa en bosque de coníferas perennifolio cerrado en zonas distantes (−0,19).

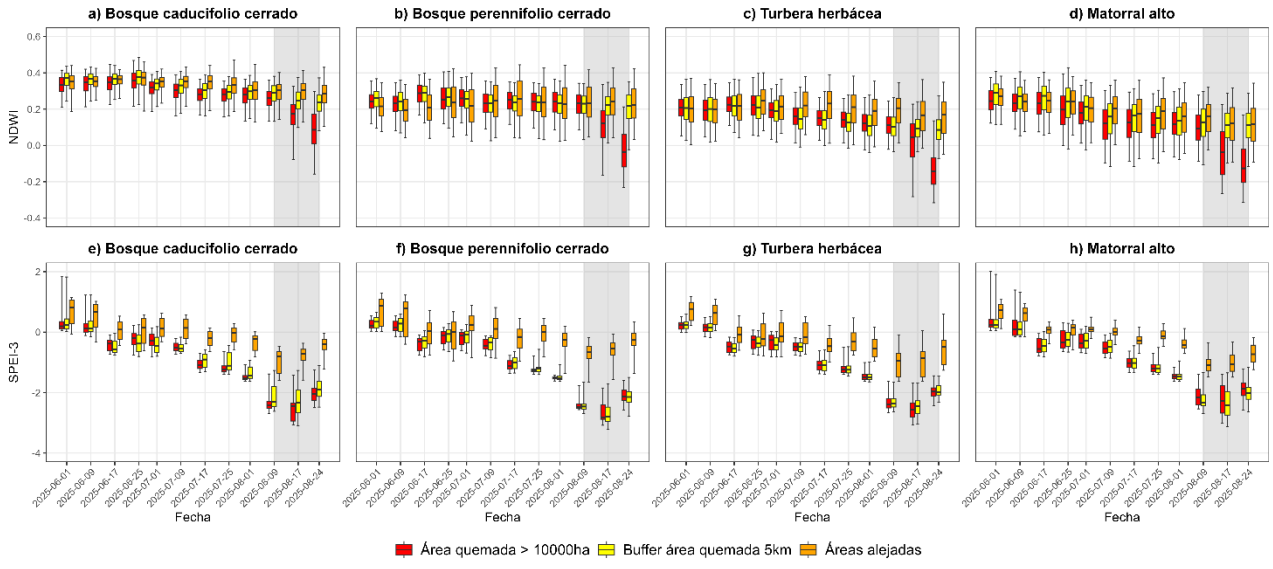


Figura 2. Distribución temporal del Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI; paneles a–d) y del Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración a 3 meses (SPEI-3; paneles e–h) en cuatro clases FT (según Aragoneses *et al*., 2023) y tres zonas (perímetros de área quemada, buffer de 5 km y áreas lejanas). Las cajas representan el rango intercuartílico (P25–P75), la línea central indica la mediana y los bigotes corresponden a los percentiles 2,5 y 97,5. El sombreado gris señala el periodo con incendios, aproximadamente entre el 9 y el 24 de agosto de 2025.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En conjunto, los grandes incendios de finales de agosto de 2025 se desarrollaron bajo condiciones de sequía meteorológica severa a extrema, acompañadas por un descenso progresivo del NDWI, lo que refuerza el interés de combinar indicadores meteorológicos y de teledetección para caracterizar situaciones favorables a incendios extremos. La mayor correlación NDWI–SPEI-3 en los perímetros y en el buffer de 5 km sugiere un acoplamiento más estrecho entre el forzamiento atmosférico y la respuesta de la vegetación en las zonas más próximas a los incendios, mientras que la menor asociación en áreas distantes y en algunas coberturas forestales apunta a la influencia adicional de factores estructurales, fenológicos y espaciales, así como a una respuesta más amortiguada del dosel frente al déficit hídrico. Asimismo, el patrón temporal observado indica que los descensos más acusados del SPEI-3 tienden a preceder a los del NDWI, lo que resulta coherente con un cierto retardo en la respuesta de la vegetación frente a la sequía (Vicente-Serrano *et al*., 2013). No obstante, la evidencia es correlacional y no permite establecer causalidad, ya que la ocurrencia y propagación del fuego dependen también de la ignición, la meteorología de corta escala y la estructura y continuidad del combustible. Futuros trabajos deberían explorar distintas escalas de acumulación de la sequía (por ejemplo, 1, 6 y 12 meses), así como incorporar métricas más directas del estado del combustible, como el contenido de humedad del combustible vivo (LFMC, por sus siglas en inglés), para mejorar la interpretación del vínculo entre sequía, disponibilidad de combustible y peligro de incendio (Yebra *et al*., 2013, 2024).

5. AGRADECIMIENTOS

Proyecto FireCCI de la Agencia Espacial Europea (ESA), número de contrato 4000126706/19/i-nb

6. REFERENCIAS

Andela, N., Morton, D. C., Giglio, L., Chen, Y., van der Werf, G. R., Kasibhatla, P. S., ... & Randerson, J. T. (2017). A human-driven decline in global burned area. *Science*, *356*(6345), 1356-1362. https://doi.org/10.1126/science.aal4108

Aragoneses, E., García, M., Salis, M., Ribeiro, L. M., & Chuvieco, E. (2023). Classification and mapping of European fuels using a hierarchical, multipurpose fuel classification system. *Earth System Science Data*, *15*(3), 1287-1315. https://doi.org/10.5194/essd-15-1287-2023

Chuvieco, E., Aguado, I., Salas, J., García, M., Yebra, M., & Oliva, P. (2020). Satellite remote sensing contributions to wildland fire science and management. *Current Forestry Reports*, *6*(2), 81-96. https://doi.org/10.1007/s40725-020-00116-5

Chuvieco, E., Yebra, M., Martino, S., Thonicke, K., Gómez-Giménez, M., San-Miguel, J., ... & Viegas, D. (2023). Towards an integrated approach to wildfire risk assessment: when, where, what and how may the landscapes burn. *Fire*, *6*(5), 215. https://doi.org/10.3390/fire6050215

Cunningham, C. X., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. (2024). Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature ecology & evolution*, *8*(8), 1420-1425. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2

Gao, B. C. (1996). NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58(3), 257–266. 10.1016/S0034-4257(96)00067-3

Ruffault, J., Martin-StPaul, N., Pimont, F., & Dupuy, J. L. (2018). How well do meteorological drought indices predict live fuel moisture content (LFMC)? An assessment for wildfire research and operations in Mediterranean ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, *262*, 391-401. 10.1016/j.agrformet.2018.07.031

Sánchez Hernández, G., Turco, M., Repeto Deudero, I., Royé, D., Baudena, M., Montávez, J. P., Pietroiusti, R., Provenzale, A., Santin, C., Torres Vázquez, M. Á., & Pausas, J. G. (2025). Record breaking 2025 European wildfires concentrated in Northwest Iberia. Global Change Biology, 31(12), e70649. https://doi.org/10.1111/gcb.70649

Torres-Vázquez, M. Á., Herrera, S., Gincheva, A., Halifa-Marín, A., Cavicchia, L., Di Giuseppe, F., ... & Turco, M. (2025). Enhancing seasonal fire predictions with hybrid dynamical and random forest models. *npj Natural Hazards*, *2*(1), 20. https://doi.org/10.1038/s44304-025-00069-4

Vicente Serrano, S. M., Beguería, S., & López Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, 23(7), 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Vicente-Serrano, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., ... & Sanchez-Lorenzo, A. (2013). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(1), 52-57. https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110

Yebra, M., Dennison, P. E., Chuvieco, E., Riaño, D., Zylstra, P., Hunt Jr, E. R., ... & Jurdao, S. (2013). A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. *Remote Sensing of Environment*, *136*, 455-468. 10.1016/j.rse.2013.05.029

Yebra, M., Scortechini, G., Badi, A., Beget, M. E., Boer, M. M., Bradstock, R., ... & Ustin, S. (2019). Globe-LFMC, a global plant water status database for vegetation ecophysiology and wildfire applications. *Scientific data*, *6*(1), 155. https://doi.org/10.1038/s41597-019-0164-9

Yebra, M., Scortechini, G., Adeline, K., Aktepe, N., Almoustafa, T., Bar-Massada, A., ... & Younes Cardenas, N. (2024). Globe-LFMC 2.0, an enhanced and updated dataset for live fuel moisture content research. *Scientific data*, *11*(1), 332. https://doi.org/10.1038/s41597-024-03159-6

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.245

Simulación de la evolución del riesgo de incendio basado en LiDAR multitemporal: efecto de la gestión de la madera quemada a escala de paisaje en masas de *Pinus pinaster*

Marino del Amo, Eva [1] **Arellano Pérez, Stefano** [2] **Villegas Ranera, Olmo** [3] **Carrillo García, Cristina** [1] **Martín Alcón, Santiago** [2] **Tomé Morán, José Luis** [2] **Madrigal Olmo, Javier** [1] **Guijarro Guzmán, Mercedes** [1]

[1] ICIFOR-INIA, CSIC, España

[2] Agresta Sociedad Cooperativa, España

[3] ETSI Forestal y Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid, España

ORCID: Marino del Amo 0000-0002-2397-5543 Arellano Pérez 0000-0003-2164-8618 Carrillo García 0000-0002-7486-072X Martín Alcón 0000-0002-5327-5695 Tomé Morán 0000-0003-2298-9115 Madrigal Olmo 0000-0001-7614-0737 Guijarro Guzmán 0000-0001-6460-9171

Correspondencia: eva.marino@inia.csic.es sarellano@agresta.org o.villegas@alumnos.upm.es cristina.carrillo@inia.csic.es smalcon@agresta.org jltome@agresta.org incendio@inia.csic.es guijarro@inia.csic.es

RESUMEN

Conocer el impacto de alternativas de gestión de la madera quemada sobre la regeneración post-incendio y los combustibles forestales asociados a lo largo del tiempo es fundamental para determinar el riesgo de recurrencia y severidad potencial del fuego. Este estudio analizó los efectos a medio plazo de la gestión post-incendio de la madera quemada en masas de Pinus pinaster tras el incendio de El Rodenal (Guadalajara, 2005), que afectó más de 12.000 ha incluyendo pinares jóvenes y maduros. A partir de la caracterización de los combustibles existentes 8 y 16 años después del fuego (2013 y 2021), se analizó la evolución del riesgo de incendio a escala de paisaje comparando la corta y saca de la madera quemada (escenario real) frente a no intervención (escenario ficticio). Se generó cartografía de modelos de combustible post-incendio a partir de la primera y segunda cobertura LiDAR-PNOA, asociando los parámetros de cargas y alturas en función de datos de parcelas de seguimiento de la regeneración. Con las cartografías obtenidas se realizaron simulaciones del comportamiento del fuego bajo distintos escenarios de riesgo meteorológico (moderado, alto y extremo). Los resultados a escala de paisaje mostraron que la saca de madera redujo la carga de combustible grueso, pero favoreció la regeneración de herbáceas y matorral, aumentando la continuidad del combustible y el riesgo de mayor velocidad de propagación. Por el contrario, la no intervención favoreció árboles muertos en pie, retrasando la regeneración, pero acumulando gran cantidad de combustible muerto que aumentó la intensidad y severidad potencial del fuego. En ambos casos, la evolución de la vegetación tras incendio mostró un aumento de la carga de combustible y su riesgo asociado. Este estudio destaca la necesidad de realizar una gestión preventiva tras el fuego a medio plazo, para reducir la recurrencia de incendios severos y evitar daños irreversibles en ecosistemas previamente quemados.

Palabras clave: *Regeneración post-incendio, LiDAR-PNOA, modelos de combustible, comportamiento del fuego, FlamMap*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Simulación de la evolución del riesgo de incendio basado en LiDAR multitemporal: efecto de la gestión de la madera quemada a escala de paisaje en masas de *Pinus pinaster*

Marino del Amo, Eva [(1)], Arellano Pérez, Stefano [(2)], Villegas Ranera, Olmo [(3)], Carrillo García, Cristina [(1)], Martín Alcón, Santiago [(2)], Tomé Morán, José Luis [(2)], Madrigal Olmo, Javier [(1)], Guijarro Guzmán, Mercedes [(1)]

[(1)] ICIFOR-INIA, CSIC, España.

0000-0002-2397-5543, eva.marino@inia.csic.es ; 0000-0002-7486-072X, cristina.carrillo@inia.csic.es

0000-0001-7614-0737, incendio@inia.csic.es ; 0000-0001-6460-9171, guijarro@inia.csic.es

[(2)] Agresta Sociedad Cooperativa, España.

0000-0003-2164-8618, sarellano@agresta.org ; 0000-0002-5327-5695, smalcon@agresta.org

0000-0003-2298-9115, jltome@agresta.org

[(3)] ETSI Forestal y Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid, España.

o.villegas@alumnos.upm.es

Resumen: Conocer el impacto de alternativas de gestión de la madera quemada sobre la regeneración post-incendio y los combustibles forestales asociados a lo largo del tiempo es fundamental para determinar el riesgo de recurrencia y severidad potencial del fuego. Este estudio analizó los efectos a medio plazo de la gestión post-incendio de la madera quemada en masas de *Pinus pinaster* tras el incendio de El Rodenal (Guadalajara, 2005), que afectó más de 12.000 ha incluyendo pinares jóvenes y maduros. A partir de la caracterización de los combustibles existentes 8 y 16 años después del fuego (2013 y 2021), se analizó la evolución del riesgo de incendio a escala de paisaje comparando la corta y saca de la madera quemada (escenario real) frente a no intervención (escenario ficticio). Se generó cartografía de modelos de combustible post-incendio a partir de la primera y segunda cobertura LiDAR-PNOA, asociando los parámetros de cargas y alturas en función de datos de parcelas de seguimiento de la regeneración. Con las cartografías obtenidas se realizaron simulaciones del comportamiento del fuego bajo distintos escenarios de riesgo meteorológico (moderado, alto y extremo). Los resultados a escala de paisaje mostraron que la saca de madera redujo la carga de combustible grueso, pero favoreció la regeneración de herbáceas y matorral, aumentando la continuidad del combustible y el riesgo de mayor velocidad de propagación. Por el contrario, la no intervención favoreció árboles muertos en pie, retrasando la regeneración, pero acumulando gran cantidad de combustible muerto que aumentó la intensidad y severidad potencial del fuego. En ambos casos, la evolución de la vegetación tras incendio mostró un aumento de la carga de combustible y su riesgo asociado. Este estudio destaca la necesidad de realizar una gestión preventiva tras el fuego a medio plazo, para reducir la recurrencia de incendios severos y evitar daños irreversibles en ecosistemas previamente quemados.

Palabras clave: Regeneración post-incendio, LiDAR-PNOA, modelos de combustible, comportamiento del fuego, FlamMap.

Simulation of wildfire risk evolution based on multitemporal LiDAR: effect of burned wood management at landscape scale in Pinus pinaster stands

Abstract: *Understanding the impact of different management options of burned wood on post-fire regeneration and associated forest fuels over time is essential for determining fire recurrence and potential severity. This study analyzed the medium-term effects of post-fire management of burned wood in Pinus pinaster forests following the El Rodenal wildfire (Guadalajara, 2005), which affected more than 12,000 hectares including young and mature pine stands. Based on the characterization of existing forest fuels 8 and 16 years after the fire (2013 and 2021), we evaluated the potential wildfire risk at landscape scale comparing two management options: logging and removal of burned wood (real scenario) versus no treatment (hypothetical scenario). Post-fire fuel model mapping was performed from the first and second coverage of LiDAR-PNOA flights*

available in the study area. Load and height parameters were associated to each fuel model through field data from regeneration monitoring plots. Based on these maps, fire behaviour simulations were conducted in FlamMap under different weather risk scenarios (moderate, high, and extreme). The results at landscape level indicated that logging (real scenario) reduced coarse fuel load but encouraged regeneration of shrub and grass fuel types, increasing fuel continuity and the risk of fast-spreading fires. In contrast, absence of treatment (hypothetical scenario) preserved standing dead trees, delaying shrub encroachment but resulting in a significant accumulation of dead fuel that increased potential fire intensity and severity. These findings highlight the need of a proactive fuel management in regenerated vegetation after the fire in the mid-term in order to mitigate the potential recurrence of severe wildfires and prevent irreversible damage to previously burned ecosystems.

Keywords: *Post-fire regeneration, LiDAR-PNOA, fuel models, fire behaviour, FlamMap*

1. INTRODUCCIÓN

La restauración post-incendio en las masas forestales incluye diferentes estrategias dirigidas a recuperar la funcionalidad de los ecosistemas tras el fuego, mitigando sus efectos negativos. La retirada de la madera quemada mediante apeo del arbolado afectado es una de las prácticas habituales, tanto para favorecer la regeneración y aprovechar la madera de calidad de árboles muertos en pie, como para establecer fajinas y/o albarradas para control de la erosión. Sin embargo, se desconoce el efecto de esta gestión post-incendio en la evolución del paisaje combustible y en la peligrosidad de futuros incendios forestales, en especial en zonas con una alta severidad del fuego.

La tecnología LiDAR es una potente herramienta para evaluar los cambios estructurales en la vegetación a escala de paisaje. En España disponemos de varias coberturas nacionales de los vuelos LiDAR del PNOA, que permiten disponer de datos muy útiles para el análisis espacial y temporal de la regeneración en zonas afectadas por incendios.

El objetivo de este trabajo fue analizar la evolución estructural del combustible y el comportamiento del fuego asociado a escala de paisaje en una zona previamente quemada, según distintos escenarios de gestión post-incendio (extracción o no de la madera quemada) y condiciones ambientales (nivel de riesgo meteorológico). Para ello, se desarrolló una metodología que combina cartografía previa, datos de campo, datos LiDAR y simulaciones de incendios forestales.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y datos de campo

El área de estudio abarca la superficie afectada por el gran incendio forestal ocurrido en la comarca de El Rodenal (Guadalajara) en 2005 que afectó a 12.875 hectáreas (Fig. 1). La mayoría del área quemada correspondía a masas arboladas dominadas por pinares jóvenes (PJ, latizal de 30-40 años) y maduros (PV, fustal de 80-90 años) de *Pinus pinaster.*

En esta zona quemada se disponía de información de 14 parcelas permanentes (40 x 40 m), establecidas tras el incendio por TRAGSA, en las que el laboratorio de incendios forestales del ICIFOR-INIA llevó a cabo el seguimiento de la regeneración a largo plazo. El diseño de experimental incluía pares de parcelas con distinto tipo de gestión post-incendio en ambas masas de pinar (PJ y PV):

- corta y saca de la madera quemada (escenario real, aplicado en la mayoría del incendio).
- sin intervención (escenario ficticio, existente sólo en las parcelas testigo no cortadas).

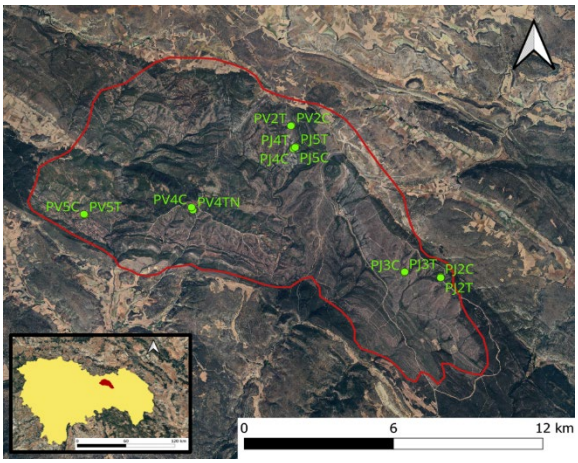


Figura 1. Área de estudio en la provincia de Guadalajara, con perímetro del incendio (rojo) y ubicación de las parcelas de muestreo (verde) en las masas de pinar.

La caracterización del combustible forestal existente tras el incendio, compuesto mayormente por regenerado de jara (*Cistus* sp.), rebollo (*Quercus pyrenaica)* y pino (*P. pinaster)*, se determinó a partir de la información obtenida en muestreos destructivos en las parcelas de campo para los años 2013 y 2021 (8 y 16 años tras el fuego, respectivamente). De esta forma se disponía de cuatro combinaciones posibles, diferenciando dos clases naturales de edad previa al incendio, pinar joven (PJ) y maduro (PV), y dos tipos de gestión: el escenario real de corta y saca de madera quemada (C, cortado) y el escenario ficticio de no intervención (T, testigo).

2.2. Datos LiDAR y generación de cartografía

A partir de la información de las parcelas de campo, para la caracterización del combustible a escala de paisaje se

han utilizado diferentes fuentes de datos. Por un lado, para la identificación de la estructura del combustible se utilizó LiDAR-PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) del IGN (Instituto Geográfico Nacional) correspondientes a vuelos de la 1ª (2009, 0,5 p/m^2) y 2ª cobertura (2017, 1 p/m^2) disponibles en la zona de estudio. La identificación de los tipos de vegetación en el área quemada se realizó a partir del Mapa Forestal Español (MFE) previo al incendio (MFE50 2004) y posterior (MFE25 2022). Esta información permitió segmentar la zona de estudio en función del tipo de masa arbolada previa (PV y PJ), así como áreas residuales de pastizal, matorral y otros tipos de arbolado existentes.

Siguiendo la metodología de Marino *et al.* (2016), en función del tipo de vegetación identificado (pastizal, matorral, arbolado) se definieron algoritmos específicos de clasificación de los combustibles según el sistema NFFL-Rothermel (Anderson 1982), pero con parámetros adaptados a la zona de estudio. Mediante análisis de regresión se analizó la correlación entre las métricas LiDAR y la altura del combustible medida en campo (*Fuel Depth,* FD*)* con el fin de extrapolar al resto del área de pinar afectado. Esta correlación se hizo diferenciando las parcelas según el tipo de masa (PJ y PV) en cada fecha de estudio (2013 y 2021). Las métricas seleccionadas y los umbrales calibrados con datos de campo se utilizaron para identificar modelos de combustible específicos. Para el escenario ficticio, en que sólo se disponía de datos LiDAR en las parcelas testigo no cortadas, se hizo un ajuste de los valores de las métricas seleccionadas a partir de la diferencia de los valores promedio entre los dos tipos de gestión: cortado (C) y testigo no cortado (T). En el resto de vegetación residual dentro del perímetro, al no tener datos de campo para correlacionar con los datos LiDAR, se utilizó la métrica que representa la altura media de los retornos (*zmean*), sin necesidad de ajustes para las cartografías del escenario real y ficticio al quedar fuera de las actuaciones post-incendio del pinar.

Aplicando los diferentes algoritmos definidos y los respectivos umbrales calibrados para las métricas LiDAR seleccionadas, que fueron procesadas en pixeles de 20m, se obtuvieron 4 cartografías ráster de modelos de combustible correspondientes a los escenarios real (corta y saca de madera quemada) y ficticio (no intervención) a los 8 y 16 años después del incendio. Para las simulaciones, a cada modelo se le asignaron los parámetros de cargas de cada escenario de gestión y masa previa derivados de los inventarios destructivos. En los modelos de combustible no presentes en las parcelas, se usaron los parámetros NFFL-Rothermel adaptados a combustibles mediterráneos derivados de trabajos previos (Arellano-Pérez *et al*. 2025).

2.3. Simulaciones y análisis del riesgo

Las cartografías de modelos de combustible obtenidas, junto al resto de capas ráster de 20 m necesarias como inputs (MDT, FCC, etc.), fueron utilizadas para generar archivos de paisaje (*landscape* o LCP) y realizar simulaciones con el software FlamMap (versión 6.2), obteniendo así el comportamiento del fuego asociado a cada tipología de complejos de combustible existentes en ambas fechas (2013 y 2021) según el escenario de gestión post-incendio (real y ficticio). En cuanto a las condiciones ambientales, se simularon tres niveles de riesgo meteorológico (moderado, alto y extremo), que definen los parámetros de humedad del combustible vivo y muerto, y la velocidad del viento a 10 m de altura (Tabla 1). Estos valores fueron determinados mediante seguimiento del contenido de humedad en las parcelas de campo y datos de estaciones meteorológicas cercanas (Carrillo 2025).

Tabla 1. Condiciones de riesgo ambiental en las simulaciones. FMC, humedad del combustible (*fuel moisture content*)

Variable		Nivel de riesgo		
		Moderado	Alto	Extremo
FMC vivo (%)		135	70	35
FMC muerto (%)	1h	9	7	5
	10h	10	8	6
	100h	12	10	8
Viento a 10 m de altura (km/h)		20	40	60

Las simulaciones realizadas en FlamMap fueron estáticas, considerando que ardieran todos los pixeles del área de estudio (i.e. independientemente del punto de ignición). Los resultados analizados fueron las principales variables de comportamiento de un incendio forestal, que permitieron obtener las zonas fuera de capacidad de extinción para los pixeles donde se cumplía al menos una de las siguientes situaciones:

- Velocidad de propagación (ROS) > 33 m/min
- Longitud de llama (FL) > 2,5 m
- Intensidad lineal del frente de llama (FI) > 4.000 kW/m

A partir de los resultados de estas cartografías derivadas de las simulaciones, se calcularon estadísticas para evaluar el impacto potencial de los incendios en cada escenario, tanto para cada variable de comportamiento del fuego como para las zonas fuera de capacidad de extinción.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de regresión entre los datos LiDAR y los derivados de los inventarios de campo permitió elegir las mejores métricas para la estimación de la altura del combustible. Esta variable es fundamental para la determinación de modelos de combustible, y es habitualmente empleada para estimación de cargas en complejos de combustible de tipo matorral (Vega *et al.* 2022), que fueron los dominantes dentro la vegetación regenerada tanto en las parcelas como dentro del perímetro del incendio. En la Tabla 2 se muestran las métricas con mayor correlación, que varían en función del año analizado y tipo de masa arbolada previa al incendio (PJ y PV). Estas diferencias no sólo se pueden deber a la distinta estructura de los complejos de combustible observados en las parcelas para la vegetación regenerada, sino también a la diferente densidad entre los vuelos LiDAR-PNOA de la 1ª y 2ª cobertura (0,5 y 1 p/m^2) utilizados para comparar en ambos años de seguimiento en campo. Para las masas de pinar maduro o fustal (PV), en la primera fecha de estudio (2013) se compararon los valores de las parcelas con la nube de puntos sólo por debajo de 2 m, con el fin

de evitar el ruido producido por los retornos de las copas de los árboles quemados aún en pie. Estos resultados también ponen de manifiesto la importancia de la calibración con datos de campo para mejorar el ajuste en la identificación de la estructura de los combustibles, en especial al extrapolarlos para generar cartografías a partir de vuelos LiDAR de distinta densidad de pulsos.

Tabla 2. Métricas LiDAR seleccionadas para estimar la altura del combustible regenerado. * Retornos por debajo de 2 m

Año	Tipo de masa	Métrica LiDAR	R^2
2013	PJ (latizal)	Percentil 80	0,998
	PV (fustal)	Percentil 10*	0,895
2021	PJ (latizal)	Percentil 25	0,665
	PV (fustal)	Percentil 30	0,903

En cuanto al comportamiento del fuego en los distintos escenarios, la gestión post-incendio tuvo un impacto significativo a escala de paisaje, siendo variable a lo largo del tiempo. Los resultados indicaron que la extracción de madera (escenario real) redujo la carga de combustible grueso, pero favoreció la regeneración de modelos de combustible de herbáceas y matorral, aumentando la continuidad del combustible y el riesgo de incendios de mayor velocidad de propagación. Por el contrario, la no intervención (escenario ficticio) dejó árboles muertos en pie, retrasando la regeneración inicial, pero acumulando gran cantidad de combustible muerto. Este combustible muerto, que fue cayendo e incorporándose a los combustibles de superficie, aumentó la intensidad y longitud de llama, y en consecuencia la severidad potencial del fuego. Independientemente de la gestión o no de la madera quemada, la evolución de la vegetación dentro del perímetro del incendio mostró un aumento de la carga de combustible y su riesgo asociado, estando actualmente fuera de capacidad de extinción para situaciones meteorológicas de riesgo alto y extremo (Fig. 2), habituales en la época estival y cada vez más frecuentes en los escenarios de cambio climático.

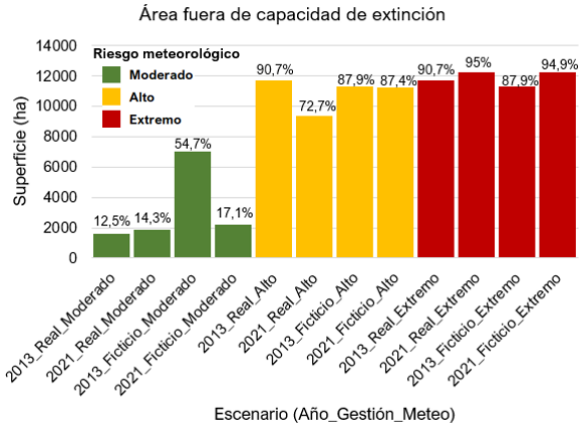


Figura 2. Superficie (ha y %) fuera de capacidad de extinción en los distintos escenarios simulados (2013 y 2021; Real *vs* Ficticio) según las condiciones meteorológicas de la Tabla 1.

A pesar de las limitaciones del estudio, como el número restringido de parcelas de campo o los desfases entre los inventarios de combustible y las fechas de adquisición de los datos LiDAR-PNOA, los resultados son útiles para proporcionar información cuantitativa y espacial sobre las diferencias en el comportamiento potencial del fuego entre ambos escenarios de gestión y su evolución temporal.

4. CONCLUSIONES

Este estudio propone una metodología de simulación del riesgo de incendio a partir de datos LiDAR aéreos de baja densidad para la evaluación de diferentes alternativas de gestión de las masas forestales quemadas a escala de paisaje. En el caso de estudio del incendio de El Rodenal de 2005, la evolución de los combustibles regenerados tras el fuego indica diferencias temporales en el comportamiento del fuego asociado a la extracción de la madera quemada del pinar frente a la no intervención, que se diluyen a lo largo del tiempo. Además, el riesgo potencial de recurrencia de incendio de alta intensidad observado a medio plazo apunta la necesidad de actuaciones urgentes de gestión del combustible para mitigar nuevos daños en estos ecosistemas ya quemados, que pueden ser aún más vulnerables en el actual contexto de cambio climático.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a todas las personas del Laboratorio de Incendios Forestales del ICIFOR-INIA (CSIC) que han participado en los sucesivos inventarios de campo.

6. REFERENCIAS

Anderson, H.E. (1982). Aids to Determining FuelModels for Estimating Fire Behavior. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-122. p. 20.

Arellano-Pérez, S., Molina-Martínez, J.R., Rodríguez y Silva, F., Tomé Morán, J.L., Martín-Alcón, S., Castelló, F.J., Senra, F., Marino, E. (2025). Manual de campo para la identificación y caracterización de los modelos de combustible de superficie de Andalucía. Junta de Andalucía, 202 pp.

Carrillo, C. (2025). Vulnerabilidad frente al fuego de masas forestales del Sistema Ibérico Central. Tesis Doctoral. E.T.S. Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Univ. Politécnica de Madrid.

Marino, E. Ranz P., Tomé, J.L., Noriega, M.A., Esteban, J., Madrigal, J. (2016). Generation of high-resolution fuel maps from discrete airborne LiDAR laser scanner data and Landsat-8 OLI: a low-cost and highly updated methodology for large areas. *Remote Sensing of Environment 187*, 267–280. DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.020.

Vega, J.A., Arellano-Pérez, S., Álvarez-González, J.G., Fernández, C., Jiménez, E., Fernández-Alonso, J.M., Vega-Nieva, D.J., Briones-Herrera, C., Alonso-Rego, C., Fontúrbel, T., Ruiz-González, A.D. (2022). Modelling aboveground biomass and fuel load components at stand level in shrub communities in NW Spain. *Forest Ecology and Management, 505*, 119926. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119926.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.270

Influencia del diseño muestral en la estimación del peligro de incendio forestal mediante XGBoost en el oeste de la Península Ibérica

Martínez García, Francisco Manuel [1] **Jiménez Romanillos, José** [2] **García Ramajo, Jorge Juan** [1] **Quirós, Elia** [1]

[1] Universidad de Extremadura, España

[2] Junta de Extremadura

ORCID: Martínez García 0000-0002-0862-9933 Jiménez Romanillos 0009-0009-0612-4390 García Ramajo 0009-0000-7296-3082 Quirós 0000-0002-8429-045X

Correspondencia: fmmgarcia@unex.es jose.jimenez@juntaex.es jjgarciar@unex.es equiros@unex.es

RESUMEN

Los incendios forestales han aumentado en frecuencia y severidad en el oeste de la Península Ibérica, en un contexto caracterizado por episodios térmicos extremos, sequías prolongadas y modificaciones estructurales del paisaje. Este trabajo analiza la capacidad del algoritmo XGBoost para estimar el peligro de incendio mediante la integración de variables meteorológicas de ERA5 land, índices espectrales de Sentinel-2 y factores territoriales estáticos. Se evalúa específicamente la influencia del diseño de muestreo, comparando tres configuraciones con distinta proporción de puntos negativos (50%, 75% y 100%) respecto a los positivos. Los modelos presentan un rendimiento elevado y estable (AUC entre 0,960 y 0,967; exactitud entre el 88,5 y el 90,2%), con ligeras mejoras al incrementar la representación de la clase no quemada. La humedad atmosférica, la cobertura del suelo y los indicadores del estado hídrico de la vegetación destacan entre los predictores más influyentes.

Palabras clave: *incendios forestales; XGBoost; peligro de incendio*

Fecha de recepción: 19 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Influencia del diseño muestral en la estimación del peligro de incendio forestal mediante XGBoost en el oeste de la Península Ibérica

Martínez García, Francisco Manuel [(1)], Jiménez Romanillos, José [(2)], García Ramajo, Jorge Juan [(1)], Quirós, Elia [(1)]

[(1)] Universidad de Extremadura, España.

0000-0002-0862-9933, fmmgarcia@unex.es ; 0009-0000-7296-3082, jjgarciar@unex.es

0000-0002-8429-045X, equiros@unex.es.

[(2)] Junta de Extremadura.

0009-0009-0612-4390, jose.jimenez@juntaex.es

Resumen: Los incendios forestales han aumentado en frecuencia y severidad en el oeste de la Península Ibérica, en un contexto caracterizado por episodios térmicos extremos, sequías prolongadas y modificaciones estructurales del paisaje. Este trabajo analiza la capacidad del algoritmo XGBoost para estimar el peligro de incendio mediante la integración de variables meteorológicas de *ERA5 land*, índices espectrales de *Sentinel-2* y factores territoriales estáticos. Se evalúa específicamente la influencia del diseño de muestreo, comparando tres configuraciones con distinta proporción de puntos negativos (50%, 75% y 100%) respecto a los positivos. Los modelos presentan un rendimiento elevado y estable (AUC entre 0,960 y 0,967; exactitud entre el 88,5 y el 90,2%), con ligeras mejoras al incrementar la representación de la clase no quemada. La humedad atmosférica, la cobertura del suelo y los indicadores del estado hídrico de la vegetación destacan entre los predictores más influyentes.

Palabras clave: incendios forestales; XGBoost; peligro de incendio.

Influence of Sampling Design on Wildfire Danger Estimation Using XGBoost in the Western Iberian Peninsula

***Abstract**: Forest fires have increased in frequency and severity in the west of the Iberian Peninsula, in a context characterized by extreme heat waves, prolonged droughts, and structural changes to the landscape. This study analyzes the capacity of the XGBoost algorithm to estimate fire risk by integrating ERA5 meteorological variables, Sentinel-2 spectral indices, and static territorial factors. The influence of the sampling design is specifically evaluated by comparing three configurations with different proportions of negative points (50%, 75%, and 100%) relative to positive points. The models show high and stable performance (AUC between 0.960 and 0.967; accuracy between 88.5 and 90.2%), with slight improvements when increasing the representation of the unburned class. Atmospheric humidity, land cover, and vegetation water status indicators stand out among the most influential predictors.*

***Keywords**: wildfire; XGBoost; fire danger.*

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales constituyen una de las principales amenazas ambientales en el sur de Europa, con especial incidencia en las regiones mediterráneas y atlánticas de la Península Ibérica, donde su frecuencia e intensidad han aumentado de forma notable en las últimas décadas. Este incremento supone una alteración significativa de los ecosistemas forestales cuando el fuego deja de responder a un régimen natural, fenómeno estrechamente vinculado al cambio climático y a la creciente presión antrópica sobre el territorio (Chuvieco *et al*., 2023). En este contexto, España y Portugal se sitúan entre los países europeos más afectados, tanto por el número de incendios como por la superficie quemada (Meira Castro *et al*., 2020).

El oeste de la Península Ibérica concentra una parte sustancial de esta problemática debido a la elevada continuidad de las masas forestales, la acumulación de combustible vegetal y la profunda transformación del paisaje asociada al abandono de usos agroforestales tradicionales (Meira Castro *et al*., 2020). Estas condiciones, combinadas con veranos cálidos y secos y episodios recurrentes de sequía están incrementando la peligrosidad de los incendios forestales (de Rigo *et al*., 2017; Chuvieco *et al*., 2023). La interacción entre factores meteorológicos de corto plazo y características estructurales del territorio genera escenarios de elevada

susceptibilidad a la ignición y propagación de incendios de gran extensión y severidad (Atalay *et al*., 2024).

En los últimos años, el avance de la teledetección ha permitido incorporar información detallada sobre el estado fisiológico de la vegetación, la humedad del combustible y las condiciones superficiales del suelo (Arcos *et al*., 2024). Paralelamente, la creciente disponibilidad de datos ambientales multifuente ha impulsado la aplicación de técnicas de aprendizaje automático capaces de modelizar relaciones no lineales complejas entre variables (Michael *et al*., 2021). Entre ellas, XGBoost se ha consolidado como una herramienta robusta y eficiente en problemas de clasificación ambiental de alta dimensionalidad.

El objetivo principal del trabajo es evaluar la capacidad del algoritmo XGBoost para estimar el peligro de incendio en el oeste de la Península Ibérica integrando variables meteorológicas de *ERA5*, índices espectrales de *Sentinel-2* y factores territoriales. Por tanto, se analiza específicamente cómo el diseño del muestreo afecta el rendimiento, estabilidad y robustez del modelo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio comprende la zona limítrofe del noreste de Portugal con España (Figura 1), con una extensión total de 37 537,4 km^2. zona ha presentado alta recurrencia de incendios en las últimas décadas. Por ello, se seleccionaron y modelizaron tres incendios ocurridos entre el 7 y el 15 de julio de 2022, todos de origen natural (causados por rayos).

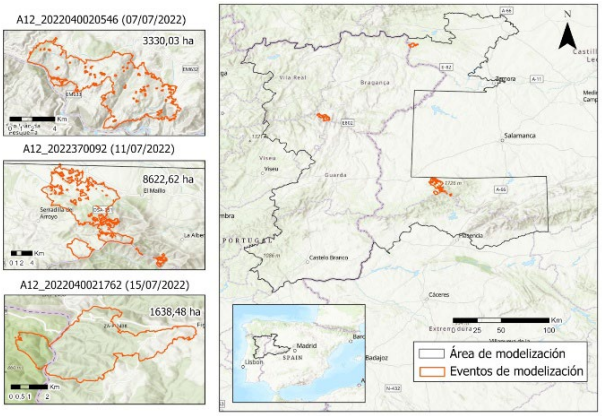


Figura 1. Área de trabajo.

2.2. Fuentes de datos

El análisis integró datos meteorológicos, variables biofísicas derivadas de teledetección y variables estáticas del territorio, con el objetivo de caracterizar los factores ambientales asociados al peligro de incendios forestales. La información meteorológica procedió del reanálisis *ERA5 land*, mientras que las variables espectrales y biofísicas se obtuvieron a partir de imágenes de *Copernicus Sentinel-2*. Las variables estáticas se recopilaron de fuentes europeas armonizadas, principalmente el *Copernicus Land Monitoring Service* (CLMS), complementadas con información de usos del suelo de la Agencia Espacial Europea (ESA) y variables topográficas derivadas de la misión *Shuttle Radar Topography Mission* (STRM) de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Este enfoque garantiza coherencia y comparabilidad en el territorio de estudio.

Para caracterizar las condiciones ambientales asociadas al peligro de incendios forestales se empleó un amplio conjunto de variables meteorológicas que incluyen parámetros atmosféricos y de superficie, radiativos y energéticos, y variables hidrológicas, así como indicadores relacionados con nieve y el suelo, incluyendo contenido de agua y temperatura. Esto permitió describir tanto las condiciones instantáneas como la acumulación de sequedad y la disponibilidad hídrica, fundamentales para la ignición y propagación de incendios (Vitolo *et al*., 2020).

La información de teledetección se utilizó para derivar diferentes índices espectrales orientados a caracterizar el estado fisiológico, estructural y hídrico de la vegetación y del combustible (Arcos *et al*., 2024). Entre ellos se incluyeron índices de vigor y actividad fotosintética, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada); GNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde); SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo); MSAVI2 (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado 2) y S2REP (Posición del Borde Rojo de Sentinel-2), así como indicadores de humedad del combustible (NDMI (Índice de Humedad de Diferencia Normalizada); NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada); MSI (Índice de Estrés Hídrico). Además, se incorporaron variables estructurales biofísicas como LAI (Índice de Área Foliar); fcover (Fracción de Cobertura Vegetal); FAPAR (Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida); CI (Índice de Clorofila) y BI (Índice de brillo).

Además, se incorporaron variables estáticas del territorio, como topografía (elevación, pendiente y orientación), la cubierta vegetal (fracciones de arbolado, matorral y pastizal), el tipo de suelo, los usos del suelo y la influencia antrópica, representada mediante variables de distancia a infraestructuras y núcleos habitados, con el fin de capturar factores territoriales que condicionan la ocurrencia y propagación de incendios forestales.

2.3. Preprocesado de datos y diseño muestral

El preprocesado incluyó una estrategia de muestreo espacial con tres conjuntos de puntos, con el objetivo de representar de forma equilibrada áreas incendiadas y no incendiadas.

Se definieron puntos negativos generales distribuidos homogéneamente cada 1 km con el objetivo de caracterizar las condiciones ambientales de fondo del área de estudio. Asimismo, se establecieron puntos positivos sobre las superficies incendiadas (135,64 km²), con una separación regular de 100 m entre ellos, con el fin de capturar la variabilidad espacial directamente asociada a la ocurrencia del incendio. Finalmente, se incluyeron puntos negativos próximos, situados en el entorno inmediato de las áreas afectadas y también espaciados cada 100 m, para representar zonas no

quemadas bajo condiciones ambientales similares a las de las superficies incendiadas.

A cada punto de muestreo se asignaron variables meteorológicas de *ERA5*, índices de *Sentinel-2* y factores territoriales, calculando medias de 7 (med7), 14 (med14) y 30 (med30) días para las variables dinámicas, las cuales fueron armonizadas espacial y temporalmente para garantizar consistencia y comparabilidad en los datos.

Se evaluaron tres configuraciones (Figura 2) según la proporción de negativos respecto a positivos (50% (V1), 75% (V2) y 100% (V3)). Aunque los incendios representan una fracción reducida del territorio, el uso de conjuntos parcialmente equilibrados permite reducir sesgos hacia la clase mayoritaria y analizar comparativamente su efecto en el rendimiento e interpretación del modelo.

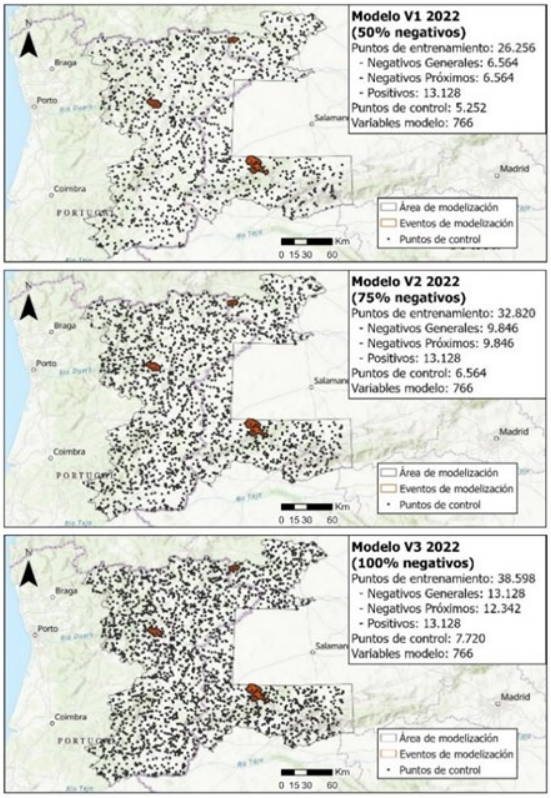


Figura 2. Distribución de puntos por selección de negativos.

Se depuró y seleccionó el conjunto de predictores para mejorar la generalización, equilibrando información y complejidad, revisando puntos negativos y ajustando variables para reducir ruido, redundancias y colinealidad.

2.4. Modelización

La modelización del peligro de incendio se realizó mediante XGBoost (*Extreme Gradient Boosting*), una técnica basada en árboles de decisión ampliamente utilizada en estudios ambientales por su solidez y capacidad predictiva (Michael *et al*., 2021). Se construyeron modelos para cada configuración muestral, corrigiendo errores secuencialmente y optimizando el ajuste. Para reducir la autocorrelación espacial, la partición entrenamiento-validación aseguró independencia geográfica entre conjuntos. Se evaluaron métricas como AUC (*Area Under the Curve*), exactitud global y tasas de falsos positivos y negativos, y la importancia de variables se analizó mediante valores SHAP (*Shapley Additive Explanations*).

3. RESULTADOS

Los resultados (Figura 3) muestran un rendimiento elevado y consistente en las tres configuraciones, con valores de AUC de 0,960 (V1), 0,965 (V2) y 0,967 (V3), y una exactitud global de 88,5%, 89,8% y del 90,2% para los verdaderos negativos (VN) y verdaderos positivos (VP).

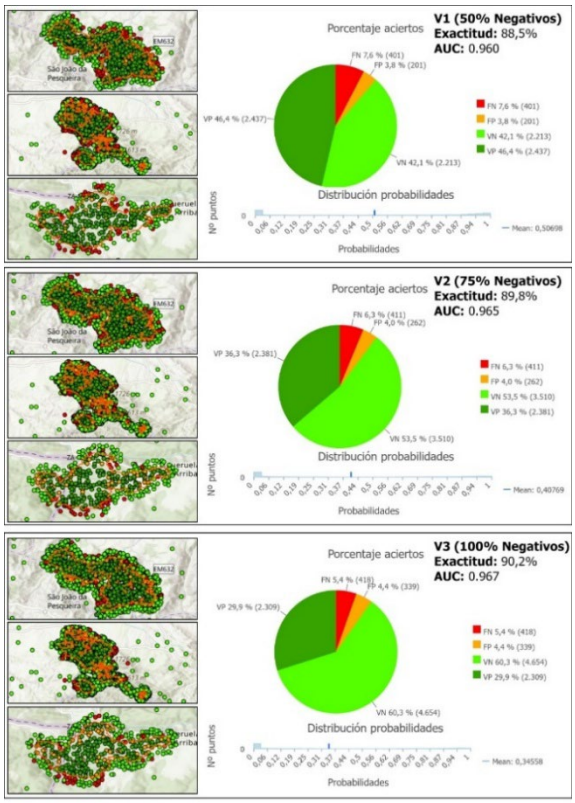


Figura 3. Resultados de modelización por versiones.

Por tanto, los resultados comparativos evidencian que estas decisiones metodológicas influyen de forma apreciable en los valores de AUC y en la precisión predictiva alcanzada por los distintos modelos evaluados.

A nivel de distribución de exactitud de los puntos, los mayores errores se concentran en zonas de transición entre áreas incendiadas y superficies negativas próximas, debido a su similitud. No obstante, el aumento de puntos negativos mejora progresivamente la capacidad discriminativa del modelo, evidenciando que un muestreo más amplio y equilibrado refuerza los resultados sin comprometer su estabilidad general. Esta mejora se refleja especialmente en la reducción de los falsos negativos (FN), que pasan del 7,6% al 5,4% a medida que se incrementa el número de puntos negativos, destacando la importancia de incluir

suficientes observaciones negativas para minimizar los errores de omisión. En cuanto a los falsos positivos (FP) se encuentran en torno al 4% de los puntos modelizados, alcanzando su valor máximo en la V3 (4,4%), probablemente debido al mayor peso de los puntos negativos en esta versión. Así, una mayor proporción de puntos negativos mejora el rendimiento global y optimiza la modelización en zonas limítrofes de incendios.

El análisis de importancia de variables (Figura 4), apoyado en los gráficos SHAP del modelo XGBoost, permitió identificar las variables con mayor contribución en las tres versiones.

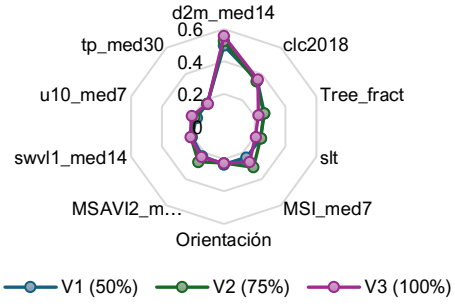


Figura 4. Importancia de variables por versión.

La variable *d2m_med14* (humedad media a 2 m) es el predictor más influyente en todas las versiones, incrementando su importancia. Le siguen *clc2018* (usos del suelo) y *Tree_fract*,(porcentaje de cobertura arbórea) con aportaciones altas y estables, lo que resalta la importancia conjunta de las características territoriales y la estructura de la vegetación. También destacan *MSI_med7* y *MSAVI2_med14*, especialmente en la V2, junto con la orientación y *swvl1_med14* (Capa volumétrica de agua del suelo 1), confirmando el carácter multifactorial del peligro de incendio.

4. CONCLUSIONES

El diseño muestral ejerce un impacto significativo en la evaluación de la exactitud de los modelos XGBoost para la estimación del peligro de incendio. El ajuste de la proporción de puntos negativos mejora la capacidad discriminativa, incrementando métricas clave como el AUC y la exactitud global, y reduciendo los falsos negativos. Esto evidencia que un muestreo equilibrado durante la fase de entrenamiento optimiza la robustez predictiva y la discriminación entre áreas incendiadas y no incendiadas.

El análisis de importancia de variables indica que el riesgo de incendio depende de la interacción entre factores meteorológicos (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) y características estructurales de la vegetación, como densidad, tipo y cobertura, cuya influencia se mantiene estable en distintas configuraciones.

Los resultados confirman que la combinación de variables meteorológicas, biofísicas y territoriales capta eficazmente los factores que condicionan la susceptibilidad a la ignición en el oeste de la Península Ibérica, manteniendo una influencia estable en las distintas configuraciones analizadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Cofinanciado por la Unión Europea a través del Programa Interreg VI-A España-Portugal (POCTEP) 2021-2027.

"Redes de alertas tempranas, para la teledetección de riesgos derivados del cambio climático, por satélites de observación de la tierra para respuesta de protección civil (RAT_EOS_PC)".

6. REFERENCIAS

Arcos, M. A., Balaguer-Beser, Á., & Ruiz, L. Á. (2024). Evaluating the performance of spectral indices and meteorological variables as indicators of live fuel moisture content in Mediterranean shrublands. *Ecological Indicators*, *169*(March). https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112894

Atalay, H., Dervisoglu, A., & Sunar, A. F. (2024). Exploring Forest Fire Dynamics: Fire Danger Mapping in Antalya Region, Türkiye. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *13*(3). https://doi.org/10.3390/ijgi13030074

Chuvieco, E., Yebra, M., Martino, S., Thonicke, K., Gómez-Giménez, M., San-Miguel, J., Oom, D., Velea, R., Mouillot, F., Molina, J. R., Miranda, A. I., Lopes, D., Salis, M., Bugaric, M., Sofiev, M., Kadantsev, E., Gitas, I. Z., Stavrakoudis, D., Eftychidis, G., … Viegas, D. (2023). Towards an Integrated Approach to Wildfire Risk Assessment: When, Where, What and How May the Landscapes Burn. *Fire*, *6*(5), 1-60. https://doi.org/10.3390/fire6050215

de Rigo, D., Libertà, G., Houston Durrant, T., Artés Vivancos, T., & San-Miguel-Ayanz, J. (2017). Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty. En *Publication* Office *of the European Union*. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC108974

Meira Castro, A. C., Nunes, A., Sousa, A., & Lourenço, L. (2020). Mapping the causes of forest fires in Portugal by clustering analysis. *Geosciences (Switzerland)*, *10*(2), 7-11. https://doi.org/10.3390/geosciences10020053

Michael, Y., Helman, D., Glickman, O., Gabay, D., Brenner, S., & Lensky, I. M. (2021). Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series. *Science of the Total Environment*, *764*, 142844. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142844

Vitolo, C., Di Giuseppe, F., Barnard, C., Coughlan, R., San-Miguel-Ayanz, J., Libertá, G., & Krzeminski, B. (2020). ERA5-based global meteorological wildfire danger maps. *Scientific Data*, *7*(1), 1-11. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0554-z

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.280

Estudio de la umbralización de imágenes SAR en un episodio de inundación en el Río Gévora

Durán-Barroso, Pablo [1] **Fragoso-Campón, Laura** [1] **Quirós, Elia** [1]

[1] Universidad de Extremadura, España

ORCID: Durán-Barroso 0000-0003-1590-6924 Fragoso-Campón 0000-0003-0397-6247 Quirós 0000-0002-8429-045X

Correspondencia: pduranbarroso@unex.es laurafragoso@unex.es equiros@unex.es

RESUMEN

El aumento de la variabilidad hidroclimática en cuencas mediterráneas exige metodologías capaces de relacionar crecidas fluviales con patrones espaciales de impacto. Este trabajo propone un marco integrado de análisis para la cuenca del río Gévora, combinando observaciones SAR del Sentinel-1, series históricas de caudal y delimitaciones cartográficas oficiales de inundaciones del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO). Se evaluó una crecida significativa (2018), correspondiente a periodo de retorno cercano a los 10 años, mediante procesamiento radiométrico y topográfico de imágenes SAR en polarizaciones VV y VH, aplicando criterios estadísticos de clasificación y validación basados en indicadores estadísticos de evaluación. La polarización VV mostró mayor consistencia clasificatoria en el entorno de estudio. La convergencia entre la delimitación de la inundación mediante imágenes SAR, y zonificación oficial de peligrosidad confirma la capacidad del enfoque para traducir magnitudes hidrológicas en escenarios espaciales de afectación. Este esquema metodológico contribuye a consolidar las imágenes SAR como herramienta estructural de planificación adaptativa frente a extremos hidrológicos crecientes.

Palabras clave: *Teledetección; SAR; Inundaciones fluviales; Sentinel-1; Sistemas de alerta temprana*

Fecha de recepción: 22 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 22 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Estudio de la umbralización de imágenes SAR en un episodio de inundación en el Río Gévora

Durán-Barroso, Pablo [(1)], Fragoso-Campón, Laura [(2)], Quirós, Elia [(3)]

[(1)] Universidad de Extremadura, España.

0000-0003-1590-6924, pduranbarroso@unex.es ; 0000-0003-0397-6247, laurafragoso@unex.es

0000-0002-8429-045X, equiros@unex.es

Resumen: El aumento de la variabilidad hidro climática en cuencas mediterráneas exige metodologías capaces de relacionar crecidas fluviales con patrones espaciales de impacto. Este trabajo propone un marco integrado de análisis para la cuenca del río Gévora, combinando observaciones SAR del Sentinel-1, series históricas de caudal y delimitaciones cartográficas oficiales de inundaciones del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO). Se evaluó una crecida significativa (2018), correspondiente a periodo de retorno cercano a los 10 años, mediante procesamiento radiométrico y topográfico de imágenes SAR en polarizaciones VV y VH, aplicando criterios estadísticos de clasificación y validación basados en indicadores estadísticos de evaluación. La polarización VV mostró mayor consistencia clasificatoria en el entorno de estudio. La convergencia entre la delimitación de la inundación mediante imágenes SAR, y zonificación oficial de peligrosidad confirma la capacidad del enfoque para traducir magnitudes hidrológicas en escenarios espaciales de afectación. Este esquema metodológico contribuye a consolidar las imágenes SAR como herramienta estructural de planificación adaptativa frente a extremos hidrológicos crecientes.

Palabras clave: Teledetección; SAR; Inundaciones fluviales; Sentinel-1; Sistemas de alerta temprana

Spatial Prediction of Flood Impacts Using SAR and Hydrological Data in the Gévora River

***Abstract**: Rising hydroclimatic variability across Mediterranean catchments demands methodological frameworks that can robustly link flood magnitudes to spatially explicit impact patterns. This study advances an integrated assessment scheme for the Gévora River basin by combining Sentinel-1 SAR observations, long-term discharge records, and the official flood delineation products issued by Spain's Ministry for the Ecological Transition and the Demographic Challenge (MITECO). A major flood event (2018), associated with an approximate 10-year return period, was analysed through radiometric calibration and topographic correction of SAR imagery in VV and VH polarisations, followed by statistical classification and validation using standard performance indicators. Within the study context, VV exhibited superior classification robustness. The close agreement between SAR-derived inundation extent and the official hazard zoning substantiates the ability of the proposed framework to translate hydrological forcing into spatial impact scenarios. Overall, the approach strengthens the role of SAR-based flood mapping as a structural component of impact-informed preparedness and adaptive planning under increasingly frequent hydrological extremes.*

***Keywords**: Radar remote sensing; SAR; River flooding; Sentinel-1; Early warning systems*

1. INTRODUCCIÓN

El incremento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación asociados al cambio climático está intensificando la exposición y vulnerabilidad de numerosos territorios frente al riesgo de inundación. La teledetección ha demostrado ser una herramienta clave para la monitorización de inundaciones a escala global y la evaluación de la exposición de la población (Tellman *et al*., 2021). En cuencas mediterráneas de respuesta rápida, caracterizadas por alta variabilidad interanual y episodios convectivos intensos, la gestión del riesgo exige herramientas capaces de proporcionar información fiable en tiempo casi real, incluso bajo condiciones atmosféricas adversas. En este contexto, la teledetección radar de apertura sintética (SAR) se ha consolidado como una tecnología estratégica para la monitorización de inundaciones, debido a su capacidad de adquisición independiente de la nubosidad y de la iluminación solar (Schumann & Moller, 2015).

El presente trabajo se desarrolla sobre la cuenca transfronteriza del río Gévora (Badajoz), centrándose en la caracterización post-evento basado en la integración de imágenes SAR del Sentinel-1 con datos históricos de caudal registrados en las estaciones de aforo del SIRA Guadiana CR2-45 y CR2-55. La disponibilidad de series temporales prolongadas permite analizar la relación entre la magnitud del caudal y la extensión espacial de la lámina de inundación, facilitando la identificación de umbrales hidrológicos significativos y la mejora de la modelización del riesgo de inundación (Bates *et al*., 2018; Domeneghetti *et al*., 2019).

Desde el punto de vista físico, la discriminación entre superficies inundadas y no inundadas se fundamenta en los diferentes mecanismos de retrodispersión de la tecnología radar. Las superficies de agua en calma generan reflexión especular y, por tanto, bajos valores de retrodispersión, mientras que las superficies terrestres rugosas presentan retrodispersión difusa de mayor intensidad (Richards, 2009; Schumann & Moller, 2015). Esta diferencia permite delimitar con elevada exactitud la extensión de la inundación incluso durante el pico del evento (Twele *et al*., 2016; Clement *et al*., 2018). La comparación entre polarizaciones VV y VH constituye un elemento clave del análisis, dado que la sensibilidad a la rugosidad y a la estructura de la vegetación puede influir en la exactitud de la delimitación espacial (Lee & Pottier, 2017).

El objetivo de este trabajo es evaluar la robustez clasificatoria de distintas configuraciones de imágenes SAR de Sentinel-1 en la delimitación de áreas inundadas, analizando la consistencia clasificatoria de polarizaciones, coeficientes radiométricos y geometrías orbitales mediante métricas de validación cuantitativa, a partir de una crecida fluvial significativa en la cuenca del río Gévora.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y eventos analizados

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Gévora, afluente transfronterizo del Guadiana, con una superficie aproximada de 2184 km². La cuenca presenta un gradiente altitudinal acusado, con predominio de usos forestales en cabecera, zonas agrícolas de regadío y núcleos urbanos potencialmente expuestos a avenidas. La dinámica hidrológica se encuentra parcialmente condicionada por la presa de Villar del Rey, cuya gestión influye en la propagación de avenidas (Fig. 1). Los eventos recientes, como la inundación del 13 de diciembre de 2022 asociada a precipitaciones superiores a 80 mm en 24 horas, evidencian la necesidad de mejorar los sistemas de alerta temprana y de planificación preventiva.

Se estudiaron seis eventos de crecida significativos ocurridos entre 2016 y 2024, asociados a precipitaciones intensas y registrados en la estación de aforo CR2-45. Los caudales medios diarios oscilaron entre 52.7 m³/s y 412.7 m³/s, destacando el episodio del 13–14/12/2022 (Qp = 687 m³/s) y el del 10–11/03/2018 (Qp = 456 m³/s).

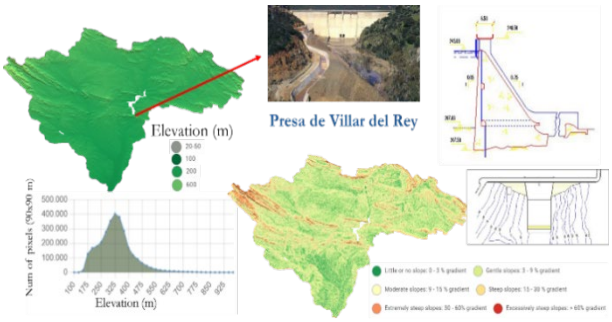


Figura 1. Modelo digital de elevaciones y mapa de pendientes de la cuenca del río Gévora, con localización y esquema de la presa de Villar del Rey

Estos eventos permiten cubrir un rango amplio de magnitudes hidrológicas, incluyendo valores próximos a periodos de retorno intermedios (T10–T25), según los caudales extremos disponibles. El análisis comparativo entre estaciones aguas arriba (CR2-55) y aguas abajo (CR2-45) permitió evaluar la atenuación y propagación de caudales, así como establecer umbrales hidrológicos asociados a desbordamientos efectivos.

Finalmente, se seleccionó el evento del 10/03/2018 como caso de estudio principal, tanto por la magnitud representativa de su caudal pico como por la disponibilidad de imágenes Sentinel-1 coincidentes con el desarrollo del episodio.

2.2. Datos de teledetección y preprocesado SAR

Se emplearon imágenes Sentinel-1, adquiridas en órbitas ascendentes y descendentes durante las fechas próximas al pico de cada evento. El flujo de preprocesado se implementó en ArcGIS Pro de forma secuencial, la calibración radiométrica de las imágenes la aplicación del archivo orbital preciso para mejorar la exactitud geométrica, la eliminación del ruido térmico y del ruido de borde y, posteriormente, se realizó la conversión a γ^0 del coeficiente de retrodispersión mediante el procedimiento de corrección por relieve, con el fin de compensar los efectos de la topografía en la señal radar. A continuación, se aplicó un filtro de reducción de moteado (filtro de Speckle) para minimizar el ruido granular característico de las imágenes de radar de apertura sintética. Finalmente, se llevó a cabo la corrección geométrica empleando el modelo digital de elevaciones SRTM, garantizando la adecuada georreferenciación y coherencia espacial del producto final.

Las imágenes resultantes se expresaron en decibelios (dB) y se analizaron para ambas polarizaciones (VV y VH) a una resolución espacial de 10 m.

2.3. Delimitación de áreas inundadas y validación

La clasificación binaria inundado/no inundado se fundamentó en la diferencia de mecanismos de retrodispersión entre superficies acuáticas (reflexión especular, baja señal) y superficies terrestres rugosas (retrodispersión difusa, alta señal). Tomando como referencia la extensión de la inundación de T10 años de

la cartografía oficial de zonas de inundables del MITECO, se obtuvieron las estadísticas zonales de las imágenes SAR. Se calcularon, para cada imagen, varios umbrales: valor medio, valor medio ± desviación estándar y valor medio ± 2 veces la desviación estándar. Se aplicaron dichos umbrales de retrodispersión para discriminar píxeles inundados y no inundados. La comparación permitió identificar el umbral que presentaba mayor concordancia espacial entre la extensión detectada por SAR y la llanura de inundación oficial, reforzando la fiabilidad del procedimiento.

2.4. Evaluación de la exactitud de la clasificación inundado-no inundado

La evaluación cuantitativa de la clasificación se realizó mediante una matriz de confusión y los indicadores de sensibilidad, que mide la capacidad de detectar correctamente los positivos (área inundada), especificidad, que mide la capacidad de identificar correctamente los negativos (área no inundada) y exactitud global, que mide proporción total de aciertos del modelo. Este análisis resulta particularmente relevante desde la perspectiva preventiva, ya que permite estimar, a partir de previsiones hidrológicas, la probable extensión espacial del impacto.

3. RESULTADOS

3.1. Relación entre caudal y extensión espacial de la inundación

El análisis conjunto de los registros hidrométricos y de las imágenes Sentinel-1 permitió establecer una relación directa entre la magnitud del caudal y la superficie inundada detectada. El evento del 10/03/2018 (Qp ≈ 450 m³/s) evidenció una extensión de inundación coherente con un periodo de retorno aproximado de 10 años, en concordancia con los valores extremos disponibles para la estación aguas arriba. Este comportamiento es consistente con estudios que demuestran relaciones no lineales entre el caudal pico y la extensión de la llanura de inundación, particularmente en cuencas de respuesta rápida (Bates *et al*., 2018).

3.2. Resultados de la validación para las polarizaciones VV y VH

De los umbrales estudiados, el correspondiente al valor medio fue el que presentó el mejor equilibrio entre sensibilidad y especificidad. La Figura 2 sintetiza los valores obtenidos para la evaluación de la exactitud de la clasificación inundado/no inundado para el evento del 10/03/2018 aplicando un umbral basado en el valor medio, comparando órbitas (ascendente y descendente), coeficientes radiométricos (σ^0 y γ^0) y polarizaciones (VV y VH). En conjunto, la exactitud global (GA) se mantiene estable y elevada (≈0.80–0.84), evidenciando un comportamiento robusto del procedimiento y sin diferencias sustanciales entre σ^0 y γ^0, lo que sugiere un efecto topográfico limitado en el tramo analizado. La sensibilidad (SEN) presenta valores moderados (≈0.43–0.46), indicando una tendencia conservadora a infraestimar parcialmente la extensión inundada, probablemente asociada a píxeles de transición húmedo–seco y a zonas con vegetación parcialmente anegada que incrementan la retrodispersión. Por el contrario, la especificidad (SPE) es consistentemente alta (≈0.88–0.93), lo que refleja una excelente capacidad para discriminar áreas no inundadas y minimizar falsos positivos, aspecto clave para aplicaciones operativas de prevención. Finalmente, la polarización VV muestra, de forma sistemática, mayor estabilidad y mejores métricas globales que VH, especialmente en órbita ascendente, confirmando su idoneidad para la delimitación de lámina libre de agua en el entorno de estudio.

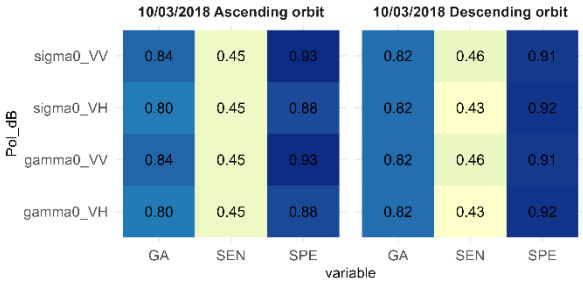


Figura 2. Exactitud global (GA), sensibilidad (SEN)y especificidad (SPE) de la clasificación inundado/no inundado (umbral medio) para σ^0/γ^0 en VV y VH, en órbitas descendente y ascendente (10/03/2018).

El análisis comparativo de polarizaciones evidenció diferencias relevantes en términos de sensibilidad (SEN), especificidad (SPE) y exactitud global (GA). La polarización VV presentó valores de exactitud global superiores a 0.80 en los eventos analizados, con elevados niveles de especificidad, lo que indica una adecuada discriminación entre superficies inundadas y no inundadas. La Figura 3 muestra el coeficiente de retrodispersión γ^0 en polarización VV (órb. ascendente), la delimitación obtenida mediante el establecimiento del umbral y la distribución espacial de la matriz de confusión derivada de la comparación con la cartografía oficial de riesgo de inundación. Clement *et al*. (2018) también señalan que la retrodispersión en polarización VV ofrece mayor estabilidad en la detección de superficies abiertas de agua, especialmente en entornos agrícolas y de baja rugosidad superficial.

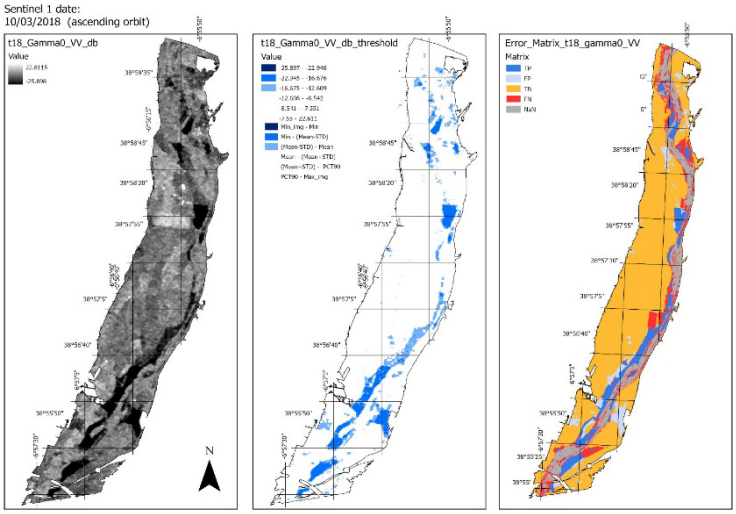


Figura 3. γ^0-VV, clasificación de inundación y matriz espacial de errores para el evento del 10/03/2018 (órbita ascendente).

La elección del umbral basado en el valor medio de retrodispersión proporcionó el mejor equilibrio entre sensibilidad y especificidad, en línea con metodologías automatizadas de cartografía rápida de inundaciones desarrolladas a partir de Sentinel-1 (Twele *et al*., 2016).

La comparación espacial entre la delimitación obtenida mediante SAR y la cartografía oficial de zonas de inundables del MITECO mostró una elevada coherencia geométrica para el evento de referencia (Q asociado a T10). Este resultado respalda la utilidad de la teledetección como herramienta de validación y calibración la extensión de zonas inundables obtenidas a partir de modelos hidráulicos, aspecto ampliamente discutido en la literatura reciente (Domeneghetti *et al*., 2019). La superposición con cartografía oficial de zonas inundables confirmó que la extensión observada en eventos recientes se corresponde con áreas previamente identificadas como de riesgo alto o medio. Esta concordancia ha sido previamente identificada en estudios que demuestran que la integración de observaciones satelitales en tiempo casi real mejora la actualización de mapas de peligrosidad y reduce la incertidumbre en escenarios de cambio climático (Bates *et al*., 2018; Tellman *et al*., 2021).

4. CONCLUSIONES

La evaluación de distintas configuraciones de imágenes SAR Sentinel-1 aplicada a una crecida fluvial significativa en la cuenca del río Gévora ha permitido comprobar la elevada robustez clasificatoria del enfoque para la delimitación de áreas inundadas. El análisis comparativo evidenció una consistencia clasificatoria elevada entre coeficientes radiométricos y geometrías orbitales, así como diferencias relevantes asociadas a la polarización empleada. En este sentido, la polarización VV mostró un comportamiento más equilibrado en términos de sensibilidad, especificidad y exactitud global, consolidándose como la configuración más adecuada para aplicaciones operativas de cartografía de inundaciones en el área de estudio.

Más allá de validar delimitaciones espaciales, el procedimiento desarrollado permite anticipar escenarios potenciales de afección, optimizar la planificación preventiva y mejorar la toma de decisiones en contextos de incertidumbre hidrológica creciente.

5. REFERENCIAS

Bates, P. D., Quinn, N., Sampson, C. C., Smith, A. M., Wing, O. E. J., Sosa, J., Savage, J., Olcese, G., Neal, J. C., & Krajewski, W. F. (2018). Combined modeling of US fluvial, pluvial, and coastal flood hazard under current and future climates. *Water Resources Research, 54*(12), 10215–10236. https://doi.org/10.1029/2018WR023675

Clement, M. A., Kilsby, C. G., & Moore, P. (2018). Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *Journal of Flood Risk Management, 11*(S1), S152–S168. https://doi.org/10.1111/jfr3.12303

Domeneghetti, A., Schumann, G. J. P., & Bates, P. D. (2019). Assimilation of remote sensing data into flood inundation models: A review. *Remote Sensing, 11*(9), 1047. https://doi.org/10.3390/rs11091047

Lee, J. S., & Pottier, E. (2017). Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC press.

Richards, J. A. (2009). *Remote sensing with imaging radar* (Vol. 1, pp. 172-173). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.

Schumann, G. J. P., & Moller, D. K. (2015). Microwave remote sensing of flood inundation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 83–84*, 84–95. https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.002

Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., Erickson, T. A., & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature, 596*, 80–86. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w

Twele, A., Cao, W., Plank, S., & Martinis, S. (2016). Sentinel-1-based flood mapping: A fully automated processing chain. *International Journal of Remote Sensing, 37*(13), 2990–3004. https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1192304

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.281

Análisis de la potencia radiativa de grandes incendios forestales en la Comunitat Valenciana

Barberà Bisbal, Maria Jesús [1] **Orozco Bagou, Daniel** [1] **Soriano Sancho, José Luis** [1] **Cervera Montero, Agustín** [1] **Botella Bou, Raúl** [1] **Estefano Olaiz, Miguel** [1] **Verdú López, Concepción** [1] **Romero Vivó, Mario** [2]

[1] Unitat Tècnica d'Anàlisi d'Incendis Forestals, VAERSA (Valenciana d'Estratègies i Recursos per a la Sostenibilitat Ambiental)

[2] Servei de Prevenció d'Incendis Forestals de la Generalitat Valenciana

ORCID: Barberà Bisbal 0000-0002-8259-285X Orozco Bagou 0009-0009-6025-9886 Soriano Sancho 0009-0009-6993-4315 Cervera Montero 0009-0008-5853-0537 Botella Bou 0000-0001-7853-5601 Estefano Olaiz 0009-0001-2553-088X Verdú López 0009-0002-9845-5849 Romero Vivó 0009-0002-2756-4503

Correspondencia: barberab.mar@vaersa.org orozco.dan@vaersa.org jlsoriano@vaersa.org cervera.agu@vaersa.org botella.rau@vaersa.org miguel.estefano@vaersa.org verdu.con@vaersa.org romero_mar@gva.es

RESUMEN

El seguimiento de los incendios forestales a partir de datos de teledetección facilita el análisis de su ubicación e intensidad. El producto de potencia radiativa (FRP) mide la energía radiativa emitida por el fuego en tiempo casi real en Megavatios (MW) y es una variable física directamente relacionada con la tasa de combustión que permite identificar los focos más activos dentro de un incendio. Aunque el producto se puede obtener de diversas plataformas y sensores, en este estudio se ha seleccionado el del sensor Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) a bordo de los satélites NOAA-20, NOAA-21 y S-NPP por su mayor resolución espacial (375m). Se analiza en este estudio la potencia radiada por tres grandes incendios (La Vall d'Ebo, Bejís y Villanueva de Viver) que han tenido lugar en la Comunitat Valenciana en 2022 y 2023. Los datos de FRP en el periodo en el que los incendios han estado activos se superponen con los perímetros y las isocronas de los incendios y se calculan valores estadísticos diarios y totales de cada uno de ellos (máximo, mínimo, promedio, suma, desviación y número de pixeles). De los resultados obtenidos se concluye que los datos de FRP permiten evaluar el seguimiento de los incendios y su intensidad con precisión, obteniendo valores más altos de FRP en los días de más actividad. De los tres incendios estudiados el de mayor potencia radiativa es el de Bejís, seguido de La Vall d'Ebo y finalmente el de Villanueva de Viver.

Palabras clave: *incendios forestales, potencia radiativa, FRP, VIIRS*

Fecha de recepción: 22 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 22 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis de la potencia radiativa de grandes incendios forestales en la Comunitat Valenciana

Barberà Bisbal, Maria Jesús [(1)], Orozco Bagou, Daniel [(1)], Soriano Sancho, José Luis [(1)], Cervera Montero, Agustín [(1)], Botella Bou, Raúl [(1)], Estefano Olaiz, Miguel [(1)], Verdú López, Concepción [(1)], Romero Vivó, Mario [(2)]

[(1)] Unitat Tècnica d'Anàlisi d'Incendis Forestals, VAERSA (Valenciana d'Estratègies i Recursos per a la Sostenibilitat Ambiental).

0000-0002-8259-285X, barberab.mar@vaersa.org ; 0009-0009-6025-9886, orozco.dan@vaersa.org.
0009-0009-6993-4315, jlsoriano@vaersa.org ; 0009-0008-5853-0537, cervera.agu@vaersa.org.
0000-0001-7853-5601, botella.rau@vaersa.org ; 0009-0001-2553-088X, miguel.estefano@vaersa.org.
0009-0002-9845-5849, verdu.con@vaersa.org.

[(2)] Servei de Prevenció d'Incendis Forestals de la Generalitat Valenciana.
0009-0002-2756-4503, romero_mar@gva.es.

Resumen: El seguimiento de los incendios forestales a partir de datos de teledetección facilita el análisis de su ubicación e intensidad. El producto de potencia radiativa (FRP) mide la energía radiativa emitida por el fuego en tiempo casi real en Megavatios (MW) y es una variable física directamente relacionada con la tasa de combustión que permite identificar los focos más activos dentro de un incendio. Aunque el producto se puede obtener de diversas plataformas y sensores, en este estudio se ha seleccionado el del sensor Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) a bordo de los satélites NOAA-20, NOAA-21 y S-NPP por su mayor resolución espacial (375m). Se analiza en este estudio la potencia radiada por tres grandes incendios (La Vall d'Ebo, Bejís y Villanueva de Viver) que han tenido lugar en la Comunitat Valenciana en 2022 y 2023. Los datos de FRP en el periodo en el que los incendios han estado activos se superponen con los perímetros y las isocronas de los incendios y se calculan valores estadísticos diarios y totales de cada uno de ellos (máximo, mínimo, promedio, suma, desviación y número de pixeles). De los resultados obtenidos se concluye que los datos de FRP permiten evaluar el seguimiento de los incendios y su intensidad con precisión, obteniendo valores más altos de FRP en los días de más actividad. De los tres incendios estudiados el de mayor potencia radiativa es el de Bejís, seguido de La Vall d'Ebo y finalmente el de Villanueva de Viver.

Palabras clave: incendios forestales, energía radiativa, FRP, VIIRS

Radiative Power Analysis of Large Wildfires in the Valencian Community

***Abstract**: Satellite-based wildfire monitoring provides a highly valuable tool for data acquisition through the analysis of fire location and intensity. The Fire Radiative Power (FRP) product measures the radiative energy emitted by a fire in near real time, expressed in Megawatts (MW), and constitutes a physical variable directly related to the combustion rate, enabling the identification of the most active hotspots within a wildfire. Although FRP products can be derived from various platforms and sensors, this study employs data from the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) sensor aboard the NOAA-20, NOAA-21, and S-NPP satellites due to its higher spatial resolution (375 m). This study analyzes the radiative power emitted by three large forest fires (La Vall d'Ebo, Bejís, and Villanueva de Viver) that occurred in the Valencian Community in 2022 and 2023. FRP data collected during the active periods of the fires are overlaid with fire perimeters and isochrones, and both daily and cumulative statistical values are calculated for each event (maximum, minimum, average, sum, deviation, and number of pixels). The results indicate that FRP data enable accurate monitoring of wildfire progression and intensity, with higher FRP values recorded on days of greater fire activity. Among the three wildfires analyzed, the Bejís fire exhibited the highest radiative power, followed by La Vall d'Ebo, and finally Villanueva de Viver.*

***Keywords**: forest fires, radiative power, FRP, VIIRS*

1. INTRODUCCIÓN

El producto de potencia radiativa (FRP) mide la energía radiativa emitida por el fuego en tiempo casi real en Megavatios (MW) y es una variable física directamente relacionada con la tasa de combustión (Filizzola, *et al*., 2023). El FRP permite identificar los focos más activos dentro de un incendio, facilitando estimar las zonas que están liberando más energía, valores altos de FRP implican un incendio más intenso (Ichoku, 2008, Potter & Tannhauser, 2023). Lo más habitual es obtener esta potencia radiativa a partir de productos de diferentes sensores a bordo de satélites meteorológicos. Hay que tener presente que la resolución espacial de estos sensores es muy importante ya que, si los incendios son pequeños para ser detectados requerirán sensores con resoluciones espaciales grandes. Podemos obtener el FRP tanto con satélites de órbita polar como geoestacionaria, en la Tabla 1 se describen algunas de las características de los más utilizados. Se observa que el producto de mayor resolución espacial es el que proporciona el sensor VIIRS y es el que se utiliza en este estudio.

Tabla 1. Sensores y plataformas más utilizadas para la obtención del FRP

Sensor / satélite	Órbita	Resolución espacial	Resolución temporal
SEVIRI / MSG	Geo	3 km	15 min
FCI / MTG	Geo	1 km	10 min
MODIS / TERRA, AQUA	Polar	1 km	12h por satélite
VIIRS / SUOMI-NPP, NOAA-20,21	Polar	375 m	12h por satélite

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos utilizados

Los datos que se han utilizado para el análisis provienen de las siguientes fuentes:

- Perímetros, isocronas y base de datos de incendios forestales de la Dirección General de Prevención de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana
- Producto FRP del sensor VIIRS obtenidos en la plataforma Fire Information for Resource Management System (FIRMS) desarrollada por la NASA en colaboración con la Universidad de Maryland

2.2. Metodología

Para realizar el análisis de la potencia radiada por tres grandes incendios que han tenido lugar en la Comunitat Valenciana (CV) en 2022 y 2023 (Tabla 2), se descargan los datos de FRP del VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) de los productos FIRMS (VNP14IMG, VJ114IMG y VJ214IMG) durante el periodo en el que los incendios han estado activos.

Tabla 2. Características de los incendios analizados

Incendio	Fecha inicio	Fecha control	Hectáreas (ha)
La Vall d'Ebo	13/08/22 21:38	21/08/22 13:32	11604,42
Bejís	15/08/22 15:55	27/08/22 20:00	18523,88
Villanueva de Viver	23/03/23 12:37	31/03/23 18:45	3572,94

La elaboración de las isócronas, que determinan la posición aproximada de la línea de fuego, requiere diversas fuentes de datos como son: la localización de los bomberos en la línea de fuego, las descargas de agua de los medios aéreos, los canales infrarrojos del Sentinel-2 o Landsat, los datos de VIIRS, la fotointerpretación de imágenes aéreas y la información proporcionada por el Servicio de Prevención de Incendios Forestales.

Los datos del VIIRS se superponen con los perímetros de los incendios y se calculan valores estadísticos (máximo, mínimo, promedio, suma, desviación y número de pixeles con valor) diarios y totales de cada uno de ellos. Cabe tener en cuenta las limitaciones de los datos de FRP obtenidos a partir de datos de teledetección, además de la resolución espacial y temporal que ya se ha comentado con anterioridad, si en un determinado píxel existe nubosidad, o en el caso de los incendios humo, la información proporcionada por el producto será nula o la señal estará atenuada.

3. RESULTADOS

En el estudio del incendio de La Vall d'Ebo (Tabla 3, Figura 1 superior) podemos observar que los días con mayor potencia radiativa total son los días 14 y 15 de agosto de 2022, con el máximo el día 15 (9530,28 MW). El número de pixeles también es mayor el día 15 lo que coincide con el día de mayor propagación del incendio. Los resultados obtenidos están de acuerdo con el informe post incendio elaborado por Orozco *et al*., 2024, en el que se cataloga el incendio como topográfico con fases convectivas, el origen del cual fue un rayo. En este informe, se detalla que el día 14 a mediodía la superficie afectada es ya de 3500 ha. El día 15 el incendio pasa a una fase convectiva en la que a mediodía quema más de 3000 ha con comportamientos fuera de la capacidad de extinción. El día 16 se redujo el período con comportamiento convectivo con relación al del día anterior, por lo que la superficie quemada durante este día resultó menor. El día siguiente el incendio realizó importantes carreras.

Tabla 3. Valores estadísticos del FRP en MW durante el incendio de La Vall d'Ebo

Fecha	Máximo	Mínimo	Promedio	Suma	Desviación	Pixeles
14/08/22	108,58	0,31	15,76	8098,66	18,55	514
15/08/22	117,63	0,67	17,65	9530,28	21,61	540
16/08/22	210,25	0,60	15,42	4102,15	24,66	266
17/08/22	410,17	0,15	28,51	2794,44	65,83	98
Total	410,17	0,15	17,30	24525,5	26,89	1418

Tabla 4. Valores estadísticos del FRP en MW durante el incendio de Bejís

Fecha	Máximo	Mínimo	Promedio	Suma	Desviación	Pixeles
16/08/22	923,57	1,13	46,85	11479,13	84,61	245
17/08/22	500,03	0,62	35,90	31412,74	67,59	875
18/08/22	272,48	0,33	21,12	7773,65	35,66	368
19/08/22	189,31	0,27	14,43	3232,45	30,22	224
20/08/22	5,78	5,78	5,78	5,78		1
Total	923,57	0,27	31,47	53903,75	62,04	1713

Tabla 5. Valores estadísticos del FRP en MW durante el incendio de Villanueva de Viver

Fecha	Máximo	Mínimo	Promedio	Suma	Desviación	Pixeles
23/03/23	172,63	2,30	76,58	2986,61	54,68	39
24/03/23	79,20	0,79	13,76	811,79	22,61	59
25/03/23	48,47	0,64	8,47	1515,9	8,65	179
26/03/23	45,68	3,22	19,19	402,93	11,32	21
27/03/23	218,15	0,98	56,03	7171,21	63,11	128
28/03/23	13,72	1,36	4,81	173,17	3,50	36
29/03/23	0,48	0,48	0,48	0,48		1
Total	218,15	0,48	28,21	13062,09	45,58	463

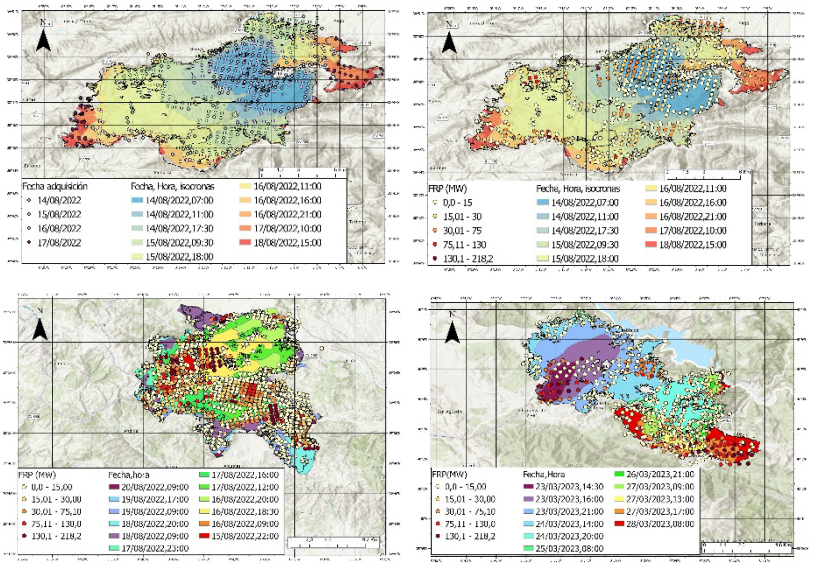


Figura 1. Isocronas y potencia radiativa del incendio de La Vall d'Ebo en MW (superior izquierda), evolución diaria del FRP del incendio de La Vall d'Ebo (superior derecha), isocronas y potencia radiativa del incendio de Bejís en MW (inferior izquierda) e isocronas y potencia radiativa del incendio de Villanueva de Viver en MW (inferior derecha)

topográficas que facilitaron la transición a columnas convectivas puntuales y el 18 todavía quedaban focos activos pero la variación de superficie afectada ya fue poco significativa. En la Figura 1 se muestra la evolución del incendio con el FRP en MW (superior izquierda) donde se pueden identificar los focos más intensos. En la parte superior derecha de la Figura 1 está representada la evolución diaria de los focos activos del incendio que, salvando los desfases temporales, se aprecia que se ajustan a las isocronas del incendio.

De los resultados del incendio de Bejís (Tabla 4) se puede extraer que el día con mayor potencia radiativa fue el día 17 de agosto (31412,74 MW), seguido del 16 y el 18. El día 19 disminuye la potencia total radiada (3232,45 MW) y el día 20 el incendio ya presenta baja actividad. Este incendio fue causado por un rayo y su informe posincendio se encuentra en elaboración. El mapa de este incendio se muestra en la Figura 1 (inferior izquierda) con los valores del FRP en MW junto con las isocronas y el perímetro definitivo del incendio que informa de los focos más activos y la evolución de estos.

En la Tabla 5 se muestran los datos obtenidos para el incendio de Villanueva de Viver donde se puede observar que el día de mayor actividad fue el 27 de marzo seguido del 23 y el 24. Este fue un incendio dominado por viento cuyo informe posincendio se encuentra también en elaboración. En la Figura 1 (inferior derecha) se representa el mapa de la evolución de este incendio junto con el FRP al igual que en los casos anteriores.

Del conjunto de los 3 incendios el de Bejís es el que mayor potencia total ha radiado con 53903,75 MW, seguido del de La Vall d'Ebo 24525,53 MW y finalmente el de Villanueva de Viver con 13062,09 MW. Si tenemos en cuenta la superficie afectada se observa que también sigue ese orden, así como los valores máximos detectados en cada incendio. La desviación estándar nos da idea de la dispersión de la potencia radiativa en el área afectada. También cabe tener en cuenta las condiciones meteorológicas en las que evolucionan los incendios y la época del año en la que suceden pues los incendios de 2022 corresponden al mes de agosto y el de 2023 a marzo.

Como se observa en este análisis la variabilidad que encontramos en los valores de FRP es elevada ya que éstos dependen de diversos factores (tipo de vegetación, disponibilidad del combustible, meteorología, topografía, nubosidad, etc.). Con la intención de cuantificar los valores de FRP en la CV, la Unidad Técnica de Análisis de Incendios Forestales ha analizado el FRP en 2 quemas prescritas (Rx) en la provincia de Alicante, donde se controla el comportamiento del fuego (Tabla 6).

Tabla 6. Valores típicos de FRP en Rx y durante el volcán de la Palma

Localización	FRP (MW)	Combustible
Rx Castell de Castells	[1,58-2,58]	mediterráneo
Rx Parque el Hondo (Elche)	31,76	carrizo y caña
Volcán de la Palma	1589,99	-

4. CONCLUSIONES

El análisis del producto FRP, como el que se realiza en este trabajo, permite mejorar el conocimiento de los diferentes incendios. Esta información es fundamental para los operativos responsables de la extinción de los incendios forestales para identificar el comportamiento del fuego a los que pueden enfrentarse con las herramientas y estrategias actuales.

5. REFERENCIAS

Filizzola, C., Falconieri, A., Lacava, T., Marchese, F., Masiello, G. & Tramutoli, V. (2023). Fire Characterization by Using an Original RST-Based Approach for Fire Radiative Power (FRP) Computation. *Fire, 6*(2), 48. https://doi.org/10.3390/fire6020048

Ichoku, C., Giglio, L., Wooster, M. J., & Remer, L. A. (2008). Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. *Remote Sensing of Environment, 112*(6), 2950–2962. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.009

Orozco Bagou, D., Botella Martínez, M. A., Soriano Sancho, J. L. & Cervera Montero, A. (2024). Informe post incendio La Vall d'Ebo 13/08/2022. Dirección General de Prevención de Incendios Forestales GVA. https://prevencionincendiosgva.es/Documents/Uploads/InformesPostIncendio/034_2022_Informe_post_UT902_Vall_d'Ebo_20220813_DEF_20240208131052.pdf

Potter, B. E., & Tannhauser, K. (2023). The relationship between wind speed and satellite measurements of fire radiative power. *International Journal of Wildland Fire, 32*(5), 767–776. https://doi.org/10.1071/WF22177

Generalitat Valenciana. (s.f.). Estadística de incendios forestales. Conselleria de Medio Ambiente, Infraestructuras y Territorio. Recuperado el 10 de febrero de 2026, de https://mediambient.gva.es/es/web/prevencion-de-incendios/estadistica-de-incendios-forestales

National Aeronautics and Space Administration. (s.f.). Fire Information for Resource Management System (FIRMS). Earth Data. Recuperado el 10 de febrero de 2026, de https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.288

Integración de cartografía geológica de campo y seguimiento con drones para el asesoramiento en emergencias: deslizamientos activos en Alcalá del Valle (Cádiz)

Navarro Almendros, Gabriel [1] **Martín Banda, Raquel** [2] **Fernández Merodo, Jose Antonio** [2] **Serrano Reina, Jose Antonio** [2] **Sarro Trigueros, Roberto** [2] **Fernández Naranjo, Francisco Javier** [2] **Garcia Davalillo, Juan Carlos** [2] **Galindo Jiménez, Inés** [2]

[1] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAC-CSIC), España

[2] Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, España

ORCID: Navarro Almendros 0000-0002-8919-0060 Martín Banda 0000-0002-2078-9921 Fernández Merodo 0000-0003-0642-5803 Serrano Reina 0009-0000-8369-0796 Sarro Trigueros 0000-0002-2083-1931 Fernández Naranjo 0000-0001-9005-3250 Garcia Davalillo 0000-0002-0516-1626 Galindo Jiménez 0000-0002-2545-5234

Correspondencia: gabriel.navarro@csic.es r.martin@igme.es jose.fernandez@igme.es ja.serrano@igme.es r.sarro@igme.es fj.fernandez@igme.es jc.garcia@igme.es ines.galindo@csic.es

RESUMEN

En febrero de 2026, durante la emergencia por el tren de borrascas que afectó a Andalucía, el Grupo de Asesoramiento en Desastres y Emergencias (GADE-CSIC) fue activado por la Junta de Andalucía para evaluar la estabilidad de la ladera oeste-sur de Alcalá del Valle (Cádiz), donde aparecieron grietas, fracturas y deslizamientos superficiales tras lluvias excepcionales de hasta 160 mm/día. La ladera, de aproximadamente 1 km de longitud y 50 m de desnivel, está formada por margas y areniscas del Mioceno superior y colinda con zonas habitadas, lo que motivó el desalojo preventivo de 25 familias. Para evaluar y hacer un seguimiento, se combinó el reconocimiento geológico de campo con vuelos repetidos de dron equipado con sensores LiDAR y cámara RGB. El trabajo de campo distinguió un sector norte más estable de un sector sur margoso con deslizamientos rotacionales activos de tipo cuchara ligados a la saturación de las margas en zonas de cambio de pendiente. Cuatro campañas de vuelo (8, 12, 15 y 21 de febrero) proporcionaron ortofotos de 2,7 cm/píxel y Modelos Digitales de Elevación que, mediante análisis de diferencias (DoD), permitieron medir deformaciones de 20-50 cm en la fase inicial y confirmar una progresiva estabilización. Esta integración de cartografía geológica y teledetección de proximidad aportó datos objetivos sobre la magnitud y evolución de los procesos, respaldando las decisiones de protección civil.

Palabras clave: *Deslizamientos, dron, fotogrametría, emergencias, monitorización.*

Fecha de recepción: 16 marzo 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Integración de cartografía geológica de campo y seguimiento con drones para el asesoramiento en emergencias: deslizamientos activos en Alcalá del Valle (Cádiz)

Navarro Almendros, Gabriel [(1)], Martín Banda, Raquel [(2)], Fernández Merodo, Jose Antonio [(2)], Serrano Reina, Jose Antonio [(2)], Sarro Trigueros, Roberto [(2)], Fernández Naranjo, Francisco Javier [(2)], Garcia Davalillo, Juan Carlos [(2)], Galindo Jiménez, Inés [(2)]

[(1)] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAC-CSIC), España.
0000-0002-8919-0060, gabriel.navarro@csic.es

[(2)] Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, España.
0000-0002-2078-9921, r.martin@igme.es ; 0000-0003-0642-5803, jose.fernandez@igme.es
0009-0000-8369-0796, ja.serrano@igme.es ; 0000-0002-2083-1931, r.sarro@igme.es
0000-0001-9005-3250, fj.fernandez@igme.es ; 0000-0002-0516-1626, jc.garcia@igme.es
0000-0002-2545-5234, ines.galindo@csic.es

Resumen: En febrero de 2026, durante la emergencia por el tren de borrascas que afectó a Andalucía, el Grupo de Asesoramiento en Desastres y Emergencias (GADE-CSIC) fue activado por la Junta de Andalucía para evaluar la estabilidad de la ladera oeste-sur de Alcalá del Valle (Cádiz), donde aparecieron grietas, fracturas y deslizamientos superficiales tras lluvias excepcionales de hasta 160 mm/día. La ladera, de aproximadamente 1 km de longitud y 50 m de desnivel, está formada por margas y areniscas del Mioceno superior y colinda con zonas habitadas, lo que motivó el desalojo preventivo de 25 familias. Para evaluar y hacer un seguimiento, se combinó el reconocimiento geológico de campo con vuelos repetidos de dron equipado con sensores LiDAR y cámara RGB. El trabajo de campo distinguió un sector norte más estable de un sector sur margoso con deslizamientos rotacionales activos de tipo cuchara ligados a la saturación de las margas en zonas de cambio de pendiente. Cuatro campañas de vuelo (8, 12, 15 y 21 de febrero) proporcionaron ortofotos de 2,7 cm/píxel y Modelos Digitales de Elevación que, mediante análisis de diferencias (DoD), permitieron medir deformaciones de 20-50 cm en la fase inicial y confirmar una progresiva estabilización. Esta integración de cartografía geológica y teledetección de proximidad aportó datos objetivos sobre la magnitud y evolución de los procesos, respaldando las decisiones de protección civil.

Palabras clave: Deslizamientos, dron, fotogrametría, emergencias, monitorización.

Integration of geological field mapping and UAV-based monitoring for emergency advisory: active landslides in Alcalá del Valle (Cádiz, Spain)

***Abstract**: In February 2026, during the extreme weather emergency caused by a succession of storm systems affecting Andalusia, the Disaster and Emergency Advisory Group (GADE-CSIC) was activated by the Regional Government of Andalusia to assess the stability of the west-southwestern hillslope of Alcalá del Valle (Cádiz), where cracks, fractures and shallow landslides developed following exceptional rainfall of up to 160 mm/day. The hillslope, approximately 1 km long with 50 m of relief, is composed of Upper Miocene marls and sandstones and directly borders residential areas, which led to the preventive evacuation of 25 families. To evaluate and monitor the situation, geological field reconnaissance was combined with repeated UAV flights equipped with LiDAR sensors and an RGB camera. Fieldwork distinguished a more stable northern sector from a predominantly marly southern sector, where active rotational slump landslides were concentrated, linked to prolonged saturation of the marls at slope-break zones. Four flight campaigns (8, 12, 15 and 21 February) yielded orthophotos at 2.7 cm/pixel resolution and Digital Elevation Models that, through DEM of Difference (DoD) analysis, allowed deformations of 20–50 cm to be measured during the initial phase and confirmed a progressive stabilisation. This integration of geological mapping and close-range remote sensing provided emergency managers with objective data on the magnitude and evolution of the processes, supporting the civil protection decisions adopted.*

***Keywords**: Landslides, geological mapping, UAV, photogrammetry, emergency management.*

1. INTRODUCCIÓN

El Grupo de Asesoramiento en Desastres y Emergencias del CSIC (GADE) tiene como misión proporcionar asesoramiento científico-técnico a las autoridades de Protección Civil y gestores de emergencias durante desastres naturales en España. Activado mediante un protocolo formal (PADE), el GADE moviliza equipos multidisciplinares de investigadores que se despliegan sobre el terreno para generar información objetiva, cuantificable y oportuna que permita tomar decisiones informadas. Esta aproximación, basada en la integración de la observación de campo con técnicas instrumentales avanzadas, sitúa la gestión de emergencias en un marco científico riguroso que aporta criterios técnicos sólidos para la protección de personas y bienes.

En el marco de la emergencia por el tren de borrascas que afectó a Andalucía en 2026, el GADE fue activado a solicitud de la Junta de Andalucía para evaluar la estabilidad de la ladera oeste-sur de Alcalá del Valle (Cádiz), donde a partir del 4 de febrero se identificaron grietas, fracturas y deslizamientos superficiales tras un período prolongado de precipitaciones que incluyó un episodio excepcional de 160 mm/día. La ladera, de aproximadamente 1 km de longitud y 50 m de desnivel (Figura 1), constituida por margas y areniscas del Mioceno superior de la Cuenca de Ronda, limita directamente con zonas habitadas, incluyendo viviendas, un colegio infantil y un cuartel de la Guardia Civil, lo que motivó el desalojo preventivo de unas 25 familias. Ante procesos activos y cercanía a población vulnerable, resultaba imprescindible no solo diagnosticar el fenómeno, sino cuantificar su evolución temporal para fundamentar las decisiones sobre el mantenimiento o levantamiento de las medidas de protección civil adoptadas.

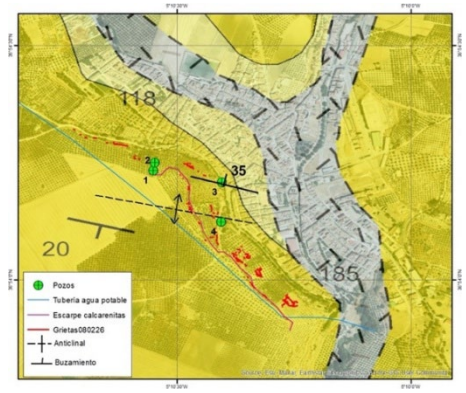


Figura 1. Ortofoto con cartografía geológica (GEODE), grietas identificadas en el vuelo dron LiDAR del 08/02/2026, pozos vaciados por la UME y estructura de la serie miocena. Leyenda de recintos: en gris, depósitos holocenos de fondo de valle; en amarillo, unidades del Mioceno superior de la Cuenca de Ronda (amarillo claro: margas, conglomerados y areniscas calcáreas bioclásticas; amarillo oscuro: areniscas calcáreas bioclásticas, conglomerados, margas y ocasionalmente brechas yesíferas).

En este trabajo se presenta la metodología desplegada por el equipo multidisciplinar de GADE-CSIC, que combina el reconocimiento geológico in situ con la monitorización repetida mediante vuelos LiDAR y fotogramétricos con aeronaves no tripuladas (UAV, drones). El reconocimiento de campo permitió caracterizar la litología, estructura y geomorfología de la ladera, diferenciar sectores con distinto comportamiento geomecánico e interpretar los mecanismos desencadenantes de los deslizamientos. Por su parte, los vuelos sucesivos con dron realizados a lo largo de varias semanas proporcionaron ortofotos de alta resolución (2,7 cm/píxel) y Modelos Digitales de Elevación (DEM) que, mediante análisis de diferencias (DoD), permitieron cuantificar deformaciones de escala centimétrica a decimétrica y evaluar objetivamente la tendencia evolutiva de los procesos que se estaban desarrollando en la ladera (Chen et al., 2025). Esta integración de observación directa y teledetección de proximidad constituye un enfoque que aporta certeza cuantitativa a los gestores de la emergencia, permitiéndoles disponer de datos objetivos sobre la magnitud, localización y evolución temporal de los movimientos para sustentar sus decisiones en evidencias científicas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Reconocimiento geológico de campo

Un equipo de expertos en peligros geológicos del CN. IGME, integrado en el GADE-CSIC, realizó tres jornadas de inspección in situ los días 7, 10 y 11 de febrero de 2026. El reconocimiento se orientó a la caracterización litológica y estructural de la ladera, la identificación y cartografía de los procesos de inestabilidad activos y la evaluación de su posible afectación a las zonas habitadas colindantes.

Durante la primera visita (7 de febrero) se llevó a cabo un reconocimiento general de toda la ladera, diferenciando dos sectores (Figura 2) con comportamiento geomecánico distinto: un sector norte, con alternancia de areniscas y margas, mayor cobertura vegetal y presencia de cuatro pozos artesanos; y un sector sur, esencialmente margoso, ocupado por olivar joven y con múltiples focos de deslizamiento activo. Se cartografiaron grietas de cabecera con progresión lateral circular, abombamientos del terreno y desplazamientos de olivos, así como desprendimientos puntuales en las zonas de mayor pendiente. La medida de la estratificación a lo largo de la ladera puso de manifiesto la existencia de un suave anticlinal entre ambos sectores.

En las visitas posteriores (10 y 11 de febrero) se verificó la evolución de los procesos, constatándose un aumento decimétrico en salto vertical y métrico en extensión lateral de las grietas, especialmente en el sector sur. Se identificaron tres deslizamientos principales de tipo rotacional, con acumulación de sedimentos finos en forma de conos que en algunos puntos alcanzaban ya la calle situada al pie de la ladera. Se evaluó la relación entre las zonas de deslizamiento y los cambios de pendiente de la ladera (bandas del 17-22%), interpretándose que la pérdida de pendiente favorece la

infiltración y saturación de las margas, reduciendo su cohesión aparente y desencadenando los movimientos. Asimismo, se recomendó a la UME el vaciado de los pozos artesanos de la zona norte para reducir la carga hídrica sobre el sector más próximo a las viviendas.

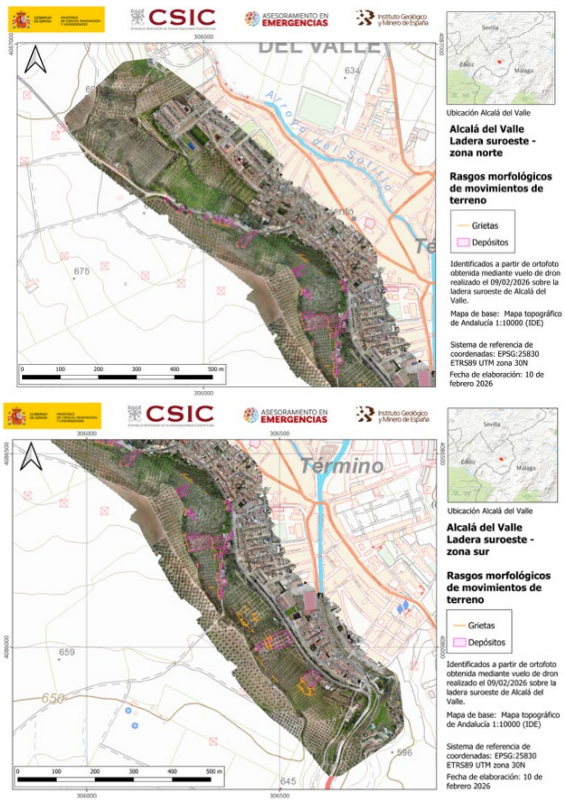


Figura 2. Ortofoto obtenida con el dron, localización de grietas y zonas movilizadas a fecha de 10 de febrero.

2.2. Adquisición y procesamiento de datos con drones

La monitorización remota fue realizada por el equipo de drones del ICMAN del GADE-CSIC en cuatro campañas de campo (8, 12, 15 y 21 de febrero de 2026), aprovechando ventanas de buen tiempo entre los episodios de precipitación. Se empleó un dron DJI Matrice M300 equipado con dos sensores complementarios: el LiDAR DJI Zenmuse L2, para la generación de nubes de puntos 3D de alta densidad, y la cámara DJI Zenmuse H20T en modo RGB (Sestras et al., 2025), para la adquisición de imágenes fotogramétricas. Los vuelos se ejecutaron a 60 m sobre el punto de despegue con posicionamiento centimétrico mediante correcciones GNSS en modo RTK, lo que permitió prescindir de puntos de control en tierra y garantizar la coherencia geométrica entre campañas sucesivas.

Los datos LiDAR se procesaron con DJI Terra para generar nubes de puntos georreferenciadas y, tras la clasificación de retornos del terreno, los DEM de cada campaña. Las imágenes RGB se procesaron mediante *Pix4Dmapper* siguiendo un flujo fotogramétrico estándar, obteniéndose ortofotos georreferenciadas con un tamaño de píxel de 2,7 cm. A partir de los DEM sucesivos se calcularon DoD (Wheaton et al., 2010) mediante resta directa, aplicando un análisis focalizado sobre las áreas previamente cartografiadas como activas, con un buffer de 10 m, para cuantificar las variaciones altimétricas asociadas a los movimientos del terreno y evaluar su tendencia temporal (Chen et al., 2025).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización geológica y procesos de inestabilidad observados

El reconocimiento de campo permitió diferenciar dos sectores con comportamiento claramente distinto. El sector norte, con una secuencia de niveles de areniscas con matriz margosa y margas que culmina en un paquete de calcarenitas de unos 4 m de espesor (estratificación N100E/35N), presenta mayor estabilidad, favorecida por una densa cobertura vegetal derivada del abandono agrícola de las últimas décadas y por la presencia de cuatro pozos artesanos que contribuyen al drenaje natural de los niveles arenosos. En este sector solo se identificaron deformaciones menores como grietas incipientes y abultamiento del suelo, junto con desprendimientos puntuales localizados en las zonas de mayor pendiente, sin gran desplazamiento de material.

Por el contrario, el sector sur, caracterizado por una serie esencialmente margosa con buzamiento de unos 20° hacia el sur y ocupado por parcelas de olivar joven tratadas con herbicidas, concentró toda la actividad relevante. Se identificaron tres deslizamientos principales de tipo rotacional, con grietas de cabecera de progresión lateral circular, desplazamientos verticales decimétricos a métricos, arranque y desplazamiento de olivos, y acumulación de sedimentos finos en forma de conos en la calle al pie de la ladera. Estos deslizamientos se localizan preferentemente en bandas de cambio de pendiente (17-22%), donde la reducción del gradiente frena la escorrentía superficial y favorece la infiltración, produciendo la saturación prolongada de las margas, la pérdida de succión y cohesión aparente, y su consiguiente comportamiento plástico (Figura 2) (Maquaire et al., 2003). La ausencia de vegetación arbustiva en las parcelas de olivar joven, agravada por el uso de herbicidas, reduce adicionalmente la cohesión radicular del suelo, lo que explica que las parcelas con olivos más antiguos y mayor cobertura vegetal permanezcan más estables.

3.2. Seguimiento temporal mediante drones

El análisis multitemporal con dron permitió cuantificar la evolución de los deslizamientos en varios intervalos (Figura 3).

El análisis del DoD en la zona sur (Figura 3 B, C y D) revela una progresión clara de la deformación acumulada. En el intervalo 08-12 de febrero, se concentran los cambios más significativos, con erosión severa (>0.5 m) en la cabecera del deslizamiento y depósitos de +30 a +50 cm en el sector central y pie del talud, coherentes con un mecanismo rotacional en su fase de mayor actividad post-precipitación. El mapa acumulado 08-15 de febrero muestra un incremento moderado de las zonas afectadas, con variaciones centimétricas adicionales atribuibles a la redistribución del material previamente movilizado. Finalmente, el

acumulado 08-21 de febrero apenas difiere del anterior, con diferencias puntuales próximas al umbral de detección (±10 cm), lo que evidencia que el grueso de la deformación se produjo en la primera semana y el proceso prácticamente cesó a partir del 15 de febrero.

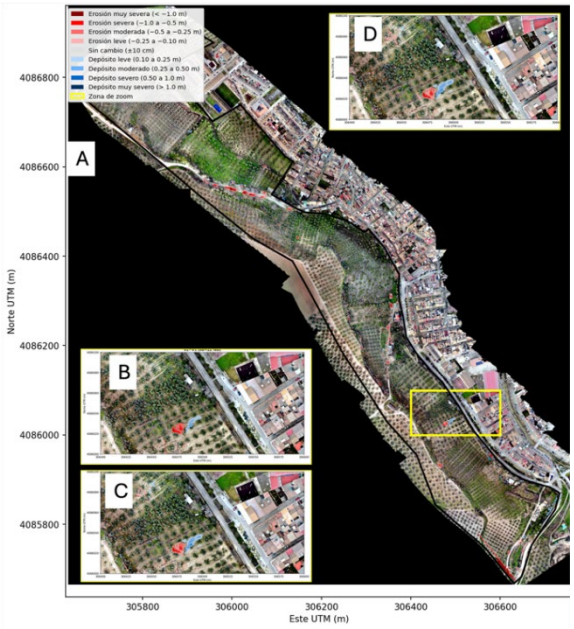


Figura 3. A) Clasificación de cambios de elevación (DoD) entre el 8 y el 15 de febrero de 2026 a partir de DEM LiDAR sobre ortofoto RGB. Las categorías de erosión (tonos rojos) y depósito (tonos azules) se definen con un umbral mínimo de detección de ±10 cm. El recuadro amarillo indica la zona de detalle ampliada para el DoD entre B)8-12, C)8-15 y D)8-21 de febrero.

4. DISCUSIÓN

La tendencia decreciente de las deformaciones a lo largo de las cuatro campañas evidencia una progresiva estabilización de la ladera tras el episodio desencadenante. Esta evolución es coherente con el modelo interpretativo derivado del reconocimiento de campo: los deslizamientos responden a un mecanismo de rotura superficial controlado por la saturación de las margas, de modo que, una vez pasado el pico de precipitación y al reducirse el aporte hídrico, los materiales recuperan gradualmente consistencia y los movimientos se atenúan.

La integración de ambas fuentes de información, como son la observación geológica directa y la monitorización cuantitativa con dron, resultó determinante para el asesoramiento en la emergencia. El reconocimiento de campo proporcionó el marco interpretativo imprescindible para comprender los mecanismos y condicionar las zonas de análisis, mientras que los datos de dron aportaron la dimensión cuantitativa y temporal que el trabajo de campo por sí solo no puede ofrecer. En particular, la capacidad de generar DoD con precisión centimétrica en intervalos de pocos días permitió confirmar objetivamente la desaceleración de los procesos, dato clave para que los gestores de la emergencia pudieran evaluar el levantamiento progresivo de las medidas de desalojo.

Cabe destacar que la resolución de las ortofotos (2,7 cm/píxel) permitió además verificar la ausencia de nuevas grietas en el sector norte entre los vuelos del 12 y el 21 de febrero, proporcionando un criterio adicional de seguridad para las viviendas más próximas a la ladera. La complementariedad entre los sensores LiDAR y RGB se demostró especialmente útil: el LiDAR ofrece modelos de elevación robustos incluso en zonas con vegetación, mientras que las ortofotos RGB facilitan la identificación visual de grietas y la comunicación de resultados a los responsables no técnicos de la emergencia (Sestras et al., 2025).

5. CONCLUSIONES

La actuación del GADE-CSIC en Alcalá del Valle durante la emergencia causada por el tren de borrascas de enero y febrero en Andalucía en 2026 muestra que integrar geología de campo y monitorización con drones permite evaluar en tiempo real la evolución de deslizamientos activos. El trabajo in situ identificó tres deslizamientos de tipo rotacional en el sector sur, donde hubo saturación de margas miocenas en zonas de cambio de pendiente, frente a un sector norte más estable, mientras que los cuatro vuelos realizados entre el 8 y el 21 de febrero cuantificaron deformaciones de 20–50 cm en la fase inicial y confirmaron una estabilización progresiva que respaldó las decisiones de protección civil.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco de las actividades del Grupo de Asesoramiento Desastres y Emergencias del CSIC (GADE-CSIC, España) y proyecto PIE LEONARDO. Los autores agradecen el trabajo realizado por los Técnicos y Dirección de la Emergencia, UME y Ayuntamiento.

REFERENCIAS

Chen, B., et al. (2025). Applications of UAV in Landslide Research: A Review. *Landslides, 22*, 3029-30348. https://doi.org/10.1007/s10346-025-02547-2

Maquaire, O., Malet, J.-P., Remaître, A., Locat, J., Klotz, S. & Guillon, J. (2003). Instability conditions of marly hillslopes: towards landsliding or gullying? The case of the Barcelonnette Basin, South East France. *Engineering Geology, 70*(1–2), 109–130. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00086-3

Sestras, P., Badea, G., Badea, A.C., Salagean, T., Oniga, V.-E., Roșca, S., Bilașco, Ș., Bruma, S., Spalević, V., Kader, S., Billi, P. & Nedevschi, S. (2025). A novel method for landslide deformation monitoring by fusing UAV photogrammetry and LiDAR data based on each sensor's mapping advantage in regards to terrain feature. *Engineering Geology, 346*, 107890. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107890

Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E. & Sear, D.A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms, 35*(3), 136–156. https://doi.org/10.1002/esp.1886

SESIÓN 02

Instrumentación, Procesado de Datos y Sistema de Datos en Geociencias

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.106

Misiones de Observación de la Tierra de la Agencia Espacial Española: Constelación Atlántica Española (ESCA) y ESCA+

Díaz-Delgado, Ricardo [1] **Martín, Nicolás** [1] **Pérez, José María** [1]

[1] Agencia Espacial Española

ORCID: Díaz-Delgado 0000-0002-0460-4616

Correspondencia: ricardo.diaz@aee.gob.es nicolas.martin@aee.gob.es josem.perez@aee.gob.es

RESUMEN

El Componente Español de la Constelación Atlántica (ESCA) es una iniciativa de observación de la Tierra desarrollada en el marco de una cooperación bilateral entre España y Portugal. El sistema consiste en una constelación de ocho satélites idénticos (de un total de 16 que conformarán la red completa) diseñados bajo un enfoque de New Space para operar de forma simultánea en órbita terrestre baja (LEO) heliosíncrona, a una altitud de entre 450 y 600 km. La licitación fue ganada por la empresa OpenCosmos en julio de 2025. El objetivo principal de la misión es proporcionar datos de alta resolución con una frecuencia de revisita de dos veces al día sobre el Área de Interés (AOI), que abarca los territorios de España, Portugal. Con ello, se contribuirá en la planificación y la gestión en diferentes ámbitos de aplicación tales como la gestión de desastres naturales, agricultura, seguimiento marítimo de embarcaciones, medio ambiente y el desarrollo urbano. Entre los requisitos operativos críticos, la ESCA garantiza una latencia inferior a 60 minutos para la entrega de productos Nivel-0 sobre el AOI y de menos de 3 horas para productos Nivel-1C en aplicaciones de monitorización de desastres. Se presenta asimismo la Constelación ESCA+, complementaria a la ESCA y prevista para dar continuidad a partir de 2031 con capacidades duales para usuarios gubernamentales y defensa. La ESCA+ se enmarca en el programa European Resilience from Space (ERS), una propuesta de la ESA a la Comisión Europea en respuesta a la iniciativa Earth Observation Governmental Services (EOGS). La ESCA+ impulsa el desarrollo industrial nacional en áreas tecnológicas críticas como los sistemas de Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento (ISR) e inteligencia de señal (SIGINT/ELINT), radares de apertura sintética (SAR) y cámaras ópticas y térmicas de muy alta resolución. Se emplearán tecnologías de comunicaciones encriptadas y enlaces entre satélites para garantizar la soberanía de los datos.

Palabras clave: *ESCA, ESCA+, servicios duales, latencia, usuarios gubernamentales*

Fecha de recepción: 27 enero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Misiones de Observación de la Tierra de la Agencia Espacial Española: Constelación Atlántica Española (ESCA) y ESCA+

Díaz-Delgado, Ricardo [1], Martín, Nicolás [1], Pérez, José María [1]

[1] Agencia Espacial Española.

0000-0002-0460-4616, ricardo.diaz@aee.gob.es;

nicolas.martin@aee.gob.es ; josem.perez@aee.gob.es.

Resumen: El Componente Español de la Constelación Atlántica (ESCA) es una iniciativa de observación de la Tierra desarrollada en el marco de una cooperación bilateral entre España y Portugal. El sistema consiste en una constelación de ocho satélites idénticos (de un total de 16 que conformarán la red completa) diseñados bajo un enfoque de New Space para operar de forma simultánea en órbita terrestre baja (LEO) heliosíncrona, a una altitud de entre 450 y 600 km. La licitación fue ganada por la empresa OpenCosmos en julio de 2025. El objetivo principal de la misión es proporcionar datos de alta resolución con una frecuencia de revisita de dos veces al día sobre el Área de Interés (AoI), que abarca los territorios de España y Portugal. Con ello, se contribuirá en la planificación y la gestión en diferentes ámbitos de aplicación tales como la gestión de desastres naturales, agricultura, seguimiento marítimo de embarcaciones, medio ambiente y el desarrollo urbano. Entre los requisitos operativos críticos, la ESCA garantiza una latencia inferior a 60 minutos para la entrega de productos Nivel-0 sobre el AoI y de menos de 3 horas para productos Nivel-1C en aplicaciones de monitorización de desastres. Se presenta asimismo la Constelación ESCA+, complementaria a la ESCA y prevista para dar continuidad a partir de 2031 con capacidades duales para usuarios gubernamentales y defensa. La ESCA+ se enmarca en el programa European Resilience from Space (ERS), una propuesta de la ESA a la Comisión Europea en respuesta a la iniciativa Earth Observation Governmental Services (EOGS). La ESCA+ impulsa el desarrollo industrial nacional en áreas tecnológicas críticas como los sistemas de Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento (ISR) e inteligencia de señal (SIGINT/ELINT), radares de apertura sintética (SAR) y cámaras ópticas y térmicas de muy alta resolución. Se emplearán tecnologías de comunicaciones encriptadas y enlaces entre satélites para garantizar la soberanía de los datos.

Palabras clave: ESCA, ESCA+, servicios duales, latencia, usuarios gubernamentales

The Spanish component of the Atlantic Constellation (ESCA) and ESCA+

***Abstract**: The Spanish Component of the Atlantic Constellation (ESCA) is an Earth observation initiative developed within the framework of bilateral cooperation between Spain and Portugal. The system consists of a constellation of eight identical satellites (out of a total of 16 that will make up the complete network) designed under a New Space approach to operate simultaneously in low Earth orbit (LEO) heliosynchronous, at an altitude of between 450 and 600 km. The tender was won by the company OpenCosmos in July 2025. The main objective of the mission is to provide high-resolution data with a twice-daily revisit frequency over the Area of Interest (AoI), which covers the territories of Spain and Portugal. This will contribute to planning and management in different areas of application such as natural disaster management, agriculture, maritime vessel tracking, the environment and urban development. Among the critical operational requirements, ESCA guarantees a latency of less than 60 minutes for the delivery of Level-0 products over the AoI and less than 3 hours for Level-1C products in disaster monitoring applications. The ESCA+ Constellation is also presented, which complements ESCA and is expected to continue from 2031 onwards with dual capabilities for government and defence users. ESCA+ is part of the European Resilience from Space (ERS) programme, a proposal by the ESA to the European Commission in response to the Earth Observation Governmental Services (EOGS) initiative. ESCA+ promotes national industrial development in critical technological areas such as Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (ISR) systems and signal intelligence (SIGINT/ELINT), synthetic aperture radars (SAR) and very high-resolution optical and thermal cameras. Encrypted communications technologies and inter-satellite links will be used to ensure data sovereignty.*

***Keywords**: ESCA, ESCA+, dual services, latency, governmental users*

1. LA NECESIDAD DE SOBERANÍA EN OBSERVACIÓN DE LA TIERRA

La Agencia Espacial Española, creada en 2023, tiene como misión el unificar y coordinar todas las actividades espaciales de España para garantizar la acción estratégica del país en este sector (Real Decreto 158/2023, de 7 de marzo, por el que se aprueba el Estatuto de la Agencia Estatal «Agencia Espacial Española», 2023). La Agencia Espacial Española (AEE) tiene una responsabilidad crítica en la observación de la Tierra (OT), ya que este campo es el que tiene un impacto más directo y cotidiano sobre la economía y la seguridad de los ciudadanos (Harris & Baumann, 2021). Su labor no es solo lanzar satélites, sino gestionar todo el ciclo del dato: desde que se define la necesidad científica hasta que la información llega al usuario final (emergencias, seguridad, cobertura nacional, etc.). Las iniciativas españolas para el lanzamiento de misiones de OT tienen como precedente la misión SEOSAT-Ingenio en el óptico y la misión PAZ en microondas (Marini *et al*., 2019). La misión INGENIO fue un ambicioso proyecto satelital español de OT diseñado para ser el componente óptico del Programa Nacional de OT por Satélite (PNOTS), proporcionando imágenes de alta resolución (2,5 metros en pancromático y 10 metros en multiespectral) para aplicaciones civiles y gubernamentales. Desafortunadamente, el lanzamiento, realizado el 17 de noviembre de 2020, no tuvo éxito. Poco después del despegue, se confirmó una anomalía en la trayectoria del cohete Vega que provocó la pérdida del satélite, impidiendo que llegara a su órbita. A pesar de la pérdida de la misión, la experiencia tecnológica adquirida por la industria aeroespacial española durante su desarrollo ha sido fundamental para los proyectos actuales coordinados desde la AEE.En la actualidad existen más de 77 agencias espaciales nacionales en el mundo. Se estima en más de 1300 los satélites de OT que se encuentran operativos actualmente, de los que entre el 50 y 60% son operados por compañías privadas. La aparición de la New Space, empresas con capacidad de construcción, lanzamiento y operación de misiones orbitales, ha reducido drásticamente los costes de las misiones mediante la reutilización de cohetes (SpaceX), la miniaturización de componentes y plataformas y el uso de tecnología estándar (Denis *et al*., 2017). Es en este contexto, en el que la AEE busca financiar nuevas misiones nacionales de OT para reforzar su soberanía tecnológica, de forma complementaria al Programa Espacial Europeo que incluye el programa Copernicus y en colaboración con las nuevas misiones de la ESA (FutureEO) y Eumetsat.

La AEE promueve con sus misiones de OT abordar retos críticos en la gestión ambiental, la seguridad nacional y la soberanía tecnológica tales como:

- La gestión de Desastres Naturales y Emergencias
- La Vigilancia Marítima y la Seguridad
- La optimización de Sectores críticos como la agricultura y los Bosques
- La soberanía de datos obtenidos desde el espacio
- La complementariedad con el programa Copernicus y las misiones de la ESA y Eumetsat
- El fomento del sector espacial español

En este trabajo se presenta el estado actual de las dos misiones de OT promovidas y financiadas por la AEE, previstas para estar operacionales desde 2027 hasta 2035, al menos.

2. LA COMPONENTE ESPAÑOLA DE LA CONSTELACIÓN ATLÁNTICA (ESCA)

La Constelación Atlántica se estableció formalmente en noviembre de 2022 como una iniciativa de cooperación bilateral entre España y Portugal al más alto nivel político mediante el "Tratado de Amistad y Cooperación" firmado en Trujillo el 28 de octubre de 2021. El acuerdo fortalece la colaboración de ambos países específicamente en el ámbito espacial. El modelo está abierto a la participación de terceros países y orientado a afrontar retos globales como el cambio climático, la gestión de emergencias y la sostenibilidad de los recursos naturales.

2.1. Requisitos de la ESCA, plazos y adjudicación

La propuesta original se compone de una constelación de 16 microsatélites (<250 kg), 8 por país. Su valor añadido radica en la propuesta de un bajo tiempo de revisita (3 h) para el mismo punto sobre el terreno (Fig. 1) y su baja latencia de datos (intervalo de tiempo transcurrido desde la adquisición de los datos por el sensor hasta su entrega como productos de datos brutos en la interfaz del segmento terrestre), que será inferior a 1 h. Los satélites de la ESCA operarán de forma simultánea en órbita terrestre baja (LEO) y heliosíncrona, a una altitud de entre 450 y 600 km.

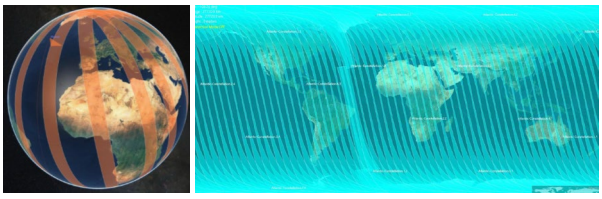


Figura 1. A la izquierda cobertura simulada de adquisición en un solo día de un único satélite de la ESCA. A la derecha cobertura global de 4 satélites de un plano orbital en 1 día.

Las condiciones de licitación son: i) un mínimo del 65% del coste total propuesto debe ser asignado a los operadores españoles; ii) un mínimo del 50% del coste del instrumento multiespectral debe ser asignado a los operadores españoles; iii) las infraestructuras del FOS (Sistema de Operaciones en Vuelo), del PDGS (Segmento Terreno para los Datos de las Cargas de Pago), y del *Marketplace* deben ubicarse en suelo español; y iv) las principales estaciones terrenas TM/TC (telemetría y telecomando) también deben estar en suelo

español permitiendo que las estaciones terrenas secundarias pueden estar fuera de España.

Se define como AoI (Área de Interés) para la Constelación Atlántica los territorios peninsulares y extrapeninsulares de España y Portugal, incluyendo además sus Zonas Económicas Exclusivas (ZEE). Dentro del contexto operativo de la constelación, el AoI es la zona geográfica prioritaria sobre la cual se deben cumplir requisitos específicos de rendimiento, tales como: i) Accesibilidad: El área debe ser accesible por la carga útil óptica al menos dos veces al día; ii) Latencia: El tiempo transcurrido desde la captura de datos sobre el AoI hasta la entrega de los productos de Nivel-0 no debe superar los 60 minutos; y iii) Adquisición sistemática: En ausencia de peticiones específicas de usuarios, los satélites están programados para realizar observaciones de forma continua y sistemática siempre que tengan visibilidad sobre el AoI en horario diurno.

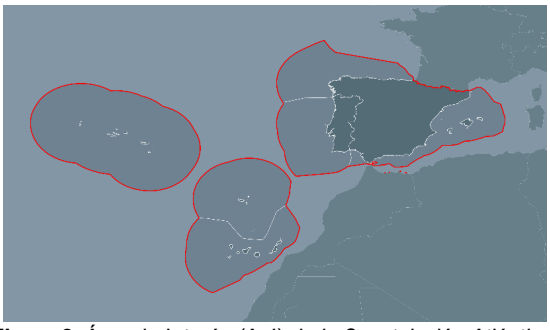


Figura 2. Área de Interés (AoI) de la Constelación Atlántica.

La publicación de pliegos para la licitación previa se realizó en diciembre de 2023. Esta fase de consolidación permitió definir las bases de la misión antes de iniciar su fase de implementación actual (propuesta de requisitos, diseño y arquitectura del sistema). En julio de 2024 se finalizó la fase de consolidación que permitió readaptar los pliegos incluyendo las especificaciones técnicas para lanzar la publicación a través de un Tender de la ESA en febrero de 2025 (Tender Action Number: 1-12556 — Activity Number: 1000041474). Además, la ESCA incluye un acuerdo con la ESA (2023) para apoyo tecnológico y administrativo. El Tender fijó un precio objetivo de 29.1 M€, desglosado en 11 M€ para la Fase 1 y 18.1 M€ para la Fase 2 y se dirigió exclusivamente a operadores españoles con sede registrada en España que actuaran como contratistas principales. El alcance del contrato comprende la adquisición, entrega y aceptación del FOS (ocho satélites cualificados para operación) y el desarrollo del segmento terrestre asociado (PDGS) y el *Marketplace*, así como el lanzamiento, puesta en órbita y comisionado del primer satélite (PathFinder). Finalmente, la adjudicación se publicó en julio de 2025 y su adjudicatario fue la empresa OpenCosmos con sede en Barcelona. La ESA ha aprobado el diseño preliminar en noviembre de 2025 y se prevé tener el diseño cerrado en marzo de 2026. El primer lanzamiento se espera en junio de 2027 y se prevé una vida útil de cada satélite de 3 años, extensible a 5.

En la actualidad la AEE está tramitando una consulta preliminar de mercado para poder preparar la licitación de la fase de operación de la ESCA a partir de julio de 2027, al no estar incluida en la licitación de la ESA.

2.2. Instrumentación

La instrumentación principal de cada plataforma incluye 2 cargas de pago de OT y 2 de telecomunicaciones:

- Cámara de Imágenes multiespectrales VNIR: Con seis bandas espectrales (Azul, Verde, Rojo, dos Red-Edge y NIR) en rangos espectrales comparables con las bandas de Sentinel-2, una resolución espacial (GSD) inferior a 2,5 m en Nivel 0 y un ancho de barrido (swath) de al menos 7 km
- Sensor de Reflectometría GNSS (GNSS-R): Para mediciones en banda L con una resolución espacial inferior a 25 km;
- Sistema de identificación marítima (AIS/VDES) para monitorización de tráfico marítimo
- Sistema de conectividad (IoT) LoRa o 5G para redes de comunicación de sensores terrestres.

La Tabla 1 muestra las características principales de la ESCA.

Tabla 1. Características básicas de la ESCA.

Parámetro	Especificación
Cobertura	Global
Revisita1	Mín. 2 veces/día VNIR. Siempre bajo visibilidad otros instrumentos (RF)
VNIR GSD (570 km)	2.1 m
VNIR *swath* (570 km)	8.6 km
Latencia datos L0	<60 min. dentro AoI
Latencia datos L1C *tasking*	<3 h dentro de AoI.
Latencia L1C sistemática	<6 h dentro de AoI
Vida útil segmento espacial	3 años (extensible a 5)
Vida útil segmento terreno	15 años

Los datos proporcionados por las cargas de pago serán utilizados en la planificación y la gestión en diferentes ámbitos de aplicación tales como la gestión de desastres naturales y emergencias, en aplicaciones agrícolas, usos del suelo, recursos naturales, medio ambiente y el desarrollo urbano, humedad del suelo, monitorización terrestre mediante redes de sensores *in situ* y seguimiento marítimo de embarcaciones, entre otras.

2.3. Productos y *marketplace*

El sistema generará productos desde Nivel-0 hasta Nivel-2A además de permitir implementar productos de variables geofísicas de niveles superiores para servicios *downstream* accesibles a través del *Marketplace*. La ESCA contará con un programa de calibración y validación que permita evaluar los niveles de procesado y los productos derivados. Como misión contributiva de Copernicus, la ESCA fortalecerá la soberanía de datos y mejorará la gestión en áreas estratégicas como la agricultura de precisión, la vigilancia marina y la respuesta ante emergencias ambientales. La ESCA tendrá capacidad de adquirir datos de todos los instrumentos de forma simultánea durante las horas de luz diurna sobre el AoI con una adquisición sistemática sobre el AoI que podría proporcionar una cobertura completa cada 31.54 días. Además la ESCA ofrece la

posibilidad de efectuar solicitudes de programación para adquisición de datos o tasking fundamentalmente para gestión de emergencias y situaciones que comprometan la seguridad nacional. Asimismo, el operador de la ESCA podrá cursar solicitudes de adquisición fuera del AoI por terceros países bajo demanda y con un coste basado en modelo de negocio de beneficio industrial razonable. El *Marketplace* o portal de acceso a los datos permitirá descarga, procesamiento y visualización de datos para todas las categorías de usuario definidas por la AEE como propietaria de la misión y de la licencia de los datos. Los usuarios gubernamentales con acceso al tasking podrán efectuar sus solicitudes directamente que serán incorporadas a la matriz de prioridad que implementará un modelo híbrido (TOPSIS + ELECTRE) que considerará como criterios la gravedad del evento (40%), el tipo de usuario (30%), el área geográfica (20%) y la latencia de entrega (10%), además de las limitaciones técnicas (Wu *et al*., 2019).

3. LA CONSTELACIÓN ESCA+

La iniciativa ESCA+ contribuye al desarrollo de la industria española de defensa y de tecnologías duales a través de los siguientes ejes fundamentales.

3.1. Desarrollo de Capacidades ISR y Tecnologías Duales

ESCA+ se concibe como un sistema de Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento (ISR) con una clara naturaleza dual, permitiendo aplicaciones tanto civiles como militares. El proyecto impulsa el desarrollo industrial nacional en áreas tecnológicas críticas:

- Sensores avanzados de inteligencia de señal (SIGINT/ELINT), radares de apertura sintética (SAR), cámaras ópticas y térmicas de muy alta resolución espacial.
- Tecnologías de comunicaciones encriptadas y enlaces entre satélites para garantizar la soberanía de los datos.
- El diseño resiliente contempla la protección de los activos espaciales ante amenazas en entornos de crisis o conflictos.

3.2. Soberanía Tecnológica y Autonomía Estratégica

Uno de los objetivos centrales de la ESCA+ es garantizar que los derechos de propiedad intelectual e industrial permanezcan en la base tecnológica e industrial estratégica de España. Al desarrollar tecnologías de OT soberanas, se reduce la dependencia externa de sistemas operados por terceros, esencial para la seguridad nacional y la ciberseguridad. El sistema permitirá una explotación soberana, con acceso directo y configurable exclusivamente desde territorio nacional.

3.3. Retorno Industrial y Generación de Empleo Especializado

La inversión de ESCA+ actúa como un motor económico para el sector aeroespacial y de defensa:

- Impacto económico: Se estima un retorno directo para la industria española superior a los 200 millones de euros entre 2026 y 2027.
- Se espera movilizar a decenas de PYMES y centros tecnológicos en toda España.
- Se espera que las empresas nacionales adquieran la "herencia de vuelo" en satélites de tamaño mediano (200-250 kg), una validación técnica esencial para competir en mercados internacionales de defensa.

3.4. Posicionamiento en el Ámbito Gubernamental Europeo

ESCA+ posiciona a la industria española como un actor de referencia en la iniciativa EOGS (Earth Observation Governmental System) de la Comisión Europea. El sistema se diseña para ser interoperable con otros sistemas de seguridad de la Unión Europea, permitiendo que España lidere clústeres tecnológicos dentro de la propuesta de la ESA para EOGS denominada ERS (Europe Resilience from Space).

3.5. Infraestructura Terrestre Segura

El proyecto también financia el desarrollo de un segmento terreno multi-misión seguro, que incluye centros de control, procesado y archivo con capacidades de gestión encriptada de la información. Esto permite la descarga segura de datos incluso en zonas de conflicto u operaciones militares.

4. CONCLUSIONES

Las misiones de OT ESCA y ESCA+ han sido diseñadas para la provisión de servicios y aplicaciones a la ciudadanía y a los usuarios gubernamentales. Con ellas la AEE posiciona a España en la OT y la soberanía tecnológica.

5. REFERENCIAS

Denis, G., Claverie, A., Pasco, X., Darnis, J.-P., de Maupeou, B., Lafaye, M., & Morel, E. (2017). Towards disruptions in Earth observation? New Earth Observation systems and markets evolution: Possible scenarios and impacts. *Acta Astronautica*, *137*, 415-433. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.04.034

Harris, R., & Baumann, I. (2021). Satellite Earth Observation and National Data Regulation. *Space Policy*, *56*, 101422. https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2021.101422

Marini, A., Reina, F., Popescu, A., Castaño, C., Cabeza, I., Santos, C., Miravet, C., Zorita, D., & Delclaud, Y. (2019). SEOSAT/Ingenio: A high-resolution land imaging mission. *International Conference on Space Optics — ICSO 2018*, *11180*, 1495-1502. https://doi.org/10.1117/12.2536064

Real Decreto 158/2023, de 7 de marzo, por el que se aprueba el Estatuto de la Agencia Estatal «Agencia Espacial Española», Legislation No. Real Decreto 158/2023, BOE-A-2023-6082 34514 (2023). https://www.boe.es/eli/es/rd/2023/03/07/158

Wu, J., Zhang, J., Yang, J., & Xing, L. (2019). Research on Task Priority Model and Algorithm for Satellite Scheduling Problem. *IEEE Access*, *7*, 103031-103046. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928992

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.107

Evaluación de sensores hiperespectrales para UAV dentro del proyecto SpaFLEXImp en Doñana

Aragonés Borrego, David [1] **Gómez-Giráldez, Pedro J.** [1] **Romero, Gabriela P.** [1] **Barbero, Luis** [2] **Cobos, Joaquín** [1]

[1] Laboratorio de SIG y Teledetección, Estación Biológica de Doñana (LAST-EBD) CSIC, Sevilla, España

[2] Departamento de Ciencias de la Tierra, Campus internacional de excelencia en Investigación Marina (CEIMAR), Universidad de Cádiz, España

ORCID: Aragonés Borrego 0000-0003-4989-9005 Gómez-Giráldez 0000-0002-1247-7557 Barbero 0000-0002-3513-2025 Cobos 0000-0003-0285-7617

Correspondencia: daragones@ebd.csic.es pedro.gomez@ebd.csic.es gabrielap.romero@ebd.csic.es luis.barbero@uca.es joaquin.cobos@ebd.csic.es

RESUMEN

La misión FLuorescence EXplorer (FLEX) de la Agencia Espacial Europea (ESA) tiene como objetivo mapear la fluorescencia de la clorofila inducida por el sol (SIF). La validación de estos productos requiere una caracterización precisa de la reflectancia en superficie. Este trabajo presenta una comparativa entre dos tecnologías hiperespectrales aeroportadas: un sensor de barrido lineal (push-broom, Headwall Hyperspec®) y un sensor de imagen instantánea (snapshot, Cubert FireflEYE 185), integrados en una plataforma UAV DJI Matrice 600. La metodología emplea el Empirical Line Model (ELM) mediante blancos artificiales y medidas de verdad-terreno con un espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4. Los resultados revelaron que el sensor Headwall posee una mayor robustez estadística global (R2=0.996) y una estabilidad superior en condiciones de baja señal (10%), donde mantuvo una desviación mínima. Por el contrario, el sensor Cubert mostró una sobreestimación sistemática en reflectividad bajas y menor consistencia por debajo de los 600 nm, aunque superó al Headwall en precisiones de rango medio y alto (30% y 50%). Se concluye que la tecnología push-broom es más fiable para la extracción de la SIF en las bandas de absorción del oxígeno, donde la radiancia es mínima, garantizando la precisión necesaria para el monitoreo funcional de la vegetación en ecosistemas complejos como Doñana.

Palabras clave: *Modelo Lineal Empírico, Teledetección de proximidad, Cal/Val*

Fecha de recepción: 30 enero 2026 · **Fecha de aceptación:** 30 enero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación de sensores hiperespectrales para UAV dentro del proyecto SpaFLEXImp en Doñana

Aragonés Borrego, David [(1)], Gómez-Giráldez, Pedro J. [(1)], Romero, Gabriela P. [(1)], Barbero, Luis [(2)], Cobos, Joaquín [(1)]

[(1)] Laboratorio de SIG y Teledetección, Estación Biológica de Doñana (LAST-EBD) CSIC, España, 0000-0003-4989-9005, daragones@ebd.csic.es ; 0000-0002-1247-7557, pedro.gomez@ebd.csic.es gabrielap.romero@ebd.csic.es ; 0000-0003-0285-7617, joaquin.cobos@ebd.csic.es.

[(2)] Departamento de Ciencias de la Tierra, Campus internacional de excelencia en Investigación Marina (CEIMAR), Universidad de Cádiz, España 0000-0002-3513-2025, luis.barbero@uca.es.

Resumen: La misión FLuorescence EXplorer (FLEX) de la Agencia Espacial Europea (ESA) tiene como objetivo mapear la fluorescencia de la clorofila inducida por el sol (**SIF**). La validación de estos productos requiere una caracterización precisa de la reflectancia en superficie. Este trabajo presenta una comparativa entre dos tecnologías hiperespectrales aeroportadas: un sensor de barrido lineal (*push-broom*, Headwall Hyperspec®) y un sensor de imagen instantánea (*snapshot*, Cubert FireflEYE 185), integrados en una plataforma UAV DJI Matrice 600. La metodología emplea el *Empirical Line Model* (ELM) mediante blancos artificiales y medidas de verdad-terreno con un espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4. Los resultados revelaron que el sensor Headwall posee una mayor robustez estadística global (R^2=0.996) y una estabilidad superior en condiciones de baja señal (10%), donde mantuvo una desviación mínima. Por el contrario, el sensor Cubert mostró una sobreestimación sistemática en reflectividades bajas y menor consistencia por debajo de los 650 nm, aunque superó al Headwall en precisiones de rango medio y alto (30% y 50%). Se concluye que la tecnología *push-broom* es más fiable para la extracción de la SIF en las bandas de absorción del oxígeno, donde la radiancia es mínima, garantizando la precisión necesaria para el monitoreo funcional de la vegetación en ecosistemas complejos como Doñana.

Palabras clave: Modelo Lineal Empírico, Teledetección de proximidad, Cal/Val.

English Title

***Abstract**: The FLuorescence EXplorer (FLEX) mission by the European Space Agency (ESA) aims to map solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF). The validation of these products requires an accurate characterization of surface reflectance. This study presents a comparison between two airborne hyperspectral technologies: a push-broom scanning sensor (Headwall Hyperspec®) and a snapshot imaging sensor (Cubert FireflEYE 185), both integrated into a DJI Matrice 600 UAV platform. The methodology is based on the application of the Empirical Line Model (ELM) using artificial targets and ground-truth measurements obtained with an ASD FieldSpec 4 spectroradiometer. Results revealed that the Headwall sensor possesses greater overall statistical robustness (R^2=0.996) and superior stability under low-signal conditions (10%), where it maintained minimal deviation. In contrast, the Cubert sensor showed a systematic overestimation at low reflectance levels and lower consistency at wavelengths below 650 nm, although it outperformed the Headwall in terms of precision within medium and high reflectance ranges (30% and 50%). It is concluded that the Headwall system's push-broom technology is more reliable for SIF extraction in the oxygen absorption bands, where radiance is minimal, ensuring the necessary precision for functional vegetation monitoring in complex ecosystems such as Doñana.*

***Keywords**: Empirical Line Model, Proximal Remote sensing, Cal/Val*

1. INTRODUCCIÓN

La cuantificación de la fluorescencia de la clorofila inducida por el sol (SIF) permite monitorear el estado funcional de la vegetación y su eficiencia fotosintética, constituyendo uno de los indicadores más directos de la actividad fotosintética a escala de hoja y ecosistema (Frankenberg *et al*., 2014). La próxima misión

FLuorescence EXplorer (FLEX) de la Agencia Espacial Europea (ESA), que volará en tándem con Sentinel-3, operará en las bandas de absorción del oxígeno (O_2A a 760 nm y O_2B a 687 nm) permitiendo la estimación global de la SIF con alta resolución espectral (Drusch *et al.*, 2017). Dado que la señal SIF representa apenas una fracción de la radiación total reflejada, cualquier error en la estimación de la reflectancia de la superficie invalida la extracción de la fluorescencia, lo que exige una corrección radiométrica rigurosa.

El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) permite cerrar la brecha escalar entre las medidas de campo y las satelitales, proporcionando información hiperespectral a muy alta resolución espacial (Aasen *et al*., 2018). Sin embargo, la diversidad de sensores hiperespectrales (*push-broom* vs. *snapshot*) introduce incertidumbres que deben ser mitigadas mediante protocolos de corrección radiométrica rigurosos.

Dentro de los objetivos del proyecto SpaFLEX, se encuentra el de realizar campañas de calibración y validación multisensor para la correcta elaboración de protocolos Cal/Val para la consecución de errores finales admisibles que cumplan el requerimiento de la misión FLEX (Gómez-Giráldez *et al.*, 2024). En este contexto, este estudio evaluó la consistencia espectral de estos sensores en un entorno de alta complejidad ecológica como es el Parque Nacional de Doñana, utilizando el modelo lineal empírico (o ELM por sus siglas en ingles *Empirical Line Model*) y validado con datos de verdad terreno tomados con el espetroradiómetro en campo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y Equipamiento

La campaña de campo se llevó a cabo en áreas de brezal higrófilo (*Erico scopariae-Ulicetrum australis*, conocido como Monte Negro) en el Parque Nacional de Doñana (Huelva, España) el 08 de octubre de 2025. La logística en estas zonas es compleja debido a la inaccesibilidad y la sensibilidad del ecosistema.

Se emplearon dos sensores a bordo del dron **DJI Matrice 600 PRO**, hexacóptero de alta estabilidad y 6 kg de carga útil. Los sensores evaluados fueron:

- **Headwall** Hyperspec® Co-Aligned + LiDAR del servicio de drones de la Universidad de Cádiz (UCA), sensor *push-broom* que cubre tanto el VNIR (400-1000 nm) como el SWIR (1000-2500 nm), que captura 273 bandas en el VNIR, con un registro espacial y espectral continuo, con una resolución espectral de 6 nm, se voló a una altura de 80 m y con una resolución espacial de 5 cm
- **Cubert** FireflEYE S185 (Cubert GmbH, Ulm, Alemania) del Laboratorio de SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana, sensor snapshot en el rango VNIR (450-950 nm) que captura un pancromático y 125 bandas, eliminando distorsiones geométricas por movimiento, aunque con menor resolución espectral de 4 nm, voló a una altura de 120 m con una resolución espacial de 4 cm en el pancromático y de 40 cm en el resto de las bandas.

Como referencia en tierra se utilizó un **ASD** FieldSpec 4 (350-2500 nm), calibrado para medir radiancia y reflectancia absoluta mediante un panel de referencia *Spectralon* (99% de reflectividad). Se desplegaron dos **lonas agrícolas** de 10×10 metros, sobre un cortafuego de arena dentro de la zona de estudio, con propiedades espectrales casi constantes (del 3,5% y 50% de reflectividad en la lona negra y la lona blanca respectivamente) para cubrir el rango dinámico de la vegetación y el suelo junto a una **lona calibrada** de 3x3 metros con tres tonos de grises que se usaron para evaluar el modelo (Fig.1).

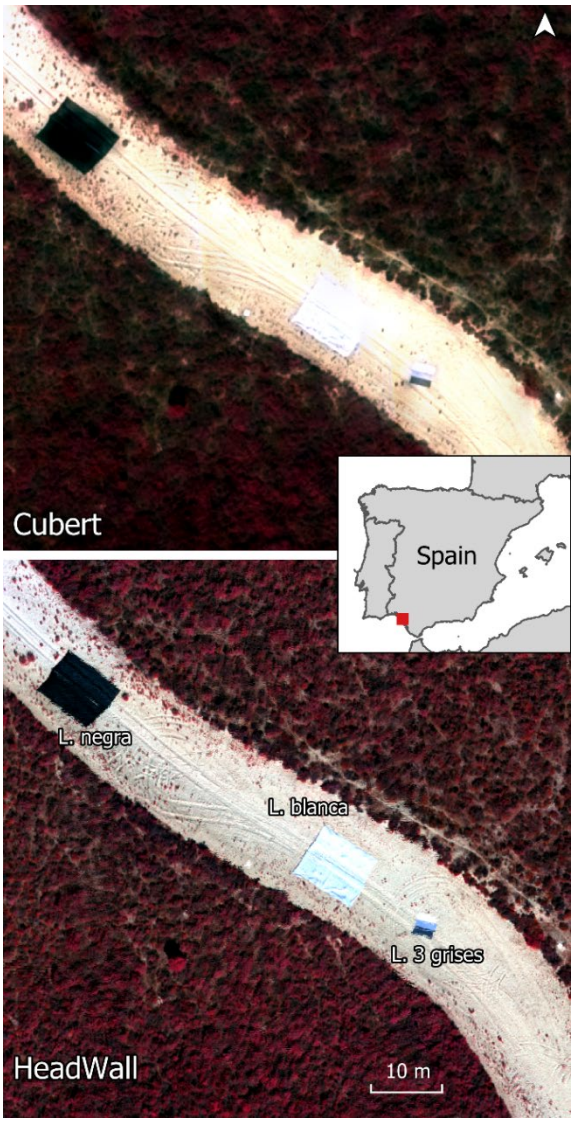


Figura 1. Ubicación de las lonas y comparación de las imágenes con una composición RGB (900, 650 y 550 nm).

2.2. Metodología

Durante los vuelos, se realizaron medidas simultáneas (máx. 1 h de diferencia) con el ASD sobre las lonas, que actuaron como *targets* artificiales. Un total de 30 espectros, cinco réplicas con 10 mediciones cada una y 10 mediciones del *Spectralon* (WR) antes y después del

grupo de réplicas en 3 zonas de cada *target* (Fig. 2). Los espectros fueron medidos en radiancias y transformados a reflectividad usando la media de las medidas del WR antes y después, posteriormente se pasaron a reflectividad absoluta utilizando la firma calibrada del *Spectralon*.

Las imágenes fueron procesadas convirtiendo los niveles digitales a reflectividad en el sensor y con la corrección geométrica o mosaico de las imágenes según el tipo de sensor. Para transformar la reflectividad en el sensor (r) registrados por los drones a reflectividad en superficie (ρ), se aplicó el modelo lineal empírico, una metodología ampliamente utilizada (p.e. Smith & Milton 1999). Este método asume una relación lineal para cada banda que corrige tanto la respuesta del sensor como los efectos de la atmósfera (Eq. 1).

$$\rho_\lambda = a_\lambda r_\lambda + b_\lambda \quad (1)$$

Donde la pendiente (a) y el intercepto (b) se calculan para cada banda mediante regresión lineal simple entre los valores de reflectividad medidos en el sensor promediados sobre los píxeles de las lonas y sus firmas de reflectividad en superficie medidos por el ASD.

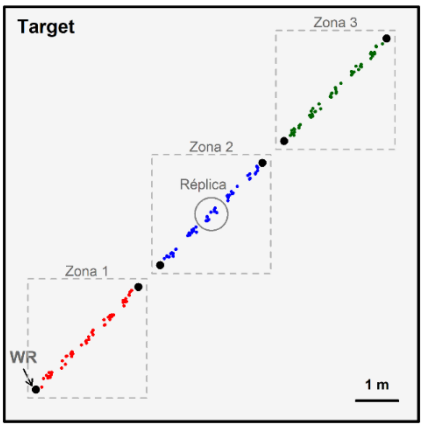


Figura 2. Ejemplo de toma de medidas espectrales sobre un target artificial.

Se promediaron unos 26000 píxeles por lona y sensor descartándose los píxeles de los bordes de la lona. A fin de agilizar el tratamiento de la información, no se procedió con la homogeneización espectral de los sensores. El uso de funciones de respuesta espectral gaussianas para igualar las resoluciones al sensor Cubert se consideró prescindible para este flujo de procesamiento, priorizando la disponibilidad inmediata de los datos originales al obtener los datos de la banda más cercana, al ser un primer análisis exploratorio.

Se usó una lona con tres niveles de gris (50%, 30% y 10% aproximadamente) para evaluar el ajuste del modelo utilizando como métricas: el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE). Se promediaron unos 770 píxeles por nivel de gris.

3. RESULTADOS

La evaluación de la respuesta espectral de los sensores en el rango de 450 a 950 nm, muestra una alta estabilidad en la caracterización de la lona negra y una mínima dispersión entre sensores. Sin embargo, en la lona blanca, se observan discrepancias significativas: el sensor Cubert presenta una firma espectral menos consistente, especialmente en longitudes de onda inferiores a los 650 nm, donde muestra una caída pronunciada en comparación con la referencia. Este comportamiento se aprecia mejor en el diagrama de caja de diferencias de reflectividad (Δρ), entre el espectro tomado con el ASD y el del sensor, donde la lona blanca (b) revela una mayor variabilidad y un sesgo más marcado en el sensor Cubert frente a la mayor precisión y centralidad mostrada por el sistema Headwall (Fig.3).

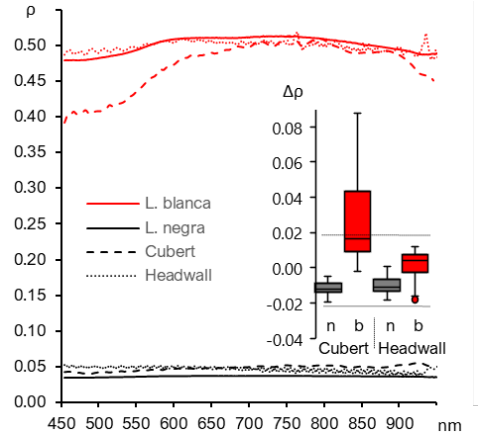


Figura 3. Comparativa de la reflectividad (ρ) medida por los sensores Cubert (línea discontinua) y Headwall (línea punteada) sobre las lonas blanca (rojo) y negra (negro) tomadas con el ASD. El gráfico insertado muestra la distribución de las diferencias de reflectividad (Δρ) para cada sensor y superficie (n: negra; b: blanca).

Tras la aplicación del ELM y comparar las firmas espectrales corregidas de ambos sensores con los valores de referencia del ASD sobre la lona de tres niveles de gris (Fig. 4), observamos cómo el sensor Cubert se adapta bien en los niveles alto e intermedio, pero no se consigue adaptar en el nivel bajo (Gris 10 %), mientras que el sensor Headwall ofrece una respuesta más lineal y fiable en este nivel.

El ajuste del modelo lineal empírico permitió cuantificar la precisión de ambos sensores tras la corrección radiométrica. El comportamiento de los sensores evaluados muestra una dependencia marcada respecto a la magnitud de la reflectividad medida (Tabla 1). A nivel global, el sensor Headwall presenta una mayor robustez estadística (R^2=0.996), explicada por su mínima desviación en el rango bajo de la señal (MAE = 0.0152), donde la respuesta del sensor se mantiene próxima a la línea de identidad. Por el contrario, el sensor Cubert manifiesta un error sistemático por sobreestimación en niveles bajos de reflectancia, duplicando prácticamente el valor de referencia. Es notable, sin embargo, que la precisión del sensor Cubert supera a la de Headwall en los intervalos medio y alto (RMSE de 0.0247 y 0.0401 respectivamente).

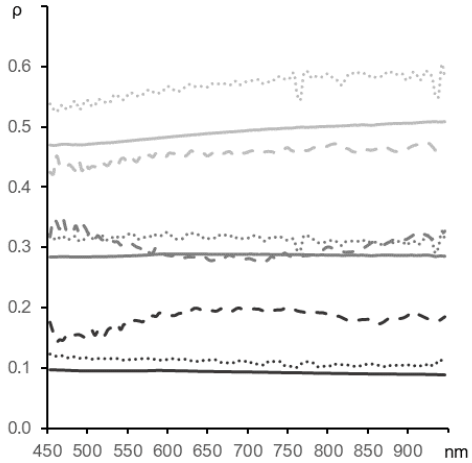


Figura 4. Comparativa de la reflectividad (ρ), medida por los sensores Cubert (línea discontinua) y Headwall (línea punteada), corregidas con el ELM y sobre la lona con tres niveles de grises tomadas con el ASD.

Tabla 1. Evaluación estadística del ajuste del modelo. Los estadísticos fueron calculados de manera global y organizados en tres bloques correspondientes a niveles de reflectividad de los grises.

Intervalo	Métrica	Cubert	Headwall
Global	R^2	0.981	0.996
	RMSE	0.053	0.038
	MAE	0.047	0.034
Gris 50 %	RMSE	0.040	0.058
	MAE	0.037	0.057
Gris 30 %	RMSE	0.025	0.029
	MAE	0.021	0.028
Gris 10 %	RMSE	0.088	0.016
	MAE	0.084	0.015

4. CONCLUSIONES

La disparidad en el rendimiento de los sensores analizados subraya la influencia crítica de la arquitectura de captura (tecnología *push-broom* frente a *snapshot*) en la calidad de los productos hiperespectrales. Mientras que el sensor Cubert demostró una precisión competitiva en rangos de reflectividad medios y altos, su inestabilidad espectral por debajo de los 650 nm y la marcada sobreestimación en niveles de baja señal sugieren limitaciones en su linealidad o en la gestión de la luz dispersa bajo condiciones de alta exigencia radiométrica. En contraposición, el sistema Headwall exhibió una mayor robustez frente al ELM, manteniendo una respuesta significativamente más fiel en el intervalo del 10% de reflectividad. Esta estabilidad del sistema *push-broom* es fundamental para garantizar la consistencia escalar necesaria entre las medidas de campo y las futuras observaciones satelitales de misiones como FLEX.

Estas diferencias tienen implicaciones directas en la viabilidad de la cuantificación del SIF, una señal cuya magnitud representa apenas una fracción de la radiación total y cuya extracción exige una corrección radiométrica extremadamente rigurosa. Dado que la recuperación de la SIF se realiza específicamente en las bandas de absorción del oxígeno (O_2A y O_2B), donde la radiancia registrada es mínima, la precisión demostrada por el sensor Headwall en niveles de baja reflectancia resulta determinante para evitar errores que invaliden la extracción de la señal. Por lo tanto, aunque el sensor Cubert presenta ventajas operativas por su naturaleza *snapshot*, la superioridad del sistema Headwall en el rango de baja señal lo posiciona como la herramienta más fiable para misiones que requieran monitorizar el estado funcional de la vegetación con alta precisión espectral.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a los proyectos SpaFLEXVal (PID2022-137022OB-C33) y FLEX-S3 (PCI2023-145988-2) financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores también participan en las Plataformas Temáticas Interdisciplinares (PTI) del CSIC PTI EcoBioDiv y PTI Teledetect y en la red temática NetOps (RED2022-134438-T). El apoyo logístico y técnico fue proporcionado por ICTS-RBD-CSIC.

6. REFERENCIAS

Aasen, H., Honkavaara, E., Lucieer, A., & Zarco-Tejada, P. J. (2018). Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows. *Remote Sensing, 10*(7), 1091. https://doi.org/10.3390/rs10071091

Drusch, M., Moreno, J., Del Bello, U., et al. (2017). The FLuorescence EXplorer Mission Concept—ESA's Earth Explorer 8. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55*(3), 1273–1284. https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2621820

Frankenberg, C., O'Dell, C., Berry, J., Guanter, L., Joiner, J., et al. (2014). Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. *Remote Sensing of Environment, 147*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.007

Gómez-Giráldez, P.J.; Jiménez, M.; Cendrero-Mateo, M.P.; Van Wittenberghe, S.; Peón, J.J.; Moncholí-Estornell, A.; Díaz-Delgado, R. (2024) The Spafleximp Project: Spanish Flex-S3 Mission Calibration and Validation Plan Implementation. In: IGARSS 2024–2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2024; pp. 296–300. https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10640946

Smith, G. M., & Milton, E. J. (1999). The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing, 20*(13), 2653–2662. https://doi.org/10.1080/014311699211994

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.109

Actualización del sistema de recepción y procesado de datos Meteosat de la Unidad de Cambio Global de la Universidad de Valencia

Julien, Yves [1] **Sobrino, José A.** [1] **Jiménez-Muñoz, Juan-Carlos** [1] **Sòria, Guillem** [1] **Drazen, Skokovic** [1] **Llorens, Rafael** [1]

[1] Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia, España

ORCID: Julien 0000-0001-5334-7137 Sobrino 0000-0003-3787-9373 Jiménez-Muñoz 0000-0001-7562-4895 Sòria 0000-0002-3148-9238 Drazen 0000-0001-7103-9138 Llorens 0000-0002-1973-3437

Correspondencia: yves.julien@uv.es sobrino@uv.es jcjm@uv.es guillem.soria@uv.es drazen.skokovic@uv.es Rafael.llorens@uv.es

RESUMEN

Con la llegada del sensor MTG-FCI (Meteosat de Tercera Generación - Flexible Combined Imager), nuestro sistema de recepción y procesado automático de datos se ha quedado obsoleto. Considerando la resolución espacial (1-2km en nadir) y temporal (10 minutos) de los nuevos datos, este procesado ha de ser eficiente y rápido, sin dejar de lado el rigor científico de los productos obtenidos. En este trabajo, presentamos rápidamente estos nuevos datos y el sistema de recepción actualizado. Además, presentamos la metodología diseñada para poder llevar a cabo la estimación de varios parámetros biofísicos, como índice de vegetación, temperatura de superficie de tierra y de mar, así como la visualización (RGB) de los datos y la detección de incendios. La producción en tiempo casi real de estos parámetros permitirá dar continuidad a la larga serie de productos MSG-SEVIRI (Meteosat Segunda Generación – Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager) estimados de manera continua desde 2007.

Palabras clave: *MTG, FCI, NDVI, TST, TSM*

Fecha de recepción: 2 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 2 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Actualización del sistema de recepción y procesado de datos Meteosat de la Unidad de Cambio Global de la Universidad de Valencia

Julien, Yves [(1)], Sobrino, José A. [(1)], Jiménez-Muñoz, Juan-Carlos [(1)], Sòria, Guillem [(1)], Drazen, Skokovic [(1)], Llorens, Rafael [(1)]

[(1)] Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia, España.

0000-0001-5334-7137, yves.julien@uv.es ; 0000-0003-3787-9373, sobrino@uv.es.

0000-0001-7562-4895, jcjm@uv.es ; 0000-0002-3148-9238, guillem.soria@uv.es.

0000-0001-7103-9138, drazen.skokovic@uv.es; 0000-0002-1973-3437, Rafael.llorens@uv.es.

Resumen: Con la llegada del sensor MTG-FCI (Meteosat de Tercera Generación - *Flexible Combined Imager*), nuestro sistema de recepción y procesado automático de datos se ha quedado obsoleto. Considerando la resolución espacial (1-2km en nadir) y temporal (10 minutos) de los nuevos datos, este procesado ha de ser eficiente y rápido, sin dejar de lado el rigor científico de los productos obtenidos. En este trabajo, presentamos rápidamente estos nuevos datos y el sistema de recepción actualizado. Además, presentamos la metodología diseñada para poder llevar a cabo la estimación de varios parámetros biofísicos, como índice de vegetación, temperatura de la superficie de tierra y de mar, así como la visualización (RGB) de los datos y la detección de incendios en un plazo inferior a 5 minutos después de la adquisición de la imagen. La producción en tiempo casi real de estos parámetros permitirá dar continuidad a la larga serie de productos MSG-SEVIRI (Meteosat Segunda Generación – *Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager*) estimados de manera continua desde 2007.

Palabras clave: MTG, FCI, NDVI, TST, TSM

Upgrading the receiving station for Meteosat data at the Global Change Unit of the University of Valencia

***Abstract**: With the arrival of the MTG-FCI sensor (Meteosat Third Generation – Flexible Combined Imager), our data reception and automatic processing system has become obsolete. Considering the spatial (1–2 km at nadir) and temporal (10 minutes) resolution of the new data, the processing must be efficient and fast, while maintaining the scientific rigor of the derived products. In this work, we briefly present these new data and the updated reception system. In addition, we present the methodology designed to estimate several biophysical parameters, such as vegetation index, land and sea surface temperature, as well as data visualization (RGB composite) and fire detection within 5 minutes of image acquisition. The near–real-time production of these parameters will ensure continuity of the long time series of MSG-SEVIRI (Meteosat Second Generation – Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager) products constantly estimated since 2007.*

***Keywords**: MTG, FCI, NDVI, LST, SST*

1. INTRODUCCIÓN

Con la puesta en órbita del último sensor de la serie Meteosat de Tercera Generación (MTG), llamado *Flexible Combined Imager* (FCI), el sistema de recepción ubicado en las instalaciones del Laboratorio de procesado de Imágenes de la Universidad de Valencia se ha quedado obsoleto. Este sistema, basado en los datos MSG-SEVIRI (Meteosat Segunda Generación – *Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager*) ha proporcionado desde 2007, un monitoreo en tiempo real de varios parámetros biofísicos, como el índice de diferencia normalizado de vegetación (NDVI por sus siglas en inglés), la temperatura de la superficie del mar (TSM) y la de tierra (TST), así como la detección de incendios (hotspots), recogidos en varias publicaciones (Julien *et al*., 2015; Sobrino *et al*., 2020; Sobrino & Julien, 2021).

Estos parámetros biofísicos son de gran interés para aplicaciones agrícolas, medioambientales, climáticas o de protección civil, sin mencionar la divulgación del conocimiento del estado de nuestro planeta. También son útiles en campos científicos, como para el estudio de la fenología (Sobrino *et al*., 2013), del efecto de isla de calor urbano, o para la corrección de artefactos en series temporales de datos de satélite (Julien & Sobrino, 2021).

El nuevo sistema de recepción de los datos MTG-FCI se instaló en nuestro laboratorio a finales de 2025, y estamos en el proceso de actualización del sistema de procesado para seguir proporcionando los servicios mencionados anteriormente. Debido a los cambios en la resolución espacial del sensor, así como en las características de las bandas de observación, y por el reducido tiempo entre imágenes (10 minutos), todo el procesado de datos ha de ser revisado y optimizado para ser llevado a cabo en menos de 5 minutos.

El propósito de este trabajo es presentar este nuevo sistema de recepción y procesado, haciendo hincapié en las características de este nuevo sensor, el reciente instalado sistema de recepción, y los algoritmos considerados para un procesado eficiente.

2. SENSOR MTG-FCI Y SISTEMA DE RECEPCIÓN

2.1. Sensor MTG-FCI

La plataforma MTG se encuentra en una órbita geoestacionaria, localizada al cenit del punto de latitud y longitud (0,0). Esta órbita le permite observar casi la mitad de nuestro planeta, incluyendo principalmente África y Europa, ya que Sudamérica se observa con un ángulo importante, como se puede apreciar en la figura 1.



Figura 1. Composición RGB de los datos MTG-FCI correspondiendo a la imagen adquirida el 14 de enero de 2026 a las 12:00 UTC.

El sensor FCI consta de 16 bandas, de las cuales 3 están en el espectro visible (azul, verde y rojo), 2 en el infrarrojo cercano, 3 en el infrarrojo mediano, y 8 en infrarrojo térmico. Las bandas del infrarrojo térmico tienen una resolución espacial de 2km en nadir, y las demás bandas 1km. Sobre la Península Ibérica, estas resoluciones corresponden a alrededor de 3 y 1,5 km respectivamente. El área observada se puede ver en la imagen RGB de la figura 1, elaborada a partir de las bandas rojo, verde y azul del sensor FCI del día 14 de enero de 2026 a las 12:00 UTC.

2.2. Recepción de los datos

El sistema de recepción de los datos MTG-FCI consiste de una parábola de 1,40m de diámetro y de un LNB quad, conectados por cables coaxiales a un receptor NOVRA S401Pro, este último estando conectado a un PC de recepción, equipado con el software Geostationary Ingester de la empresa Dartcom, bajo licencia. Este ordenador está también conectado a través de un switch gigabit al ordenador de procesado, permitiendo el intercambio de los datos recibidos a gran velocidad.

Los datos MTG-FCI se reciben por bloques para cada adquisición (40 bloques), los cuales se guardan como archivos Netcdf para su posterior procesado.

Cada imagen del infrarrojo térmico consta de 5568 por 5568 píxeles, mientras cada imagen del visible e infrarrojo cercano es de 11136 por 11136 píxeles. El volumen de datos recibido es considerable (unos 80 GB per día), sumando unos 30 TB al año. Por el volumen de datos considerable generado, el procesado se ha diseñado en la modalidad “al vuelo”, con solamente el archivado de los resultados finales (NDVI, TSM, TST, RGB, incendios detectados).

3. PROCESADO

3.1. Preprocesado

Los archivos Netcdf recibidos por nuestra antena se agregan para su posterior lectura y calibrado, y para estimar las temperaturas de brillo para las bandas del infrarrojo térmico, y las radiancias para las demás bandas. También se obtienen de esos archivos información adicional como los ángulos de iluminación y de observación de cada pixel, necesarios para el posterior procesado.

3.2. Corrección atmosférica en las bandas ópticas

Tanto para visualización como para la estimación de parámetros biofísicos, se necesita llevar a cabo la corrección del efecto de la atmosfera sobre los datos recibidos en el espectro visible y del infrarrojo cercano. De hecho, esta corrección no se efectuó para los datos mostrados en la figura 1, lo cual se evidencia por ejemplo con el color rojo que presenta el Sahara. En el caso de MTG-FCI, utilizaremos el software RTTOV (Saunders *et al*., 2018), para llevar a cabo esta corrección.

3.3. Índice de vegetación

Usaremos el NDVI como índice de vegetación para la caracterización temporal de la misma, a partir de las reflectividades en las bandas rojo (RED) e infrarrojo cercano (NIR), según introducido por Tucker (1979):

$$NDVI = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{RED}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{RED}} \qquad (1)$$

Un ejemplo de valores de NDVI para la imagen MSG-SEVIRI del 14 de enero de 2026 a las 12:00 UTC se presenta en la figura 2.

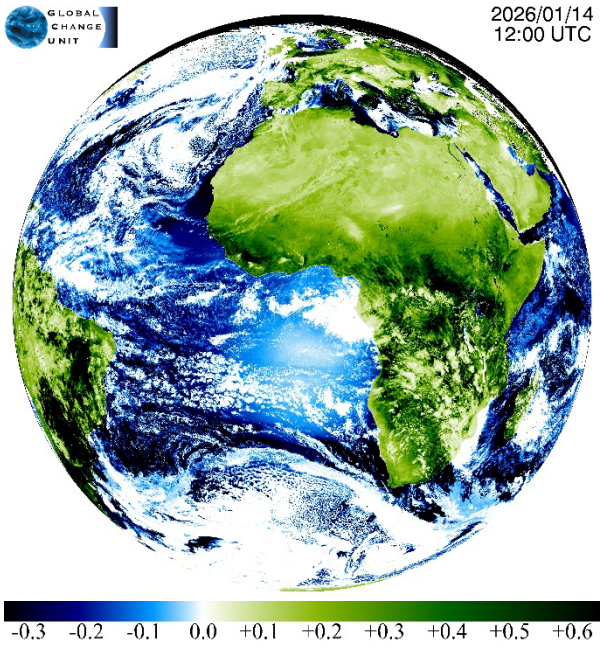


Figura 2. Composición RGB de los datos MTG-FCI correspondiendo a la imagen adquirida el 14 de enero de 2026 a las 12:00 UTC.

3.4. Temperatura de la superficie de mar

La TSM se estimará basándose en el método denominado split-window (Sobrino *et al*., 1996), el cual permite estimar esta temperatura a partir de las temperaturas de brillo en las bandas centradas de las longitudes de onda 10,5µm (T_i) y 12,3µm (T_j), incluyendo el ángulo (θ) de observación del sensor (Eq. 2), similar a la ecuación usada para MSG-SEVIRI (Sobrino *et al*., 2020). Los coeficientes de esta ecuación (b_0 a b_5) se determinarán por simulación. La validación de este algoritmo se basará en datos in situ de boyas y comparación con datos satelitales independientes (estimando el sesgo y raíz del error cuadrático medio respecto a los valores de referencia).

Un ejemplo de imagen de temperatura de mar estimada con el sensor MSG-SEVIRI para el día de 14 enero de 2026 a las 12:00 UTC se presenta en la figura 3.

$$TSM = b_0 + T_i + (b_1 + b_2 \sec(\theta))(T_i - T_j) + (b_3 + b_4 \sec(\theta) + b_5 \sec(\theta)^2)(T_i - T_j)^2 \quad (2)$$

3.5. Temperatura de la superficie de tierra

De la misma manera, la TST se estimará a partir del método split-window (Sobrino *et al*., 1996), basándose en las mismas bandas que en el caso de la TSM, el ángulo (θ) de observación del sensor (Eq. 3), similar a la ecuación usada para MSG-SEVIRI (Sobrino *et al.*, 2020). Los coeficientes de esta ecuación (c_0 a c_{14}) se determinarán por simulación. En cuanto a la validación, usaremos tanto los datos in situ de las estaciones de medidas descritas en Sobrino & Skokovic (2016) como datos satelitales independientes (estimando el sesgo y raíz del error cuadrático medio respecto a los valores de referencia).

$$\begin{aligned} TST = {} & (c_0 + c_1 \sec(\theta)^2) + T_i \\ & + (c_3 + c_4 \sec(\theta)^2)(T_i - T_j) \\ & + (c_5 + c_6 \sec(\theta)^2)(T_i - T_j)^2 \\ & + ((c_7 + c_8 \sec(\theta)^2) \\ & + (c_9 + c_{10} \sec(\theta)^2)W)(1 - \varepsilon) \\ & + ((c_{11} + c_{12} \sec(\theta)^2) \\ & + (c_{13} + c_{14} \sec(\theta)^2)W)\Delta\varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

En este caso, se deberá estimar previamente la emisividad (ε y Δε) en cada una de las bandas seleccionadas, así como el contenido total de vapor de agua (W). Para ello, se usará la metodología de los umbrales de NDVI (Sobrino *et al*., 2001) y una formulación usando 3 bandas del infrarrojo térmico similar a Sobrino *et al.* (2020).

Un ejemplo de imagen de temperatura de tierra estimada con el sensor MSG-SEVIRI para el día de 14 enero de 2026 a las 12:00 UTC se presenta en la figura 3.

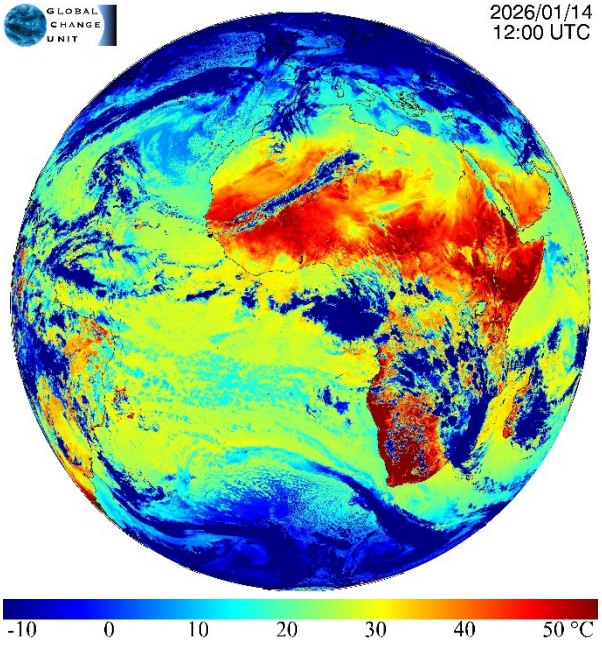


Figura 3. Composición RGB de los datos MTG-FCI correspondiendo a la imagen adquirida el 14 de enero de 2026 a las 12:00 UTC.

3.6. Incendios

La detección de incendios se llevará a cabo usando el algoritmo descrito en Eumetsat (2026), el cual aprovecha información del infrarrojo térmico en las bandas centradas en 3,8µm y 10,5µm para detectar puntos calientes. Estas detecciones se harán para el disco observado entero, cada 10 minutos, y se mapearán como mostrado en la figura 4. En este caso, las detecciones son del día 21 de diciembre de 2025 con datos MSG-SEVIRI. Estas detecciones se compararán con detecciones independientes para su validación.

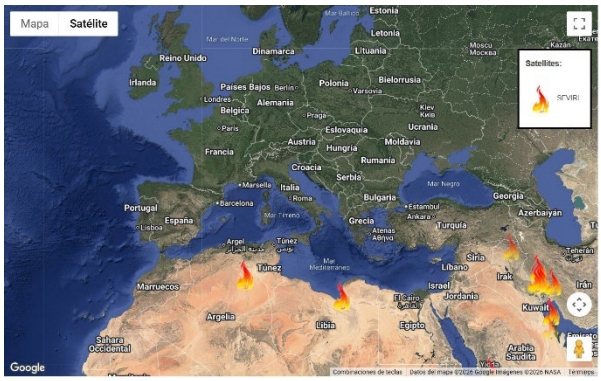


Figura 4. Mapeo de los puntos calientes detectados en la imagen del 21 de diciembre de 2025.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado la metodología prevista para la actualización del sistema automático de procesado de nuestra nueva antena de recepción de datos MTG-FCI. Este procesado permitirá proporcionar datos biofísicos (NDVI, TST, TSM) validados, así como detecciones de incendios en tiempo casi real para casi un hemisferio de nuestro planeta. Estos productos se pondrán a disposición del público general a través de una página en tiempo casi real (en menos de 5 minutos), y permitirán proporcionar información rigurosa y actualizada cada 10 minutos sobre el estado actual de nuestro planeta a la ciudadanía.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la financiación recibida de la Conselleria de Educación, Cultura y Universidades de la Generalitat Valenciana, dentro del marco PROMETEO 2024 (Subvenciones para la realización de proyectos de I+D+I para grupos de investigación de excelencia), para el proyecto "Indicadores Medioambientales y Fenómenos Adversos en la Comunidad Valenciana usando datos de satélite" (INMESAT, referencia CIPROM2023-42). Adicionalmente, este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, a través de la Agencia Española de Investigación (AEI/10.13039/501100011033, proyecto PID2023-150737OB-I00).

6. REFERENCIAS

Eumetsat (2026). MTG FCI level 1c data guide. https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/mtg-fci-level-1c-data-guide, visitado por última vez el 14 de enero de 2026.

Julien, Y. & Sobrino, J.A. (2021). NOAA-AVHRR orbital drift correction: Validating methods using MSG-SEVIRI data as a benchmark dataset. *Remote Sens., 13* (5) (2021), p. 925, https://doi.org/10.3390/rs13050925.

Julien, Y., Sobrino, J. A., & Sòria, G. (2015). Retrieving and broadcasting near-real-time biophysical parameters from MODIS and SEVIRI receiving stations at the global change unit of the University of Valencia. International J*ournal of Remote Sensing, 36* (19–20) (2015), pp. 5273-5288, https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1040134.

Saunders, R., Hocking, J., Turner, E., Rayer, P., Rundle, D., Brunel, P., Vidot, J., Roquet, P., Matricardi, M., Geer, A., Bormann, N., & Lupu, C. (2018). An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). *Geosci. Model Dev., 11*, 2717-2737, https://doi.org/10.5194/gmd-11-2717-2018.

Sobrino, J. A., & Julien, Y. (2021). Near real-time processing chain for MSG SEVIRI data for free and immediate Earth monitoring capabilities. *Frontiers in Remote Sensing, 2*, 10, https://doi.org/10.3389/frsen.2021.666516.

Sobrino, J. A., & Skoković, D. (2016). Permanent Stations for Calibration/Validation of Thermal *Sensors over Spain. Data, 1*(2), 10. https://doi.org/10.3390/data1020010.

Sobrino, J. A., Raissouni, N. & Li, Z.-L. (2001). A Comparative Study of Land Surface Emissivity Retrieval from NOAA Data. *Remote Sensing of Environment 75*: 256–266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00171-1.

Sobrino, J.A., Li, Z.-L., Stoll, M. P. & Becker, F. (1996). Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. International *Journal of Remote Sensing, vol. 17,* no. 11, 2089-2114, https://doi.org/10.1080/01431169608948760.

Sobrino, J.A.; Julien, Y.; & Soria, G. (2013). Phenology Estimation From Meteosat Second Generation Data. IEEE *J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2013, 6*, 1653–1659, https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2259577.

Sobrino, J.A.; Julien, Y.; Jiménez-Muñoz, J.-C.; Skokovic, D.; & Sòria, G. (2020). Near real-time estimation of Sea and Land surface temperature for MSG SEVIRI sensors. Int. *J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2020, 89*, 2096, https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102096.

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment, Vol. 8*, No. 2, 1979, pp. 127-150, ISSN 0034-4257, https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.116

Reestructuración y estandarización del catálogo de datos de teledetección del PNT (IGN), mediante STAC, para la creación del Geonodo Español de Imágenes Satélite (GNEIS)

Aragoneses, Elena [1] **Bermejo Priego, José Luis** [1] **Tamés Noriega, Agustín** [2]

[1] Instituto Geográfico Nacional, C/ General Ibáñez de Ibero 3, Madrid, España

[2] Isdefe, C/ Beatriz de Bobadilla 3, Madrid, España

ORCID: Aragoneses 0000-0003-2651-7561 Bermejo Priego 0009-0000-6197-9409 Tamés Noriega 0000-0002-9271-8284

Correspondencia: earagoneses@transportes.gob.es jlbermejo@transportes.gob.es atames@isdefe.es

RESUMEN

El proyecto GNEIS (Geonodo Español de Imágenes Satélite) constituye un esfuerzo estratégico para modernizar y unificar la gestión y distribución de datos de teledetección en España. Como primera fase, se ha llevado a cabo una reestructuración integral del catálogo de imágenes y productos del Plan Nacional de Teledetección (PNT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), adoptando el estándar internacional STAC (Catálogo de Activos Espaciales y Temporales). Esta estandarización permite disponer de una visión global del inventario nacional, mejorar la interoperabilidad y optimizar tanto los procesos internos del IGN como el acceso a los datos por distintos perfiles de usuarios. GNEIS se plantea como una infraestructura dinámica y en expansión, preparada para integrar nuevos productos y servicios. Su evolución incluirá la colaboración con un centro de supercomputación, la automatización de procesos de ingestión, capacidades avanzadas de análisis en la nube y herramientas de consulta adaptadas a las necesidades de cada usuario. Con ello, se persigue consolidarlo como el nodo nacional de referencia en teledetección y fomentar un uso más amplio y eficiente de los datos satelitales.

Palabras clave: *GNEIS, STAC (Catálogo de Activos Espaciales y Temporales), teledetección, catálogo, infraestructura geoespacial*

Fecha de recepción: 4 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 4 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Reestructuración y estandarización del catálogo de datos de teledetección del PNT (IGN), mediante STAC, para la creación del Geonodo Español de Imágenes Satelitales (GNEIS)

Aragoneses, Elena [(1)], Bermejo Priego, José Luis [(1)], Tamés Noriega, Agustín [(2)]
[(1)] Instituto Geográfico Nacional, España,
0000-0003-2651-7561, earagoneses@transportes.gob.es.
0009-0000-6197-9409, jlbermejo@transportes.gob.es.
[(2)] Isdefe, España,
0000-0002-9271-8284, atames@isdefe.es.

Resumen: El proyecto GNEIS (Geonodo Español de Imágenes Satelitales) constituye un esfuerzo estratégico para modernizar y unificar la gestión y distribución de datos de teledetección en España. Como primera fase, se ha llevado a cabo una reestructuración integral del catálogo de imágenes y productos del Plan Nacional de Teledetección (PNT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), adoptando el estándar internacional STAC (Catálogo de Activos Espaciales y Temporales). Esta estandarización permite disponer de una visión global del inventario nacional, mejorar la interoperabilidad y optimizar tanto los procesos internos del IGN como el acceso a los datos por distintos perfiles de usuarios. GNEIS se plantea como una infraestructura dinámica y en expansión, preparada para integrar nuevos productos y servicios. Su evolución incluirá la colaboración con un centro de supercomputación, la automatización de procesos de ingestión, capacidades avanzadas de análisis en la nube y herramientas de consulta adaptadas a las necesidades de cada usuario. Con ello, se persigue consolidarlo como el nodo nacional de referencia en teledetección y fomentar un uso más amplio y eficiente de los datos satelitales.

Palabras clave: GNEIS, STAC (Catálogo de Activos Espaciales y Temporales), teledetección, catálogo, infraestructura geoespacial.

Restructuring and standardisation of the PNT (IGN) remote sensing data catalogue, using STAC, for the creation of the Spanish Satellite Image Geonode (GNEIS)

***Abstract**: The GNEIS (Spanish Satellite Image Geonode) project is a strategic effort to modernise and unify the management and distribution of remote sensing data in Spain. As a first phase, a comprehensive restructuring of the image and product catalogue of the National Remote Sensing Plan (PNT) of the National Geographic Institute (IGN) has been carried out, adopting the international STAC (SpatioTemporal Asset Catalog) standard. This standardisation provides a comprehensive overview of the national inventory, improves interoperability, and optimizes both the IGN's internal processes and data access for different user profiles. GNEIS is designed as a dynamic and expanding infrastructure, ready to integrate new products and services. Its evolution will include collaboration with a supercomputing centre, the automation of ingestion processes, advanced cloud analysis capabilities, and query tools tailored to the needs of each user. The aim is to consolidate it as the national reference node for remote sensing and to promote a broader and more efficient use of satellite data.*

***Keywords**: GNEIS, STAC (SpatioTemporal Asset Catalog), remote sensing, catalog, Geospatial infrastructure.*

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) coordina el Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT), dentro del cual se integra desde 2004 el Plan Nacional de Teledetección (PNT: https://pnt.ign.es/). Su objetivo principal es optimizar recursos y promover el uso de imágenes satelitales de distintas características sobre España, procedentes de misiones espaciales tanto de acceso libre como comercial. Para ello, el IGN adquiere, gestiona y distribuye productos satelitales de acceso libre –como los procedentes de las constelaciones Sentinel de la Agencia Espacial Europea (ESA)– además de imágenes de misiones comerciales, entre ellas las de muy alta resolución (VHR) de Geosat-2, adquiridas en sustitución de las que hubiera proporcionado el satélite

Seosat-INGENIO (Marini *et al*., 2019). Estos datos se comparten con las Administraciones Públicas (AA.PP.) y la ciudadanía en función de las licencias de uso.

En el marco de las iniciativas europeas y nacionales de observación de la Tierra, el IGN participa en el acuerdo firmado entre la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Agencia Espacial Española (AEE) para desarrollar un portal nacional de datos satelitales y servicios asociados a productos Sentinel. Esta iniciativa se apoya en la experiencia previa del IGN, que desde septiembre de 2023 dispone de un geoportal para la distribución a las AA.PP. de imágenes VHR procedentes de satélites comerciales (https://geoportalpnt.ign.es/geoportalPNT/; Bermejo Priego, 2024). Su evolución constituye la base para el desarrollo del Geonodo Español de Imágenes Satelitales (GNEIS), una plataforma integral orientada a las AA.PP., la comunidad científica y la ciudadanía.

GNEIS se concibe como un geonodo nacional que integrará datos y servicios satelitales –tanto libres como de acceso restringido, según las condiciones de licencia–, que dará soporte a usuarios con distintos niveles de especialización. Está orientado a usuarios de todas las AA.PP. (desde la Administración General del Estado hasta la administración local, pasando por universidades públicas) y a la ciudadanía. Su desarrollo se plantea como la iniciativa emblemática del PNT y un recurso estratégico de gran valor para España y Europa, constituyéndose como un hito nacional de teledetección.

La puesta en marcha de GNEIS requiere la creación de una plataforma integral que permita visualizar, analizar y distribuir imágenes satelitales, productos de valor añadido y datos auxiliares. Para ello, es necesario definir una arquitectura de sistema de alto nivel que contemple almacenamiento, gestión y procesamiento de datos, junto con sus componentes, interfaces de usuario y mecanismos de acceso y control, y garantizando un rendimiento óptimo, la usabilidad del geoportal y la escalabilidad y sostenibilidad del proyecto.

A pesar del creciente volumen de datos disponibles, uno de los principales retos actuales es la heterogeneidad de las estructuras de productos, metadatos y formatos de teledetección, que dificultan la gestión e interoperabilidad de los datos. Surge por tanto la necesidad de reorganizar y estandarizar el catálogo del PNT conforme a los estándares actuales para su inclusión en GNEIS, a fin de optimizar la distribución y usabilidad de los datos de teledetección en España.

El objetivo de este artículo es describir el proceso de reorganización y estandarización del catálogo satelital del futuro GNEIS y los criterios aplicados para su óptima gestión e interoperabilidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En los últimos años se ha producido un notable avance en plataformas y servicios en la nube especializados en el manejo de imágenes y datos de teledetección, que permiten trabajar con ellos de forma eficiente y con costes reducidos (Coetzee *et al*., 2020). Estas soluciones reducen las necesidades de almacenamiento local y simplifican el acceso y procesamiento.

Entre ellas destaca la especificación STAC (Catálogo de Activos Espaciales y Temporales o *SpatioTemporal Asset Catalog*: https://stacspec.org/en; Newman y ESCO, 2023), que define un modelo unificado para describir el acceso a datos espaciotemporales mediante una estructura jerárquica basada en catálogos, colecciones e ítems (Fig. 1). En este modelo, un catálogo constituye el nivel superior que agrupa colecciones; una colección agrupa elementos relacionados; y un ítem representa un activo geoespacial individual con sus metadatos. STAC se ha consolidado como estándar en los datos de observación de la Tierra –utilizado por ejemplo en el *Copernicus Data Space Ecosystem* (CDSE: https://dataspace.copernicus.eu/), puesto en marcha en 2023 como nueva plataforma de acceso a los productos de Sentinel en el portal de imágenes de la ESA– para su indexación y descubrimiento, y se empleará como estructura de referencia para describir los activos satelitales de GNEIS.

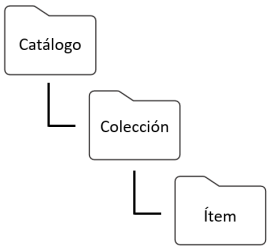


Figura 1. Estructura anidada del catálogo STAC.

Sobre esta base, se analizó y reorganizó la totalidad de imágenes, productos derivados y metadatos gestionados y distribuidos por el PNT. Esto incluye contenido multisensor procedente de misiones ópticas y radar, productos históricos, derivados espectrales y productos de valor añadido. El flujo de trabajo comprende las siguientes tareas principales:

- Definición de una nueva estructura jerárquica STAC desde nivel catálogo hasta nivel ítem, especificando, además, los tipos de activos (*assets*) asociados a cada Ítem.
- Clasificación según accesibilidad (datos libres versus datos restringidos para AA.PP.).
- Organización por origen de los datos, proyecto interno del PNT en el que se enmarcan y conjunto de datos (misión satelital, campaña, producto derivado, etc).
- Homogeneización de metadatos procedentes de múltiples fuentes y normalización de nomenclaturas.

Además, todos los activos ráster fueron convertidos al formato *Cloud Optimized GeoTIFF* (COG; Pollack, 2024), facilitando su visualización y procesamiento en entornos *cloud* sin necesidad de descargar los datos completos.

3. RESULTADOS

La organización del nuevo catálogo GNEIS según el modelo STAC (nivel 0) dio lugar a dos colecciones principales (nivel 1), definidas según la accesibilidad de sus datos (Fig. 2). La primera colección, “Libre”,

contiene productos accesibles al público general. La segunda, "AAPP", incluye imágenes disponibles exclusivamente para AA.PP. previa autorización y firma de licencias. La interfaz de GNEIS mostrará unas colecciones u otras en función del perfil con el que se inicie sesión. Cada tipo de acceso se estructura en niveles jerárquicos que facilitan la localización, el uso y la interoperabilidad de los datos de teledetección.

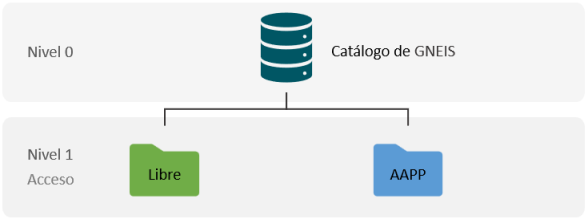


Figura 2. Estructura general del nuevo catálogo de imágenes, productos y datos de teledetección de GNEIS.

Por un lado, la colección de acceso libre (nivel 1) se estructura en tres niveles jerárquicos adicionales. El nivel 2 organiza los datos según su origen en cuatro colecciones principales: "Copernicus", "PNT", "PNT histórico" y "PVA: productos de valor añadido". El nivel 3 los clasifica según el proyecto interno del PNT al que pertenecen. El nivel 4 los organiza por conjunto de datos, es decir, según el satélite, la campaña o el tipo de producto derivado correspondiente (Fig. 3). Esta estructura jerárquica facilita la accesibilidad de los datos, promoviendo un uso eficiente tanto para fines de investigación como para aplicaciones operativas y educativas.

Por otro lado, la colección restringida para AA.PP. presenta también tres niveles jerárquicos replicando la lógica de la colección pública. En el nivel 2, los datos se agrupan en tres colecciones principales: "Copernicus", "PNT" y "PNT histórico". En los niveles 3 y 4, los datos se clasifican según su proyecto dentro del PNT y su conjunto de datos (Fig. 4). Esta estructura permite a los usuarios institucionales localizar rápidamente los productos específicos necesarios, garantizando la correcta aplicación de las licencias de uso.

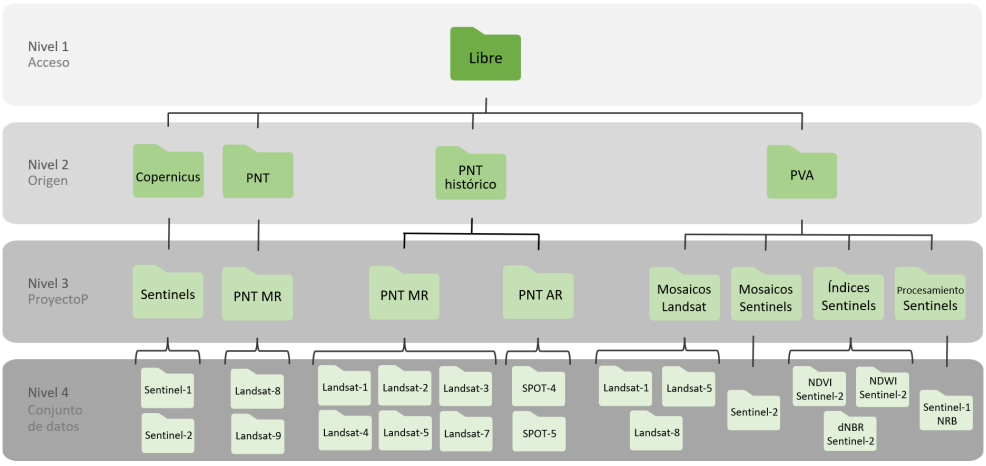


Figura 3. Estructura STAC, tentativa, de la colección de acceso libre del catálogo GNEIS. * MR: Media Resolución, AR: Alta Resolución, NRB: *Normalised Radar Backscatter*.

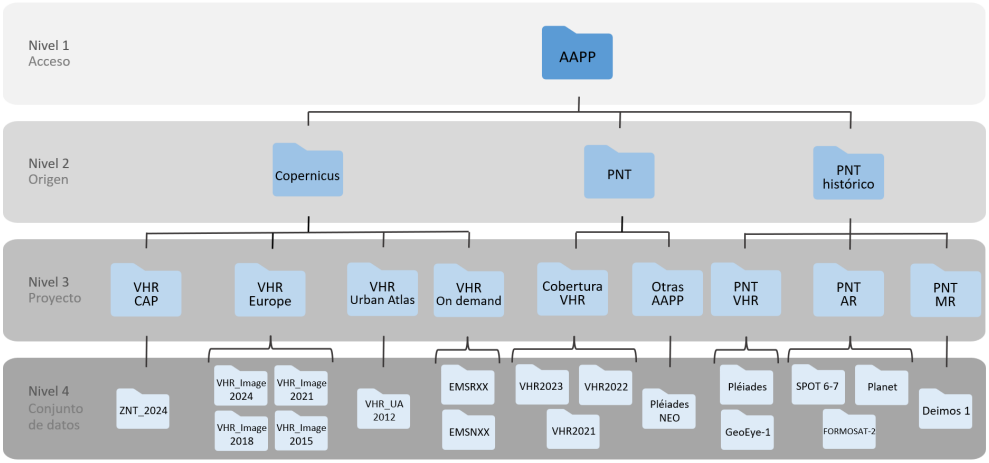


Figura 4. Estructura STAC, tentativa, de la colección de acceso restringido a las AA.PP. del catálogo GNEIS. * CAP: *Common Agricultural Policy*, ZNT: Zonas de No Tolerancia del Fondo Español de Garantía Agraria, EMSR: *Emergency Mapping Service Rush*, EMSN: *Emergency Mapping Service Non-Rush*.

En un nivel inferior (equivalente al nivel 5 tanto para la colección de acceso libre como la de acceso restringido a las AA.PP.), cada escena o producto aparece como un ítem STAC con sus correspondientes activos (*assets*): archivos ráster en formato COG, imagen de previsualización y archivo de metadatos. La conversión a COG garantiza un acceso eficiente, especialmente en flujos de trabajo basados en la nube.

En cuanto al metadato (*geoJSON*), la definición de un conjunto de campos común a todos los ítems siguiendo reglas STAC permitirá la búsqueda avanzada de productos en GNEIS mediante filtros referentes a sus características o a sus parámetros de adquisición (fecha, *Ground Sample Distance*, ángulo de adquisición, etc.).

4. DISCUSIÓN

La estandarización del catálogo de imágenes, productos y metadatos del PNT conforme a las especificaciones STAC ha permitido obtener una visión coherente y completa del conjunto de datos de teledetección gestionados y distribuidos a nivel nacional por el IGN.

Esta homogeneización mejora la gestión interna, reduce redundancias y facilita el uso combinado de productos de distintas misiones. Tanto los usuarios especializados como los no especializados se beneficiarán de una estructura clara que optimiza el descubrimiento, acceso y aprovechamiento de los datos, contribuyendo a los objetivos del PNT.

El catálogo reorganizado constituye el núcleo informativo de GNEIS, aunque la organización del catálogo podría sufrir posteriores cambios para adaptarse a los nuevos productos y necesidades que vayan surgiendo. Paralelamente, se están definiendo las especificaciones técnicas de la plataforma mediante historias de usuario, garantizando que las funcionalidades respondan a necesidades reales de administraciones, investigadores y ciudadanía.

Un elemento clave para la futura operatividad de GNEIS es la gestión del gran volumen de datos, reto que se afronta mediante la colaboración entre el IGN y Scayle (https://www.scayle.es/), el centro de supercomputación de Castilla y León. Esta alianza proporcionará capacidad de procesamiento y almacenamiento, y garantizará la escalabilidad del sistema.

Entre las principales ventajas esperadas de GNEIS se encuentran la mejora en la interoperabilidad de los datos, la simplificación del acceso para distintos perfiles de usuario, la reducción de costes operativos gracias a la estandarización y la centralización, el fortalecimiento del ecosistema nacional de teledetección y el impulso al uso estratégico de estos datos en investigación, monitorización ambiental y toma de decisiones.

Aun así, el proceso presenta desafíos: la heterogeneidad de los datos de origen, la necesidad de mantener el catálogo actualizado y el periodo de adaptación al estándar STAC para organismos con flujos heredados. Finalmente, hay que tener en consideración los costes de mantenimiento y operación asociados a una infraestructura de este tipo, para asegurar su continuidad y mejora continua, a medio-largo plazo.

En el futuro se prevé avanzar en la automatización de los flujos de ingestión, validación y publicación de datos dentro de GNEIS, así como en la incorporación de servicios avanzados de análisis en la nube —procesamiento bajo demanda, generación automática de derivados o análisis multitemporal— que permitan ampliar las capacidades de GNEIS más allá de la distribución de datos. GNEIS se concibe como un proyecto dinámico y en continua evolución. A medida que se generen nuevos productos de teledetección o surjan necesidades emergentes, se prevé la ampliación progresiva del catálogo, reforzando su papel como punto de referencia nacional para datos de teledetección.

5. CONCLUSIONES

La reestructuración del catálogo del PNT conforme al estándar STAC constituye un paso fundamental para la creación del Geonodo Español de Imágenes Satelitales (GNEIS). La nueva organización jerárquica, junto con la conversión de los activos a formato COG y estandarización de datos auxiliares, mejora la interoperabilidad, accesibilidad y eficiencia del sistema. Este trabajo sienta las bases para una plataforma nacional robusta y escalable, alineada con las tendencias actuales en gestión de datos de teledetección.

GNEIS evolucionará hacia una infraestructura integral que centralice la exploración, visualización y análisis de datos de teledetección, impulsando el uso estratégico de la observación de la Tierra en España.

6. REFERENCIAS

Bermejo Priego, J. L. (2024). Imágenes satelitales de muy alta resolución para las AA.PP. Tramos. Revista del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible (747, mayo 2024). ISBN:2792-4564.

Coetzee, S., Ivánová, I., Mitasova, H., & Brovelli, M. A. (2020). Open geospatial software and data: A review of the current state and a perspective into the future. *ISPRS International Journal of Geo-Information* (9, 2). https://doi.org/10.3390/ijgi9020090

Marini, A., Reina, F., Popescu, A., Castaño, C., Cabeza, I., Santos, C., Miravet, C., Zorita, D. & Delclaud, Y. (2019). SEOSAT/Ingenio: a high-resolution land imaging mission. *International Conference on Space Optics-ICSO 2018* (11180). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.2536064

Newman, D. J. & ESDIS Standards Coordination Office (ESCO). 2023. SpatioTemporal Asset Catalogs (STAC). NASA Earth Science Data and Information System Standards Coordination Office. https://doi.org/10.5067/DOC/ESCO/ESDS-RFC-044v1

Pollack, N. (2024). Cloud Optimized GeoTIFF (COG) File Format. NASA Earth Science Data and Information System Standards Coordination Office. https://doi.org/10.5067/DOC/ESCO/ESDS-RFC-049v1

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.125

Comparación de LST entre medidas in situ y productos satelitales de MODIS, SLSTR y VIIRS en la Base Antártica Marambio

Gatón Herguedas, Javier [1,2] **Calle Montes, Abel** [1,2] **Román Diez, Roberto** [1,2] **González Catón, Ramiro** [1,2] **González Fernández, Daniel** [1,2] **Herrero del Barrio, Celia** [1,2] **Longarela Fuente, Bruno** [1,2] **Herrero Anta, Sara** [1,2] **Mateos Villán, David** [1,2] **Antuña Marrero, Juan Carlos** [3,1] **Toledano Olmeda, Carlos** [1,2] **Cachorro Revilla, Victoria Eugenia** [1,2] **de Frutos Baraja, Ángel Máximo** [1,2]

[1]:Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Paseo de Belén, 7, 47011, Valladolid, España;
[2]: Laboratory for Disruptive Interdisciplinary Science de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Paseo de Belén, 7, 47011, Valladolid, España;
[3]: Instituto de Geociencias (IGEO), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Universidad Complutense de Madrid (UCM), 28040, Madrid, España

ORCID: Gatón Herguedas 0000-0002-1229-155X Calle Montes 0000-0003-4161-7798 Román Diez 0000-0003-4889-1781 González Catón 0000-0003-0017-5591 González Fernández 0000-0002-3302-8080 Herrero del Barrio 0009-0001-9508-3886 Longarela Fuente 0009-0005-7323-462X Herrero Anta 0000-0003-4246-1836 Mateos Villán 0000-0001-5540-4721 Antuña Marrero 0000-0002-7037-015X Toledano Olmeda 0000-0002-6890-6648 Cachorro Revilla 0000-0002-4627-9444 de Frutos Baraja 0000-0001-5748-5078

Correspondencia: gaton@goa.uva.es abel@goa.uva.es robertor@goa.uva.es ramiro@goa.uva.es daniel@goa.uva.es celia@goa.uva.es bruno@goa.uva.es sara@goa.uva.es mateos@goa.uva.es antuna@goa.uva.es toledano@goa.uva.es chiqui@goa.uva.es angel@goa.uva.es

RESUMEN

Este trabajo preliminar presenta una comparación de medidas de temperatura de superficie terrestre (LST) basadas en tierra con estimaciones procedentes de los sensores satelitales MODIS, VIIRS y SLSTR en la estación antártica de Marambio durante los años 2024 y 2025. Se observa una discrepancia sistemática entre los productos satelitales y las medidas terrestres en el verano austral 2024/25, caracterizada por un sesgo positivo en los sensores satelitales que aumenta y decrece de forma aproximadamente lineal, alcanzando diferencias máximas del orden de 20 K a mediados de diciembre de 2024. Esta discrepancia se reduce parcialmente con los filtrados de cobertura nubosa intrínsecos de algunos productos satelitales, pero persiste al aplicar un filtrado de nubosidad alternativo basado en la instrumentación en tierra.

Palabras clave: *Antártida, LST, MODIS, SLSTR, VIIRS*

Fecha de recepción: 5 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Comparación de LST entre medidas in situ y productos satelitales de MODIS, SLSTR y VIIRS en la Base Antártica Marambio

Gatón Herguedas, Javier[1, 2], Calle Montes, Abel[1, 2], Román Diez, Roberto[1, 2], González Catón, Ramiro[1, 2], González Fernández, Daniel[1, 2], Herrero del Barrio, Celia[1, 2], Longarela Fuente, Bruno[1, 2], Herrero Anta, Sara[1, 2], Mateos Villán, David[1, 2], Antuña Marrero, Juan Carlos[1, 3], Toledano Olmeda, Carlos[1, 2], Cachorro Revilla, Victoria Eugenia[1, 2], de Frutos Baraja, Ángel Máximo[1, 2]

[1] Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, España, Laboratory for Disruptive Interdisciplinary Science de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, España.

[2] Laboratory for Disruptive Interdisciplinary Science de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Paseo de Belén, 7, 47011, Valladolid, España

[3] Instituto de Geociencias (IGEO), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Universidad Complutense de Madrid (UCM), España.

0000-0002-1229-155X, gaton@goa.uva.es.; 0000-0003-4161-7798, abel@goa.uva.es.; 0000-0003-4889-1781, robertor@goa.uva.es.; 0000-0003-0017-5591, ramiro@goa.uva.es.; 0000-0002-3302-8080, daniel@goa.uva.es.; 0009-0001-9508-3886, celia@goa.uva.es.; 0009-0005-7323-462X, bruno@goa.uva.es.; 0000-0003-4246-1836, sara@goa.uva.es.; 0000-0001-5540-4721, mateos@goa.uva.es.; 0000-0002-7037-015X, antuna@goa.uva.es.; 0000-0002-6890-6648, toledano@goa.uva.es.; 0000-0002-4627-9444, chiqui@goa.uva.es.; 0000-0001-5748-5078, angel@goa.uva.es.

Resumen: Este trabajo preliminar presenta una comparación de medidas de temperatura de superficie terrestre (LST) basadas en tierra con estimaciones procedentes de los sensores satelitales MODIS, VIIRS y SLSTR en la estación antártica de Marambio durante los años 2024 y 2025. Se observa una discrepancia sistemática entre los productos satelitales y las medidas terrestres en el verano austral 2024/25, caracterizada por un sesgo positivo en los sensores satelitales que aumenta y decrece de forma aproximadamente lineal, alcanzando diferencias máximas del orden de 20 K a mediados de diciembre de 2024. Esta discrepancia se reduce parcialmente con los filtrados de cobertura nubosa intrínsecos de algunos productos satelitales, pero persiste al aplicar un filtrado de nubosidad alternativo basado en la instrumentación en tierra.

Palabras clave: Antártida, LST, MODIS, SLSTR, VIIRS

Comparison of LST between ground-based measurements and MODIS, SLSTR and VIIRS satellite products in Marambio Antarctic Station

***Abstract**: This preliminary work presents a comparison of ground-based land surface temperature (LST) measurements with satellite products from MODIS, VIIRS, and SLSTR sensors at the Marambio antarctic station during the period 2024-2025. A systematic discrepancy between satellite and ground-based measurements is identified in the austral summer of 2024/25, characterized by a positive bias in the satellite sensors that increases and decreases in an approximately linear manner, reaching its maximum differences, on the order of magnitude of 20 K, at the middle of December 2024. This discrepancy is partially reduced by the satellite-intrinsic cloud-screening filters, but it persists when applying an alternative cloud-screening approach based on ground-based instrumentation.*

***Keywords**: Antarctica, LST, MODIS, SLSTR, VIIRS*

1. INTRODUCCIÓN

La temperatura de superficie terrestre o *Land Surface Temperature* (LST), es una variable clave en estudios climáticos y ambientales. En las regiones polares esta variable resulta especialmente útil, ya que es influyente en procesos de balance radiativo, la criosfera, y la validación de productos derivados de satélite en condiciones de muy baja temperatura.

La estimación de LST en ciertas zonas polares presenta diversos desafíos, como la frecuente presencia de nubosidad, las complejas propiedades radiativas de la superficie, y la escasez de medidas de referencia adecuadas para la validación.

En este contexto, en febrero de 2024 se instaló instrumentación en la base antártica permanente de Marambio (64.240 S, 56.625 W) en la isla Marambio o Seymour, permitiendo la disponibilidad de medidas desde la superficie terrestre en la península antártica (Calle *et al.*, 2024). La localización de la isla y la base se puede ver en detalle en la Figura 1.

El presente trabajo es preliminar, pero tiene como objetivo comparar productos LST de los sensores *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo del satélite Terra, *Sea and Land Surface Temperature Radiometer* (SLSTR) a bordo de los satélites Sentinel-3A y Sentinel-3B, y *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) a bordo del NASA *Suomi-National Polar-orbiting Partnership* (Suomi NPP), con las medidas terrestres de un radiómetro tipo Apogee obtenidas en la base Marambio, complementadas por observaciones auxiliares orientadas al control de la nubosidad. La comparación se realiza analizando la consistencia entre sensores satelitales y datos tomados en la superficie terrestre, la aparición de discrepancias sistemáticas entre ambos, y el efecto de los filtrados de cobertura nubosa tanto satelitales como independientes.

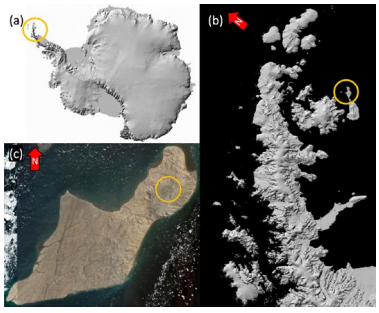


Figura 1. Localización de la Base Antártica Marambio. (a) Vista general de la Antártida, con la península Antártica resaltada. (b) Ampliación de la península Antártica, indicando la posición de la isla Marambio. (c) Detalle de la isla Marambio, con la zona de la Base Marambio marcada mediante una circunferencia de 1 km de radio.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Medidas desde superficie terrestre

Las medidas desde la superficie terrestre se realizan mediante un radiómetro infrarrojo Apogee. Se trata de un instrumento que mide la radiancia térmica en la ventana atmosférica entre 8 y 14 µm, englobando el intervalo espectral de operación de todos los sensores satelitales que operan en el rango térmico, con un *field of view* (FOV) de 22°. Esto lo hace idóneo para la determinación de la temperatura de la superficie terrestre. Se encuentra instalado en un mástil a 4 metros de altura, y con extensión de 1.5 metros para evitar elementos de construcción en el FOV del radiómetro. La superficie de apuntamiento es característica del entorno, con mezcla de nieve, tierra y permafrost, y con valores de emisividad características de cuerpo negro.

El radiómetro realiza medidas de temperatura de superficie terrestre cada cinco minutos, permitiendo tener un valor temporalmente cercano a toda medida satelital para su validación.

2.2. Productos satelitales

En este trabajo se utilizan tres productos satelitales distintos: «MOD11_L2.061» del MODIS Terra, «VNP21.002» del VIIRS del satélite Suomi-NPP, y «sentinel-3-sl-2-lst-ntc» del SLSTR de Sentinel-3. Los tres productos son de un nivel de procesado equivalente *Level-2*, donde cada valor de LST es derivado directamente de una captura de radiancia, y geolocalizado en un píxel dentro de una malla en geometría orbital, con una resolución cercana al kilómetro. En MODIS y SLSTR esta resolución es de aproximadamente un kilómetro, mientras que en VIIRS es de 750 metros.

2.3. Criterios de selección y filtrado

2.3.1. Criterios de selección

La comparación se ha realizado con los datos satelitales cuyos centros de píxel se encuentren a menos de un kilómetro de las coordenadas 64.243 S, 56.635 O. Cada medida satelital se ha asociado con las dos medidas desde la superficie terrestre temporalmente circundantes, y se le ha asignado la interpolación lineal del LST de ambas.

2.3.2. Filtrados satelitales

Las medidas de LST L2 presentan unos valores auxiliares de calidad. Estos se han utilizado para realizar un filtrado eliminando píxeles erróneos permitiendo un análisis comparativo en mayor profundidad.

Cada sensor presenta diferentes valores de calidad en LST. En SLSTR se ha utilizado el filtrado de nubes bayesiano (Ghent *et al.*, 2024), recomendado para LST, con una exactitud de aproximadamente el 90%. En VIIRS y MODIS los datos ya presentan un filtrado implícito de nubosidad, no generándose en caso de una fuerte presencia de nubosidad. Para ellos se ha utilizado como filtro el indicador de nubosidad cercana (Malakar *et al.*, 2018). Este valor informa de cuando hay una nube a menos de dos kilómetros del píxel que podría estar influyendo en la medida.

2.3.3. Filtrado de nubosidad independiente

La cámara *all-sky* instalada junto al radiómetro infrarrojo captura imágenes aproximadamente cada cinco minutos. Estas imágenes se utilizan junto a un modelo de estimación de octas diurnas (González-Fernández *et al.*, 2024) para asignar la estimación de cobertura nubosa de cada medida tomada en la superficie terrestre. En base a estas estimaciones, el filtrado independiente de este trabajo consiste en filtrar las medidas de más de cero octas, evitando medidas satelitales con influencias de nubes pequeñas cercanas. Cabe destacar que la desviación típica de este modelo en Marambio para cero octas es de +1,88 octas.

3. RESULTADOS

3.1. Consistencia de las medidas en tierra

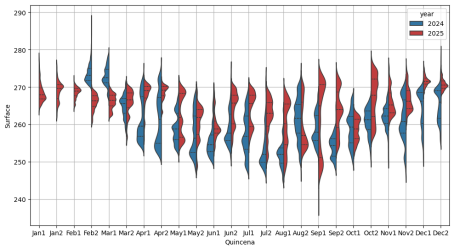


Figura 2. Distribución de frecuencia de las temperaturas medidas con el Apogee por quincena, mostrada mediante diagramas de violín, que representan tanto la densidad de los datos como su dispersión. Se comparan las mediciones de 2024 (azul) y 2025 (rojo).

Las medidas tomadas en la superficie de la Tierra no muestran comportamientos extraños en el periodo analizado, lo que es un buen indicio para utilizarlas como referencia en la comparación satelital. Esto puede observarse en la Figura 2, donde se comparan la distribución de temperatura observada por quincena entre los años 2024 y 2025.

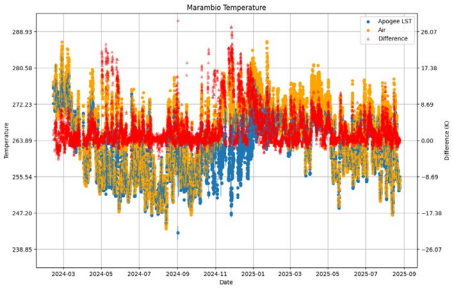


Figura 3. LST medido con el Apogee (azul) frente a la temperatura de aire de la estación (naranja). En el eje de la derecha se muestran la diferencia entre ambos (rojo).

Sin embargo, comparando las medidas de LST con las medidas de temperatura de aire de la estación hasta agosto de 2025, disponibles en la base de datos de *National Centers for Environmental Information* (NCEI) del NOAA (Fig. 3), se observa un desacuerdo entre ambas medidas en mayo de 2024, y en el verano austral 2024/25, donde la diferencia entre ambos valores supera de forma continuada los 10 K de diferencia máxima habituales.

3.2. Comparación LST satélite vs. terrestre

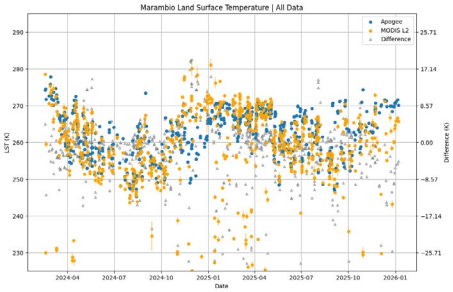


Figura 4. LST sin filtrar de MODIS Terra L2 (naranja) frente a las medidas *in situ* correspondientes (azul). En el eje de la derecha se muestran la diferencia entre ambos (gris).

Las medidas satelitales presentan un buen acuerdo general respecto a los valores terrestres, con algunas desviaciones ocasionales. En SLSTR estas discrepancias puntuales son mucho más frecuentes y tienden hacia temperaturas más frías, detectando valores del orden de 230 K frecuentemente. Sin embargo, aparece una discrepancia en el verano austral 2024/25, donde los tres sensores detectan una desviación sistemática gradual que alcanza una diferencia total de +20 K respecto a las medidas desde tierra. Estas comparaciones se pueden ver en las Figuras 4, 5 y 6 para MODIS, VIIRS y SLSTR respectivamente.

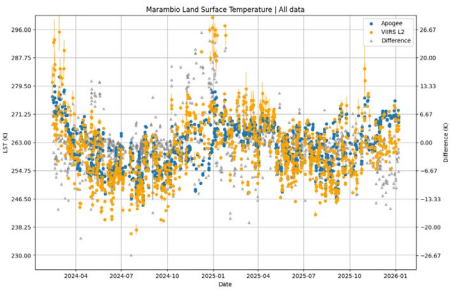


Figura 5. Similar a la Figura 4 pero con LST sin filtrar de VIIRS Suomi NPP L2.

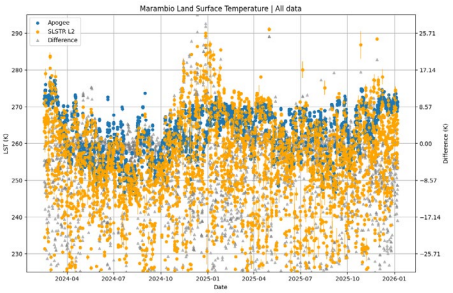


Figura 6. Similar a la Figura 4 pero con LST sin filtrar de SLSTR Sentinel-3 L2.

3.3. Filtrado de nubosidad satelital

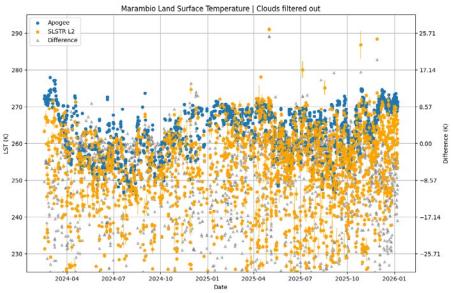


Figura 7. Similar a la Figura 4 pero con LST de SLSTR Sentinel-3 L2 con su filtrado bayesiano de nubes aplicado.

El efecto del filtrado de nubes varía entre sensores. En MODIS, los filtros de nubosidad eliminan la mayoría de las medidas, eliminando la discrepancia junto a prácticamente todos los datos estivales. En el caso de VIIRS, el filtrado reduce la amplitud de la discrepancia, siendo la versión sin filtrar más extensa temporalmente. Por el contrario, en SLSTR el filtrado de nubes propio elimina en gran medida el evento observado, sin eliminar una cantidad excesiva de medidas regulares, como puede observarse en la Figura 7.

3.4. Filtrado de nubosidad independiente con cámara all-sky

El filtrado alternativo descrito en la Sección 2.3.3 sólo funciona en cielos diurnos. Las mayores discrepancias suceden en el verano, por lo que el filtrado se puede utilizar para la gran mayoría de medidas relevantes, eliminando las nocturnas. Utilizándolo la discrepancia se reduce levemente en duración y magnitud, pero persiste en todos los sensores utilizados. En la Figura 8 se muestran las imágenes tomadas por la cámara de todo cielo en alguno de los instantes que pasan el filtrado de nubosidad alternativo y muestran una mayor diferencia de cada sensor satelital con las medidas terrestres.

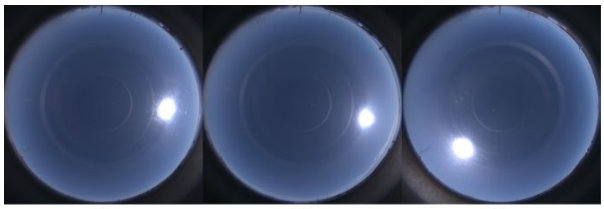


Figura 8. Imágenes de la cámara de todo cielo de Marambio correspondientes a instantes que pasan el filtrado de nubosidad alternativo, y presentan una gran diferencia entre los sensores satelitales y las medidas terrestres. Corresponden, en UTC, a: (a) 2024/12/11 11:25, con una diferencia de +26 K en SLSTR; (b) 2024/11/14 11:40, con +15 K en MODIS; y (c) 2024/12/08 18:15, con +26 K en VIIRS.

Para el resto de los datos, este filtro reduce mucho las discrepancias de temperatura fría que podíamos encontrar en los sensores satelitales, especialmente en SLSTR, con mayor efectividad que los filtros intrínsecos de los propios sensores satelitales.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este trabajo preliminar compara los valores de LST de MODIS Terra, VIIRS Suomi NPP y SLSTR de Sentinel-3 con medidas terrestres en la estación antártica Marambio en 2024 y 2025, y se observa una discrepancia sistemática en el verano 2024/25, donde los datos satelitales presentan un sesgo positivo que aumenta y disminuye de forma lineal, alcanzando diferencias máximas del orden de 20 K a mediados de diciembre.

Aplicando los filtros de nubosidad de cada sensor, se elimina la discrepancia en SLSTR, se reduce la amplitud en VIIRS, y se elimina la discrepancia, junto a la mayoría de las medidas, en MODIS. Sin embargo, aplicando un filtrado de nubes alternativo con imágenes todo cielo tomadas en tierra, la discrepancia no se elimina, lo que significa que no puede ser causada por fuertes presencias de nubosidad.

Entre las posibles causas de esta discrepancia se encuentran el efecto de la superficie marina cercana a la costa sobre las medidas satelitales, el efecto de nubes cercanas sobre las mismas medidas, o un error en las propias medidas terrestres, donde los valores obtenidos no sean representativos de la temperatura de superficie de la isla.

Más allá de la discrepancia del verano de 2024/25, los sensores muestran un gran acuerdo con las medidas terrestres, aunque cabe destacar que las medidas del SLSTR presentan discrepancias frecuentes donde las medidas del sensor satelital son inferiores que las terrestres. Estas discrepancias se eliminan de manera muy efectiva con el filtrado de nubosidad alternativo.

Este trabajo recalca la importancia de conseguir medidas radiométricas de alta calidad de la temperatura de superficie terrestre en el continente antártico tomadas desde la propia superficie de la Tierra, para la realización de actividades de validación y calibración de datos de sensores satelitales.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean mostrar su agradecimiento al Servicio Meteorológico Nacional argentino (SMN) por el soporte y ayuda en la ubicación y el mantenimiento de la instrumentación en la base antártica de Marambio.

Este proyecto ha sido financiado por el proyecto TRIPOLI (PID2024-157697OB-I00) de la Agencia Estatal de Investigación.

6. REFERENCIAS

Calle, A., Gatón, J., González, R., Carracedo, R., Román, R., Martín, P., Mateos, D., Toledano, C., Cachorro, V., de Frutos, A.M., Sobrino, J.A., Skokovic, D. (2024). Puesta en operación de instrumentación en la Base Antártica de Marambio. En *Teledetección y Cambio Global: Retos y Oportunidades para un Crecimiento Azul, Actas del XX Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, pp. 141-144. 2024, Cádiz. Disponible en: https://aet.org.es /publicaciones/actas-de-congresos

Ghent, D., Anand, J. S., Veal, K., & Remedios, J. (2024). The Operational and Climate Land Surface Temperature Products from the Sea and Land Surface Temperature Radiometers on Sentinel-3A and 3B. *Remote Sensing*, 16(18), 3403. Disponible en: https://doi.org/10.3390/rs16183403

González-Fernández, D., Román, R., Antuña-Sánchez, J. C., Cachorro, V. E., Copes, G., Herrero-Anta, S., Herrero del Barrio, C., Barreto, Á., González, R., Ramos, R., Martín, P., Mateos, D., Toledano, C., Calle, A., & Frutos, Á. (2024). A neural network to retrieve cloud cover from all-sky cameras: A case of study over Antarctica. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(764), 4631-4649. Disponible en: https://doi.org/10.1002/qj.4834

Malakar, N. K., Hulley, G. C., Hook, S. J., Laraby, K., Cook, M., & Schott, J. R. (2018). An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(10), 5717-5735. Disponible en: https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2824828

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.177

Intercomparación espectral, radiométrica y de ángulo sólido "indoor" de los espectrorradiómetros FloX en el proyecto SpaFLEX

Gutiérrez de la Cámara Ara, Óscar [1] **Muñoz Sanchéz, Felix** [1] **Muela Pillajo, Jimmy A.** [1] **Moncholi Estornell, Adrián** [2] **Gómez Giraldez, Pedro** [3] **Gómez del Rio, Miguel** [4] **Peón Garcia, Juan José** [1] **Jiménez Michavila, Marcos** [1] **Díaz-Delgado, Ricardo** [3] **Cendrero-Mateo, Mª Pilar** [2] **Campos Acosta, Joaquín** [4]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

[2] Universidad de Valencia

[3] Estación Biológica de Doñana

[4] Instituto de Óptica

ORCID: Gutiérrez de la Cámara Ara 0000-0003-2555-9292 Muñoz Sanchéz 0000-0002-6421-8725 Muela Pillajo 0009-0002-9524-5483 Moncholi Estornell 0000-0002-8832-2594 Gómez Giraldez 0000-0002-1247-7557 Gómez del Rio 0000-0003-1415-2307 Peón Garcia 0000-0001-7551-2236 Jiménez Michavila 0000-0002-6852-2732 Díaz-Delgado 0000-0002-0460-4616 Cendrero-Mateo 0000-0001-5887-7890 Campos Acosta 0000-0001-6527-1440

Correspondencia: gutierrezcao@inta.es munozsf@inta.es jmuepil@inta.es adrian.moncholi@uv.es pedro.gomez@ebd.csic.es m.g.delrio@csic.es jpeogar@inta.es jimenezmm@inta.es rdiaz@ebd.csic.es m.pilar.cendrero@uv.es joaquin.campos@csic.es

RESUMEN

La correcta caracterización espectral y radiométrica de los espectrorradiómetros de campo es fundamental para asegurar la calidad y la trazabilidad de las mediciones utilizadas en las actividades de calibración y validación (Cal/Val) de la misión FLEX-S3. En el proyecto SpaFLEX se han realizado diversas intercomparaciones instrumentales, entre ellas ensayos en condiciones de laboratorio ("indoor") con dos espectrorradiómetros FloX (JB-022 y JB-060), ampliamente utilizados para la observación de la fluorescencia inducida por el Sol en vegetación. El objetivo principal fue evaluar su comportamiento bajo condiciones controladas, identificar posibles diferencias entre instrumentos y comprobar su coherencia respecto a medidas de referencia trazables. La evaluación espectral se llevó a cabo mediante lámparas de descarga en gas a baja presión, que permitieron analizar la exactitud en longitud de onda y detectar posibles desplazamientos en la respuesta espectral. Para la parte radiométrica se empleó una esfera integradora de 1 metro de diámetro como fuente homogénea de radiancia e irradiancia, previamente calibrada con un espectrorradiómetro ASD FieldSpec® 3 con trazabilidad a los patrones nacionales, garantizando así la validez de las mediciones obtenidas. Los resultados permitieron identificar diferencias entre los instrumentos, relacionadas tanto con su respuesta espectral y radiométrica como con aspectos geométricos vinculados al ángulo sólido irradiado. Estas discrepancias son clave para determinar la adecuación de la calibración vigente y, en caso necesario, aplicar acciones correctoras antes de las campañas de campo. La realización de intercomparaciones periódicas refuerza la confianza en los datos obtenidos y contribuye a la armonización de las mediciones de fluorescencia y variables radiométricas en el Plan Español de Cal/Val de FLEX-S3.

Palabras clave: *Intercomparación radiométrica, Caracterización espectral, Trazabilidad metrológica*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Intercomparación espectral, radiométrica y de ángulo sólido “indoor” de los espectrorradiómetros FloX en el proyecto SpaFLEX

Gutiérrez de la Cámara Ara, Óscar [(1)], Muñoz Sanchéz, Felix [(1)], Muela Pillajo, Jimmy A. [(1)], Moncholi Estornell, Adrián [(2)], Gómez Giraldez, Pedro [(3)], Gómez del Rio, Miguel [(4)], Peón Garcia, Juan José [(1)], Jiménez Michavila, Marcos [(1)], Díaz-Delgado, Ricardo [(3)], Cendrero-Mateo, Mª Pilar [(2)], Campos Acosta, Joaquín [(4)]

[(1)] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

0000-0003-2555-9292, gutierrezcao@inta.es ; 0000-0002-6421-8725, munozsf@inta.es

0009-0002-9524-5483, jmuepil@inta.es

[(7)] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

0000-0001-7551-2236, jpeogar@inta.es ; 0000-0002-6852-2732, jimenezmm@inta.es

[(2)] Universidad de Valencia

0000-0002-8832-2594, adrian.moncholi@uv.es ; 0000-0001-5887-7890, m.pilar.cendrero@uv.es

[(3)] Estación Biológica de Doñana

0000-0002-1247-7557, pedro.gomez@ebd.csic.es ; 0000-0002-0460-4616, rdiaz@ebd.csic.es

[(4)] Instituto de Óptica

0000-0003-1415-2307, m.g.delrio@csic.es ; 0000-0001-6527-1440, joaquin.campos@csic.es

Resumen: La correcta caracterización espectral y radiométrica de los espectrorradiómetros de campo es fundamental para asegurar la calidad y la trazabilidad de las mediciones utilizadas en las actividades de calibración y validación (Cal/Val) de la misión FLEX-S3. En el proyecto SpaFLEX se han realizado diversas intercomparaciones instrumentales, entre ellas ensayos en condiciones de laboratorio (“*indoor*”) con dos espectrorradiómetros FloX (JB-022 y JB-060), ampliamente utilizados para la observación de la fluorescencia inducida por el Sol en vegetación. El objetivo principal fue evaluar su comportamiento bajo condiciones controladas, identificar posibles diferencias entre instrumentos y comprobar su coherencia respecto a medidas de referencia trazables. La evaluación espectral se llevó a cabo mediante lámparas de descarga en gas a baja presión, que permitieron analizar la exactitud en longitud de onda y detectar posibles desplazamientos en la respuesta espectral. Para la parte radiométrica se empleó una esfera integradora de 1 metro de diámetro como fuente homogénea de radiancia e irradiancia, previamente calibrada con un espectrorradiómetro ASD FieldSpec® 3 con trazabilidad a los patrones nacionales, garantizando así la validez de las mediciones obtenidas. Los resultados permitieron identificar diferencias entre los instrumentos, relacionadas tanto con su respuesta espectral y radiométrica como con aspectos geométricos vinculados al ángulo sólido irradiado. Estas discrepancias son clave para determinar la adecuación de la calibración vigente y, en caso necesario, aplicar acciones correctoras antes de las campañas de campo. La realización de intercomparaciones periódicas refuerza la confianza en los datos obtenidos y contribuye a la armonización de las mediciones de fluorescencia y variables radiométricas en el Plan Español de Cal/Val de FLEX-S3.

Palabras clave: Intercomparación radiométrica, caracterización espectral, trazabilidad metrológica

Indoor Spectral, Radiometric, and Solid Angle Intercomparison of FloX Spectroradiometers within the SpaFLEX Project

***Abstract**: Accurate spectral and radiometric characterization of field spectroradiometers is essential to ensure the quality and traceability of the measurements used in the calibration and validation (Cal/Val) activities of the FLEX-S3 mission. Within the SpaFLEX project, several instrumental intercomparison activities have been conducted, including indoor laboratory tests with two FloX spectroradiometers (JB-022 and JB-060), widely used for observing Sun-induced fluorescence in vegetation. The main objective was to evaluate their performance under*

controlled conditions, identify potential differences between instruments, and assess their coherence with traceable reference measurements. Spectral evaluation was performed using low pressure gas-discharge lamps, which enabled the analysis of wavelength accuracy and the detection of possible shifts in the spectral response. For the radiometric assessment, a 1-meter integrating sphere was used as a uniform source of radiance and irradiance. This sphere had been previously calibrated with an ASD FieldSpec® 3 spectroradiometer traceable to national radiometric standards, ensuring the validity of the measurements obtained. The results allowed us to identify differences between the instruments, related to their spectral and radiometric responses, as well as to geometric factors associated with the irradiated solid angle. These discrepancies are key to determining whether the current calibration is adequate and, if necessary, applying corrective actions before field campaigns. Conducting periodic intercomparisons strengthens confidence in the measurements and contributes to the harmonization of fluorescence and radiometric data within of the Spanish Cal/Val Plan for FLEX-S3.

***Keywords**: Radiometric intercomparison, spectral characterization, metrological traceability*

1. INTRODUCCIÓN

La medición de la fluorescencia inducida por el sol (SIF) se ha consolidado como una herramienta clave para evaluar la actividad fotosintética y el estado fisiológico de la vegetación mediante técnicas de teledetección pasiva. Su relevancia científica se fundamenta en la capacidad de vincular esta magnitud con la monitorización de la dinámica de la biosfera, incluyendo los procesos de intercambio de carbono, lo que abre oportunidades para mejorar la comprensión del cambio climático a través de la observación de la Tierra.

En este contexto, la comunidad científica y la industria están desarrollando instrumentación específica que requiere de muy alta resolución espectral, elevada sensibilidad y baja incertidumbre. Ejemplos representativos de estos sensores son el *Fluorescence Box* (FloX), el *Piccolo Doppio* y el *Chlorophyll Fluorescence Sensor* (cFL) de Headwall Photonics, frecuentemente utilizados en campañas científicas, así como el sistema aeroportado HyPlant (*Hyperspectral Plant Imaging System*), desarrollado como prototipo precursor de la misión FLEX (*Fluorescence Explorer*). Esta misión tiene como finalidad medir la fluorescencia desde el espacio.

La correcta caracterización espectral y radiométrica de esta instrumentación es fundamental para garantizar la calidad y la trazabilidad de las mediciones utilizadas en actividades de calibración y validación (Cal/Val). Existen marcos normativos consolidados, en particular para laboratorios de ensayo y calibración como la ISO/IEC 17025 en el ámbito metrológico (ISO/IEC, 2017), y guías específicas para observación de la Tierra como las recomendaciones del *Quality Assurance Framework for Earth Observation* (QA4EO) dentro de GEOSS (*Global Earth Observation System of Systems*) (QA4EO, 2010). Estas referencias establecen la necesidad de implementar procedimientos sistemáticos de intercomparación para garantizar la trazabilidad de las medidas y la interoperabilidad entre grupos de investigación y equipos técnicos. Iniciativas recientes, como los ensayos de intercomparación dentro de la red NetOPS entre espectrorradiómetros y paneles de referencia (Jiménez *et al*., 2024), evidencian el interés creciente de la comunidad en disponer de protocolos homogéneos y reproducibles.

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar y aplicar un procedimiento de intercomparación espectral y radiométrica entre espectrorradiómetros utilizados para la medición de SIF. El propósito es evaluar la incertidumbre entre sistemas, cuantificar discrepancias y sesgos instrumentales, y establecer una base de trazabilidad metrológica robusta para actividades futuras de Cal/Val asociadas a la medición de SIF. Este trabajo se enmarca en el proyecto SpaFLEX, cuyo objetivo es implementar el protocolo nacional de calibración y validación asociado a la misión FLEX-S3 de la Agencia Espacial Europea, que incluirá el espectrómetro de muy alta resolución FLORIS a bordo del satélite Earth Explorer 8 (Drusch *et al*., 2017; Coppo *et al*., 2017).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Los espectrorradiómetros FloX (JB Hyperspectral, s.f.) presentan una arquitectura óptica diseñada para la adquisición autónoma o remota de ciclos repetitivos de radiancia ascendente y de irradiancia descendente. El sistema integra dos espectrorradiómetros complementarios: uno de amplio rango espectral (*FULL*, 400 nm –1000 nm) con resolución moderada (FWHM $\geq$ 1 nm) y otro específico para fluorescencia (*FLUO*, 650 nm – 800 nm) con muy alta resolución espectral (FWHM $\leq$ 0,3 nm) y elevado rango dinámico (SNR ~ 1000:1). El diseño incorpora un conmutador de fibra que permite alternar las mediciones entre una entrada de fibra óptica desnuda (radiancia) y otra con detector con corrección de coseno (irradiancia). Todos los elementos se alojan en una caja robusta y resistente, lo que permite la observación continua durante largos periodos de tiempo a la intemperie, típicamente instalada en torres de observación sobre zonas de interés.

En el marco del proyecto SpaFLEX participaron dos sistemas FloX: el FloX JB-022 del Laboratorio de Observación de la Tierra de la Universidad de Valencia (LEO-UV) y el FloX JB-060 del Laboratorio de SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana (LAST-EBD). Ambos formaron parte de la intercomparación realizada en marzo de 2025 en el Área de Sistemas de Teledetección del INTA (AST-INTA).

La esfera integradora LabSphere CSTM-USS-4000 (*Custom Uniform Source System – Uniform Source Sphere*), con un diámetro interno de 102 cm, está recubierta de *Spectraflect*©, un material altamente reflectante. La esfera se ilumina mediante un conjunto de lámparas halógenas modelo IHLS-DM-150 (*Internal Halogen Light Sources – Direct Mount*), cada una alimentada por una fuente estabilizada en corriente LPS200 (*Lamp Power Supply*). El sistema dispone de diez lámparas etiquetadas con las letras "A" a "J", que proporcionan una radiación uniforme y estable en el puerto de salida de 20 cm de diámetro (Fig. 1) (Labsphere, s.f.).



Figura 1. Ensayo de intercomparación.

2.1. Intercomparación espectral

Para validar la calibración espectral de los sistemas FloX, tanto en modo radiancia como en irradiancia, se emplearon lámparas de descarga en gas a baja presión (argón, hidrógeno y helio) con picos espectrales bien definidos. Estas proporcionaron referencias distribuidas a lo largo del rango espectral de los espectrorradiómetros FULL y FLUO.

La Ecuación 1 expresa la desviación espectral, d_j. El primer término corresponde al centroide espectral calculado a partir de los niveles digitales nd_i y su longitud de onda asociada λ_i, alrededor de la longitud de onda pico de referencia j, ${\lambda_j}^{REF}$.

El criterio de conformidad establece que d_j debe ser inferior a la incertidumbre expandida estimada, con valores de 0,25 nm para los espectros FLUO y 1,27 nm para los espectros FULL.

$$d_j = \left| \left(\frac{\sum(nd_i \lambda_i)}{\sum nd_i} - {\lambda_j}^{REF} \right) \right| < u \qquad (1)$$

2.2. Intercomparación radiométrica

Para la validación radiométrica en radiancia e irradiancia se empleó la esfera USS-4000 con una configuración de cuatro lámparas ("D", "F", "H" y "J") operando a 6 A.

En las mediciones de radiancia, las fibras ópticas desnudas de los espectrorradiómetros se colocaron alineadas con el centro del puerto de salida de la esfera, a 5 cm del plano de la apertura.

Para las mediciones de irradiancia, se emplearon los detectores con corrección coseno alineados con el centro del puerto a distancias de 30 cm, 50 cm y 70 cm. Estas distancias permiten evaluar el comportamiento radiométrico del sistema en tres niveles de intensidad y bajo tres ángulos sólidos distintos. La relación entre irradiancia y radiancia de la esfera viene dada por la Ecuación 2 (McCluney, 2014), con R=10 cm, que proporciona valores de referencia de 0,31, 0,12 y 0,06 estereorradianes para las respectivas distancias. La Ecuación 3 cuantifica la desviación relativa del ángulo sólido.

$$\Omega_d^{esf} = {E_d}\Big/{L_{esf}} = \frac{\pi}{1 + \left(\frac{d}{R}\right)^2} \qquad (2)$$

$$d_\lambda(\Omega) = \left| 100 \cdot \frac{\Omega_d^{esf}\big|_\lambda - \Omega_d^{esf}\big|_\lambda^{REF}}{\Omega_d^{esf}\big|_\lambda^{REF}} \right| \qquad (3)$$

Para establecer el criterio de conformidad se utilizaron las desviaciones relativas en radiancia e irradiancia según las Ecuaciones 4–5:

$$d_\lambda(L) = \left| 100 \cdot \frac{L_\lambda - {L_\lambda}^{REF}}{{L_\lambda}^{REF}} \right| < u \qquad (4)$$

$$d_\lambda(E) = \left| 100 \cdot \frac{E_\lambda - {E_\lambda}^{REF}}{{E_\lambda}^{REF}} \right| < u \qquad (5)$$

La esfera USS-4000 ("DFHJ") fue calibrada utilizando el espectrorradiómetro ASD FieldSpec® 3 (Malvern Panalytical Ltd., S/N16474) calibrado en octubre de 2024 por el Instituto de Óptica (IO-CSIC), garantizando su trazabilidad a los patrones nacionales en radiancia e irradiancia (Fig. 2) (Malvern Panalytical, s.f.).



Figura 2. Montaje de espectrorradiómetro ASD FieldSpec® 3 midiendo la esfera integradora Labsphere CSTM-USS-4000.

3. RESULTADOS

En la Figura 3 se muestran los resultados de la desviación espectral obtenidos para el FloX JB-022 y el FloX JB-060. En ambos casos, los valores registrados en los canales FLUO y FULL cumplen el criterio de conformidad, al situarse por debajo del valor de la incertidumbre expandida correspondiente, u.

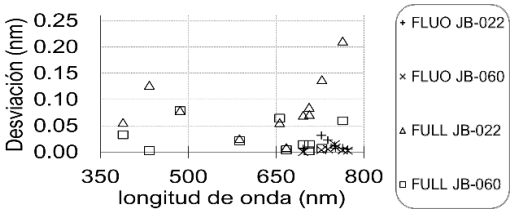


Figura 3. Desviación espectral.

La desviación del ángulo sólido de los espectrorradiómetros para cada instrumento y canal a distintas distancias mostradas en la Tabla 1 fueron muy superiores a lo esperable. De forma coherente con estos resultados, las desviaciones radiométricas resultaron no conformes.

Estos resultados motivaron el envío de los instrumentos al fabricante para su inspección y recalibración, así como la realización de una investigación técnica orientada a

identificar el origen y las posibles causas de la pérdida de calibración. Las acciones correctivas permitieron recuperar las prestaciones de los sistemas y restablecer la confianza en su calibración y trazabilidad, posibilitando su uso posterior en torres de observación y en las campañas de campo programadas en el marco del proyecto SpaFLEX. Además, se prevé repetir el ensayo de intercomparación en 2026 con el fin de validar nuevamente las mediciones de los espectrorradiómetros y verificar la estabilidad de su calibración tras el proceso de reacondicionamiento.

Tabla 1. Desviación relativa del ángulo sólido irradiado para cada espectrorradiómetro y canal a distintas distancias d.

Instrumento	Canal	d 30 cm	d 50 cm	d 70 cm
FLOX JB-060	FLUO	50.1%	36.9%	33.5%
FLOX JB-060	FULL	65.7%	55.7%	53.0%
FLOX JB-022	FLUO	63.7%	62.8%	62.0%
FLOX JB-022	FULL	57.5%	57.0%	54.7%

4. CONCLUSIONES

Las intercomparaciones constituyen un componente esencial para demostrar la coherencia y la trazabilidad de diferentes espectrorradiómetros utilizados en observación de la Tierra. Estos ejercicios permiten identificar discrepancias instrumentales, evaluar incertidumbres y verificar que todos los sistemas remiten a un mismo estándar de referencia.

Los ensayos realizados muestran que los sistemas FloX presentan una buena consistencia espectral, cumpliendo el criterio de conformidad definido para la calibración espectral. Sin embargo, las diferencias observadas tanto en la intercomparación radiométrica como en la desviación del ángulo sólido evidencian variaciones instrumentales relevantes que fueron corregidas antes de las siguientes campañas del proyecto SpaFLEX. En el caso particular de los sistemas FloX, la desviación del ángulo sólido se revela además como un indicador útil para diagnosticar la coherencia entre las entradas de radiancia e irradiancia y el funcionamiento del conmutador de fibra.

Asimismo, los resultados ponen de manifiesto la relevancia de las intercomparaciones periódicas como herramienta indispensable para garantizar la calidad metrológica y la fiabilidad de las mediciones empleadas en actividades de Cal/Val.

5. PERSPECTIVAS FUTURAS

La integración sistemática del análisis del ángulo sólido en futuras campañas de Cal/Val de FLEX-S3 permitirá evaluar la coherencia entre las entradas de fibra y verificar el correcto funcionamiento de los detectores con corrector coseno bajo distintos ángulos sólidos. Asimismo, la repetición del ensayo de intercomparación prevista para 2026 permitirá validar la estabilidad de la calibración de los espectrorradiómetros tras el reacondicionamiento.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España y la Agencia Estatal de Investigación a través del proyecto SpaFLEX (PID2022-137022OB-C31 y PCI2023-145955-2).

El autor Ricardo Díaz-Delgado se encontraba afiliado a Estación Biológica de Doñana durante la realización de este trabajo. Actualmente está adscrito a Agencia Espacial Española. Su dirección de contacto actual es: ricardo.diaz@aee.gob.es

7. REFERENCIAS

International Organization for Standardization. (2017). ISO/IEC 17025:2017 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. https://www.iso.org/standard/66912.html

Quality Assurance Framework for Earth Observation. (2010). QA4EO-QAEO-GEN-DQK-001: A guide to comparisons. http://qa4eo.org

Jiménez, M., Gutiérrez de la Cámara, Ó., Aragonés, D., Peón, J., Muñoz, F., Schmidt, T., Pereira, D., Sánchez, Á., Muñoz, M. J., Cruz, J. A., Talone, M., & Martín, M. P. (2024). Metodología de inter-comparación entre espectrorradiómetros y paneles de referencia. En I. Caballero *et al*. (Eds.), XX Congreso de la Asociación Española de Teledetección (pp. 517–518). Universidad de Cádiz. Disponible en http://www.aet.org.es/?q=congresos

Drusch, M., Moreno, J., Del Bello, U., Franco, R., Goulas, Y., Huth, A., Kraft, S., Middleton, E. M., Miglietta, F., Mohammed, G., & Rascher, U. (2017). The Fluorescence Explorer (FLEX) mission concept—ESA's Earth Explorer 8. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55*(3), 1273–1284. https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2621820

Coppo, P., Taiti, A., Pettinato, L., Francois, M., Taccola, M., & Drusch, M. (2017). Fluorescence Imaging Spectrometer (FLORIS) for ESA FLEX mission. *Remote Sensing, 9*(7), 649. https://doi.org/10.3390/rs9070649

JB Hyperspectral. (s.f.). FloX. https://www.jb-hyperspectral.com/products/flox/

Labsphere. (s.f.). Integrating sphere systems: USS-4000. Recuperado de http://host.web-print-design.com/labsphere/products/integrating_sphere_systems/uss4000.htm

McCluney, R. (2014). Introduction to radiometry and photometry (2.ª ed.). Artech House.

Malvern Panalytical. (s.f.). FieldSpec range – Product support. Recuperado de https://www.malvernpanalytical.com/es/support/product-support/asd-range/fieldspec-range

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.179

Explotación de datos hiperespectrales aeroportados como sensores de oportunidad: captura, procesado y aplicaciones

Alamus, Ramón [1] **Tardà, Anna** [1] **Pipia, Luca** [1] **Perez, Fernado** [1]

[1] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, España

ORCID: Alamus 0000-0003-0292-5640 Tardà 0000-0003-2360-6542 Pipia 0000-0003-0759-4422
Perez 0000-0003-2913-403X

Correspondencia: ramon.alamus@icgc.cat anna.tarda@icgc.cat luca.pipia@icgc.cat fernando.perez@icgc.cat

RESUMEN

Las imágenes hiperespectrales aerotransportadas suelen estar infrautilizadas debido a la complejidad de su procesado y a los costes de adquisición. El Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) ha implementado la captura de datos hiperespectrales VNIR (Visible and Near Infra-Red) y LWIR (Long Wave Infra-Red) como sensores de oportunidad en vuelos LiDAR y fotogramétricos. Desde 2022 se han obtenido amplias coberturas en Catalunya con distintas resoluciones y múltiples revisitas. Estos datos han demostrado un alto potencial en aplicaciones urbanas, forestales y ambientales, y constituyen una base clave para futuras misiones hiperespectrales satelitales como CHIME.

Palabras clave: *hiperespectral, observación de la tierra, aeroportado, VNIR, LWIR*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Explotación de datos hiperespectrales aeroportados como sensores de oportunidad: captura, procesado y aplicaciones

Alamus, Ramón [(1)], Tardà, Anna [(1)], Pipia, Luca [(1)], Perez, Fernado [(1)]

[(1)] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, España.

0000-0003-0292-5640, ramon.alamus@icgc.cat ; 0000-0003-2360-6542, anna.tarda@icgc.cat.

0000-0003-0759-4422, luca.pipia@icgc.cat ; 0000-0003-2913-403X, fernando.perez@icgc.cat.

Resumen: Las imágenes hiperespectrales aerotransportadas suelen estar infrautilizadas debido a la complejidad de su procesado y a los costes de adquisición. El *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC) ha implementado la captura de datos hiperespectrales VNIR (*Visible and Near Infra-Red*) y LWIR (*Long Wave Infra-Red*) como sensores de oportunidad en vuelos LiDAR y fotogramétricos. Desde 2022 se han obtenido amplias coberturas en Catalunya con distintas resoluciones y múltiples revisitas. Estos datos han demostrado un alto potencial en aplicaciones urbanas, forestales y ambientales, y constituyen una base clave para futuras misiones hiperespectrales satelitales como CHIME.

Palabras clave: hiperespectral, observación de la tierra, aerotransportado, VNIR, LWIR

Exploitation of airborne hyperspectral data as opportunity sensors: capture, processing and applications

***Abstract**: Airborne hyperspectral imagery is often underutilized due to the complexity of its processing and acquisition costs. The* Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya *(ICGC) has implemented the capture of VNIR (*Visible and Near Infra-Red*) and LWIR (*Long Wave Infra-*Red) hyperspectral data as opportunity sensors on LiDAR and photogrammetric flights. Since 2022, extensive coverage has been acquired across Catalonia at varying resolutions and with multiple revisits. This data has demonstrated strong potential for urban, forestry, and environmental applications, and constitute a key foundation for future satellite hyperspectral missions such as CHIME.*

***Keywords**: hyperspectral, Earth observation, airborne, VNIR, LWIR*

1. INTRODUCCIÓN

Las capacidades de las imágenes hiperespectrales aerotransportadas a menudo no son utilizadas en todo su potencial, ya sea por la complejidad en el tratamiento de los datos, la falta de viabilidad económica en la captura y procesado o la disponibilidad de equipos y aeronaves, estas últimas ocupadas en proyectos fotogramétricos de más prioridad.

El *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC) dispone de varios sensores hiperespectrales aerotransportados; dos AISA Eagle II en el rango espectral VNIR (Visible and Near Infra-Red) y un TASI (Thermal Airborne Spectrographic Imager) en LWIR (Long Wave Infra-Red) (Fig. 1.). El Instituto acumula una larga trayectoria de operaciones con sensores hiperespectrales aerotransportados en diversas aplicaciones (Pipia *et al*., 2010; Tardà *et al*. 2011; Pérez-Aragüés *et al*. 2013; Nadal *et al*. 2017; Alamús *et al*., 2017, 2018).

El AISA Eagle II es un sensor hiperespectral VNIR de barrido (*pushbroom*) con un campo de visión (FOV) de 38º, fabricado por SPECIM (SPECIM, s.f.). Adquiere hasta 1024 píxeles en la dimensión espacial y puede configurarse para adquirir un máximo de 260 bandas simultáneas en el dominio espectral (rango espectral de 400–1000 nm).

El TASI de ITRES© (Itres© Company, s.f.) es también un sensor hiperespectral de barrido con un FOV de 40º que opera en la región espectral del infrarrojo térmico (TIR). Adquiere 600 píxeles espaciales y, nominalmente, 32 bandas espectrales para proporcionar una cobertura continua en el rango de longitudes de onda 8–11,5 µm.

Las principales características de estos instrumentos están recogidas en la Tabla 1.

Estos instrumentos se han instalado, en diferentes configuraciones, en los dos aviones de la flota del ICGC y se han operado como sensores de oportunidad. Por oportunidad, entenderemos que, en el marco de otros proyectos, los sensores hiperespectrales son operados simultáneamente a los sensores prioritarios utilizando las ventanas fotogramétricas del avión que quedan libres.

Tabla 1. Principales características de los sensores hiperespectrales del ICGC.

	AISA	TASI
FOV[º]	38	40
No. píxeles en FOV	512 / 1024	600
Rango espectral [µm]	0,4-1,0	8,0-11,5
No. bandas	Conf. 260	32
GSD [m] @ 2500 m	1,7	3,0

A modo de ejemplo, en vuelos de cobertura LiDAR se han operado un sensor AISA junto con el TASI, o en vuelos de cobertura de ortofotografía un sensor AISA.

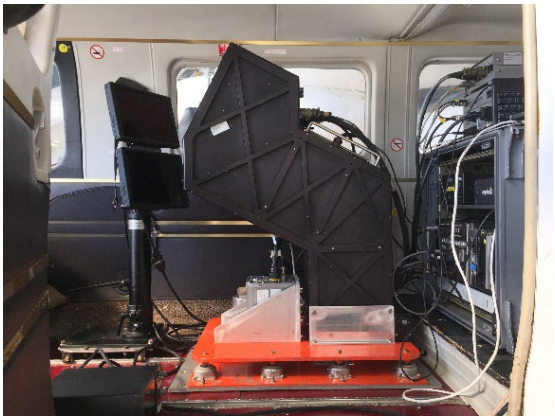


Figura 1. Imagen de los sensores hiperespectrales AISA y TASI, instalados para su operativa.

Así se obtienen coberturas hiperespectrales, reduciendo los costes de vuelo, pero en un entorno condicionado a la configuración de proyecto del sensor principal (época de captura u orientación de las pasadas, por ejemplo). Este hecho a veces implica que el vuelo no ofrezca condiciones óptimas para las configuraciones hiperespectrales. A modo de ejemplo, parámetros como:

- *el tamaño de píxel o GSD* (Ground Sampling Distance), queda determinado por la altura de vuelo requerida por el sensor principal
- *la orientación de las pasadas*, típicamente de este a oeste en vuelos fotogramétricos no es siempre la mejor para configuraciones de sensor *pushbroom*, sonde se prefiere volar con el Sol en la cola
- *la elevación solar*. Los vuelos LiDAR, al ser éste un sensor activo, se pueden ejecutar en rangos temporales que incluyan elevaciones solares por debajo de 30º.
- *la época de vuelo.* Los vuelos de cobertura suelen realizarse en un marco temporal relativamente amplio, mayor del deseado para, por ejemplo, estudiar procesos fenológicos concretos.

Aun así, estos vuelos de oportunidad permiten capturar coberturas amplias del terreno de muy alta resolución espectral que raramente se llevarían a cabo como un proyecto específico.

2. REQUERIMIENTOS Y CAPTURA DE DATOS

Los datos hiperespectrales captados serán procesados y archivados para ulterior proceso hasta niveles L1C y L2A. El nivel L1C, ortoimagen de radiancias captada por el sensor, corresponde a la corrección radiométrica, a partir de la calibración de laboratorio, y corrección geométrica, la cual se ha realizado a partir de un DSM y teniendo en cuenta la detección de oclusiones, con objeto de mantener la mayor fidelidad geométrica en cubiertas en altura (tejados) y copas de árboles. El nivel L2A corresponde al mismo producto más la corrección atmosférica añadida y la magnitud calculada es la reflectancia o emisividad, según el caso. En los sensores VNIR, se realiza una estimación *in-scene* de aerosoles seleccionando píxeles de vegetación densa y del contenido de vapor de agua columnar aplicando el modelo ADPA (Schläpfer, 1998), a partir de una *look-up table* atmosférica generada mediante simulaciones atmosférica de ModTran5.0 (Berk *et al*., 2005). En el caso LWIR, se aplica el algoritmo TES (Temperature and Emissivity Separation) (Gillespie A.R, 1998) a partir de perfiles atmosféricos NCEP (National Centers for Environmental Prediction), teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas superficiales extraídas de la red de estaciones meteorológicas XEMA (Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques) disponibles. Las pasadas así procesadas se almacenan en formato Geotiff junto con sus metadatos auxiliares en una base de datos.

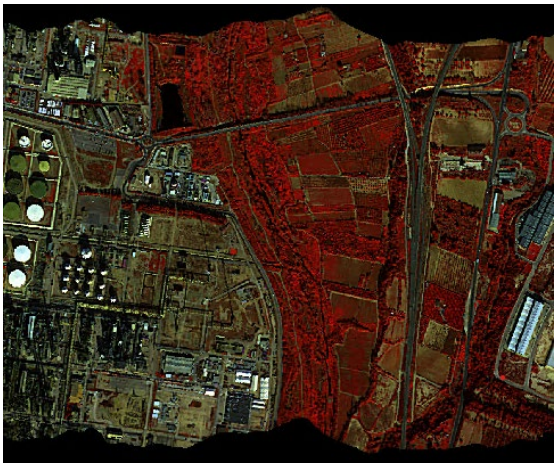


Figura 2. Imagen AISA, 1,5 m, 260 bandas, nivel de proceso L2A, previa al mosaico general de Cataluña (Provincia de Tarragona).

Hasta la fecha se han captado más de 1500 de pasadas (alrededor de 3000 imágenes entre productos L1C i L2A), principalmente a resoluciones espaciales de 1,5 m y 3,5 m, cubriendo gran parte de Cataluña desde 2022 hasta el presente (Fig. 3.). Algunas zonas han sido revisitadas en diversas ocasiones, y también se han captado zonas de menor extensión a diferentes resoluciones para proyectos específicos.



Figura *3*. Recubrimiento actual de imágenes hiperespectrales (AISA y TASI) desde 2022 a la actualidad en Cataluña.

En el caso VNIR se dispone de datos con 260 bandas espectrales en el rango de 400 a 1000 nm, tanto en resoluciones de 1,5 como 3,5 m todos con niveles de procesado L1C, en radiancias, y L2A, en reflectancias (Fig. 2.).

En LWIR se dispone de datos con 32 bandas espectrales en el rango de 8,0 a 11,5 µm en resoluciones de 1,5 m. En este caso los productos L1C continúan siendo radiancias mientras que el producto L2A contiene emisividades y temperatura superficial.

3. APLICACIONES Y VALOR AÑADIDO

Los usos de estos datos generados desde el ICGC han sido múltiples. Los datos hiperespectrales VNIR y LWIR (reflectancias y emisividades respectivamente) captados simultáneamente a los datos LiDAR se han empleado para inventariar cubiertas en altura candidatas a contener fibrocementos que pueden contener amianto. La Figura 5 muestra el visor de cubiertas de fibrocementos en Cataluña elaborado partiendo de los datos hiperespectrales, suplementados con otros cuando no ha sido factible disponer de los mismos. En una muestra de control, del 8,5% de Cataluña, heterogénea y aleatoria se ha realizado una supervisión por fotointerpretación mostrando que el nivel de acierto es del 89.5%.

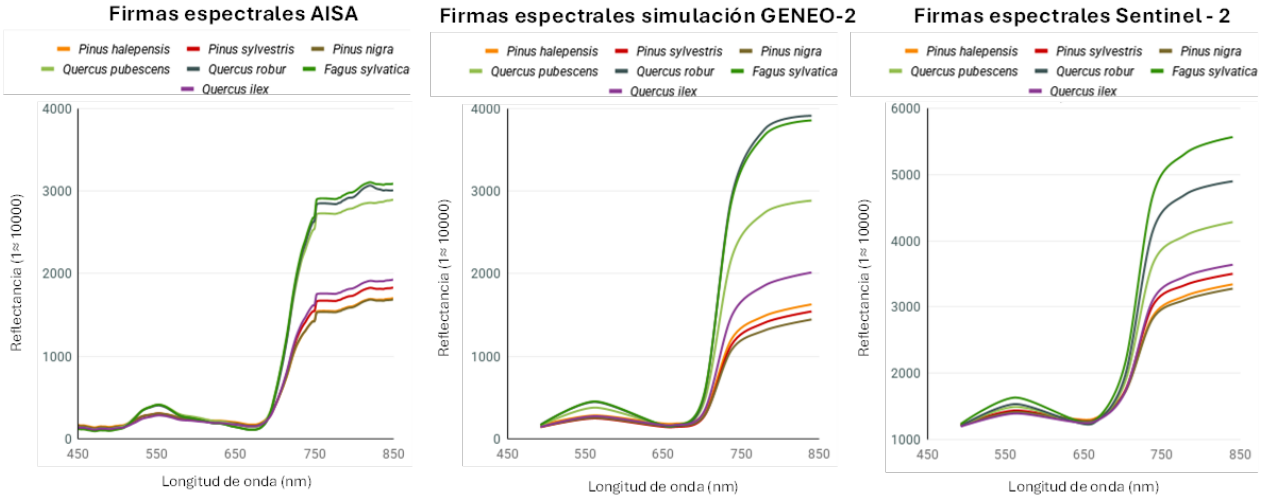


Figura 4. Firmas espectrales de las masas forestales según sensores: hiperespectral AISA, simulaciones futura misión GENEO-02 y Sentinel-2.

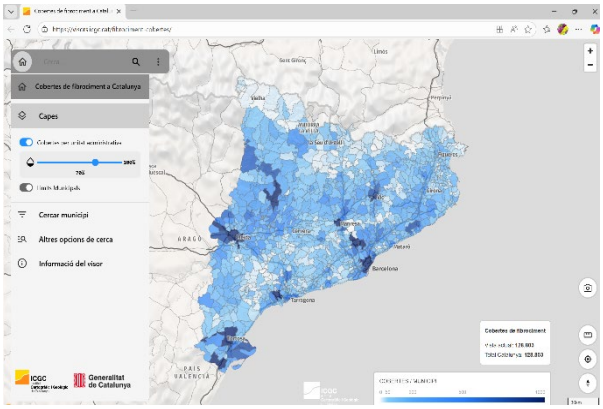


Figura 5. Imagen del portal de consulta de cubiertas en altura de fibrocemento en Cataluña (https://visors.icgc.cat/fibrociment-cobertes/).

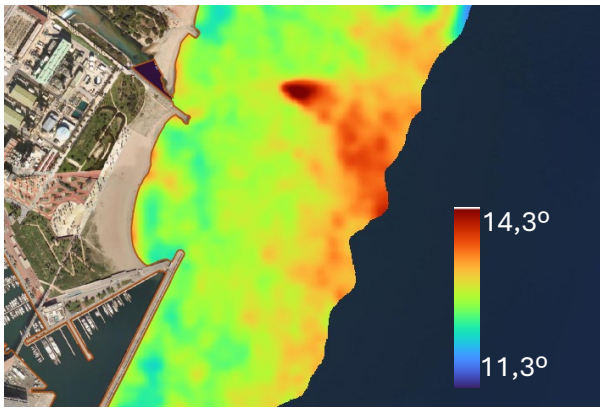


Figura 6. Anomalía térmica en el emisario del Besos, Barcelona.

Cabe añadir también que los datos hiperespectrales VNIR han sido muy adecuados para el análisis en la mejora de la identificación de masas forestales con bandas *Red-Edge* de alta resolución simulando datos del futuro sistema satelital GENEO-02 (estrategia Cataluña Espacio 2030), permitiendo analizar sus potenciales prestaciones y en casos de uso elaborados por el ICGC (Fig. 4.).

En la actualidad, un trabajo en curso analiza la detección de surgencias de agua dulce en zonas de costa a partir de imágenes térmicas (Fig. 6.)

Los datos hiperespectrales VNIR y LWIR aportan un valor añadido clave frente a los multiespectrales y bolométricos porque proporcionan firmas espectrales continuas y de alta resolución que permiten identificar materiales y estados biofísicos con precisión química, separar correctamente temperatura y emisividad en el rango térmico, caracterizar minerales y vegetación de forma específica, y obtener parámetros físicos cuantitativos con menor incertidumbre; en cambio, los multiespectrales ofrecen solo información general con bandas anchas y los bolométricos integran la radiación sin capacidad de distinguir composición ni propiedades superficiales.

4. VALORACIONES FINALES

En el contexto actual y futuro, los datos hiperespectrales abren nuevas oportunidades a las aplicaciones de observación de la Tierra para estudiar con mayor precisión el comportamiento de los materiales en las zonas urbanas, las diferencias espectrales de la vegetación en los bosques y en la agricultura, como se ha venido demostrando en los trabajos realizados en el ICGC.

Hay que destacar que estos estudios hiperespectrales con sensores aerotransportados sirven y servirán de experiencia acumulada (generación de modelos de transformación de los datos en variables biofísicas o índices o selección de bandas espectrales, entre otras) para los futuros proyectos hiperespectrales satelitales como la misión CHIME de la Agencia Espacial Europea para los años 2028-2030.

Por último, el acceso a los datos hiperespectrales presentados en esta contribución será gestionado por el ICGC bajo petición de los interesados.

5. AGRADECIMIENTOS

A la estrategia Cataluña Espacio 2030, por darnos la posibilidad de acceder a las prestaciones radiométricas y geométricas de la carga útil principal y poder simular así imágenes GENEO_02 con el sensor AISA.

Al Máster en Geoinformación de la Universidad Autónoma de Barcelona, por el proyecto de final de máster conjunto que permitió estudiar y comparar las masas forestales en diferentes configuraciones de sensores espectrales, y el proyecto de detección de surgencias.

6. REFERENCIAS

Alamús, R., Barà, S., Corbers, J., Escolet, J., Palà, V., Pipia, L., Tardà, A. (2017): Ground-based hyperspectral analysis of the urban nightscape. ISPRS. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 124, 16-26.

Alamús, R., Pérez, F., Pipia, L., and Corbera, J. (2018): Urban sustainable ecosystems assessment through airborne earth observation: lessons learned, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-1, 5–10, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-5-2018.

Berk, A. *et al*. (2005). MODTRAN 5: A reformulated Atmospheric Band Model with Auxiliary Species and Practical Multiple Scattering Options: Update, Proceedings of the SPIE, Vol. 5806, pp.662-667.

Chávez, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, 24, 459–479.

Schläpfer, D., Borel, C. C., Keller, J., & Itten, K. I. (1998). Atmospheric precorrected differential absorption technique to retrieve columnar water vapor. Remote Sensing of Environment, 65(3), 353-366.

Gillespie, A. R., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothern, J. S., Hook, S. J., & Kahle, A. B. (1998) "A Temperature and Emissivity Separation Algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)" IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(4), 1113–1126

Itres© Company: https://www.itres.com/

Nadal, A., Alamús, R., Pipia, L., Ruiz, A., Corbera, J., Cuerva, E., Rieradevall, J., Josa, A. (2017): Urban planning and agricultura: Methodology for assessing the rooftop greenhouse potential of non-residential areas using airborne sensors. Science of the Total Environment, vol. 601-602, 493-507. Ed. Elsevier.

Pérez-Aragüés, F., Tardà, A., Alamús, R., Moré, G., Cea, C., Palà, V., Corbera, J., Pons, X. (2013): Intercalibración de sensores AISA y CASI. XV Congreso de la AET. Madrid.

Pipia, L., Pérez, F., Tardà, A., Martínez, L., Palà, V., Arbiol, R. (2010): Thermal Airborne Spectrographic Imager for Temperature and Emissivity Retrieval. 3rd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing (RAQRS III). Torrent.

SPECIM: https://www.specim.com/

Tardà, A., Palà, P., Arbiol, R., Pérez, F., Viñas, O., Pipia, L., Martínez, L. (2011): Detección de la iluminación exterior urbana nocturna con el sensor aerotransportado CASI 550. 9a Setmana Geomàtica Internacional. Barcelona.

Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (XEMA): https://www.meteo.cat/observacions/xema/

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.180

Clasificación Avanzada de Nube de Puntos LiDAR con Inteligencia Artificial: el caso práctico de Extremadura

Redondo, Alejandro [1] **Becerra, Javier** [1] **García, Aurelio** [1] **Ruiz, Luis Ángel** [2] **Crespo, Pablo** [2] **Carbonell-Rivera, Juan Pedro** [2]

[1] COTESA, España

[2] UPV

ORCID: Redondo 0000-0002-2392-3583 Becerra 0009-0004-5253-3746 Ruiz 0000-0003-0073-7259 Crespo 0000-0003-2241-4493 Carbonell-Rivera 0000-0002-6724-6780

Correspondencia: alejandroredondo@grupotecopy.es javierbecerra@grupotecopy.es aureliogarcia@grupotecopy.es laruiz@cgf.upv.es pabcrepe@cgf.upv.es jp.carbonellrivera@ubc.ca

RESUMEN

La tercera cobertura del PNOA-LiDAR proporciona nubes de puntos de alta densidad que permiten mejorar la clasificación por usos y coberturas del suelo del territorio. Este trabajo presenta un enfoque híbrido para la clasificación de nubes de puntos LiDAR, basado en la combinación de técnicas de Deep Learning (DL) y postprocesado, aplicado a datos de Extremadura. El método emplea un modelo de DL entrenado sobre un conjunto de datos representativo y un proceso posterior de refinamiento mediante técnicas de Machine Learning y análisis espacial. La evaluación, realizada mediante un conjunto de datos independiente, alcanza una exactitud global del 88,2 % y muestra mejoras tras el postprocesado, especialmente en vegetación baja y en infraestructuras lineales como carreteras, ferrocarril y puentes. El enfoque propuesto es iterativo y escalable, lo que facilita su aplicación en ámbitos territoriales extensos.

Palabras clave: *LiDAR, Deep Learning, Machine Learning, Clasificación LiDAR*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Clasificación Avanzada de Nube de Puntos LiDAR con Inteligencia Artificial: el caso práctico de Extremadura

Redondo, Alejandro [(1)], Becerra, Javier [(1)], García, Aurelio [(1)], Ruiz, Luis Ángel [(2)], Crespo, Pablo [(2)], Carbonell-Rivera, Juan Pedro [(2)]

[(1)] COTESA, España.

0000-0002-2392-3583, alejandroredondo@grupotecopy.es

0009-0004-5253-3746, javierbecerra@grupotecopy.es ; aureliogarcia@grupotecopy.es

[(2)] UPV

0000-0003-0073-7259, laruiz@cgf.upv.es ; 0000-0003-2241-4493, pabcrepe@cgf.upv.es

0000-0002-6724-6780, jp.carbonellrivera@ubc.ca

Resumen: La tercera cobertura del PNOA-LiDAR proporciona nubes de puntos de alta densidad que permiten mejorar la clasificación por usos y coberturas del suelo del territorio. Este trabajo presenta un enfoque híbrido para la clasificación de nubes de puntos LiDAR, basado en la combinación de técnicas de Deep Learning (DL) y postprocesado, aplicado a datos de Extremadura. El método emplea un modelo de DL entrenado sobre un conjunto de datos representativo y un proceso posterior de refinamiento mediante técnicas de Machine Learning y análisis espacial. La evaluación, realizada mediante un conjunto de datos independiente, alcanza una exactitud global del 88,2 % y muestra mejoras tras el postprocesado, especialmente en vegetación baja y en infraestructuras lineales como carreteras, ferrocarril y puentes. El enfoque propuesto es iterativo y escalable, lo que facilita su aplicación en ámbitos territoriales extensos.

Palabras clave: LiDAR, *Deep Learning*, *Machine Learning, Clasificación LiDAR*

Advanced Classification of LiDAR Point Clouds with Artificial Intelligence: the case study of Extremadura

Abstract: *The third coverage of the PNOA-LiDAR provides high-density point clouds that enable improved classification of land use and land cover in the territory. This paper presents a hybrid approach to LiDAR point cloud classification, based on a combination of deep learning (DL) and post-processing techniques, applied to data from Extremadura. The method uses a DL model trained on a representative dataset and a subsequent refinement process using machine learning techniques and spatial analysis. The evaluation, carried out using an independent dataset, achieves an overall accuracy of 88.2% and shows improvements after post-processing, especially in low vegetation and linear infrastructure such as roads, railways and bridges. The proposed approach is iterative and scalable, facilitating its application in large territorial areas.*

Keywords*: LiDAR, Deep Learning, Machine Learning, LiDAR Classification*

1. INTRODUCCIÓN

La clasificación automática de nubes de puntos LiDAR es un proceso fundamental para la generación de productos cartográficos y modelos digitales de alta calidad, utilizados en numerosos ámbitos de la gestión territorial y ambiental. El creciente volumen y densidad de los datos LiDAR (*Light Detection and Ranging*) adquiridos mediante sensores aerotransportados hace inviable su tratamiento manual, lo que ha impulsado el desarrollo de metodologías automáticas capaces de garantizar resultados precisos, homogéneos y escalables a grandes extensiones.

En este contexto, la clasificación de nubes de puntos ha sido abordada tradicionalmente mediante enfoques basados en reglas heurísticas y algoritmos geométricos, ampliamente implementados en software comercial como *TerraScan* (Montero-Calvo *et al*., 2025), así como en herramientas de código abierto. Más recientemente, se han propuesto metodologías basadas en aprendizaje automático y redes neuronales profundas, incluyendo arquitecturas como PointNet (Kowalczuk & Szymański, 2019), PointNet++ (Fan *et al*., 2023) o KPConv (Thomas *et al*., 2019), que han demostrado un alto potencial para capturar patrones complejos en datos tridimensionales. No obstante, estas aproximaciones presentan todavía limitaciones cuando se aplican de forma operativa a grandes volúmenes de datos heterogéneos, especialmente en escenarios nacionales, donde la variabilidad del territorio, la diversidad de coberturas y la

necesidad de cumplir especificaciones técnicas estrictas suponen un reto adicional. En el ámbito institucional, existen experiencias previas de clasificación LiDAR con distintos grados de automatización y edición manual en algunas comunidades autónomas, como Aragón, Comunidad Valenciana o Navarra, si bien dichas soluciones no siempre son directamente transferibles ni escalables a un marco estatal homogéneo.

Este trabajo se enmarca en la tercera cobertura del PNOA-LiDAR **(**https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar/tercera-cobertura**)**, que proporciona nubes de puntos con coordenadas X, Y y Z obtenidas a partir de adquisiciones aéreas sobre el territorio nacional. Iniciada parcialmente en 2012 y extendida al conjunto del Estado a partir de 2023, esta cobertura supone un avance significativo respecto a campañas anteriores, al ofrecer una densidad homogénea de 5 puntos·m^{-2}, frente a los valores de 0,5 a 2 puntos·m^{-2} de la segunda cobertura.

En este marco, el objetivo principal del trabajo es la particularización de las especificaciones técnicas del proceso de datos del PNOA-LiDAR de tercera cobertura para la clasificación automática de la nube de puntos mediante técnicas de Inteligencia Artificial. De forma específica, se persigue la generación de ficheros LAS/LAZ versión 1.4 (v8) completamente clasificados, exigiendo un F-Score general superior a 0,90, un F-Score superior a 0,98 en la clasificación básica —con umbrales específicos para suelo, vegetación, edificaciones y puentes— y un F-Score superior a 0,85 en la clasificación avanzada, asegurando así la precisión, consistencia y validez operativa de los resultados obtenidos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de Estudio

La zona de estudio seleccionada para el desarrollo del proyecto es la Comunidad Autónoma de Extremadura. Este ámbito territorial comprende un total de 20.889 hojas LiDAR de 1 × 1 km, distribuidas de manera heterogénea a lo largo de la región. La selección de dichas hojas ha sido determinada por la dirección técnica del Instituto Geográfico Nacional (IGN), atendiendo a información cartográfica complementaria, lo que explica la disposición espacial observada en el conjunto de datos analizados.

El enfoque propuesto para la clasificación automática de la nube de puntos LiDAR se estructura en dos fases principales, concebidas como un proceso secuencial y complementario. En una primera fase, se emplea un modelo basado en *Deep Learning* (DL) para realizar una clasificación inicial de la nube de puntos. Posteriormente, los resultados obtenidos son refinados mediante una fase de postprocesado, en la que se combinan reglas heurísticas y técnicas de *Machine Learning* (ML) con el objetivo de mejorar la coherencia espacial y la fiabilidad global de la clasificación.

Este planteamiento híbrido permite aprovechar la capacidad de generalización de los modelos de aprendizaje profundo junto con mecanismos adicionales de ajuste que contribuyen a reducir errores residuales y a adaptar los resultados a las características específicas de los datos y del ámbito de aplicación.

2.2. Conjunto de datos

El conjunto de datos empleado para el entrenamiento y evaluación del modelo de *Deep Learning* está compuesto por nubes de puntos LiDAR de la tercera cobertura del PNOA-LiDAR, etiquetadas conforme a una adaptación del estándar ASPRS. Las clases consideradas están representadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Clases consideradas.

Código ASPRS	Nombre de la clase	Código ASPRS	Nombre de la clase
1	Fondo / Otros	11	Carreteras
2	Suelo	17	Puentes
3	Vegetación baja	68	Vehículos
4	Vegetación media	15	Torres eléctricas
5	Vegetación alta	14	Cables eléctricos
6	Edificios	64	Aerogeneradores
9	Agua	67	Placas solares
10	Ferrocarril	203	Ruido

Con el fin de garantizar una adecuada representatividad espacial y temática, el *dataset* se ha construido a partir de aproximadamente 10.000 teselas de 50 × 50 metros, distribuidas por el conjunto del territorio de Extremadura. La selección de dichas teselas se ha realizado mediante un proceso de estratificación, teniendo en cuenta diferentes indicadores de heterogeneidad derivados de capas cartográficas y temáticas proporcionadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), por ejemplo: BTN, RT y LiDAR segunda cobertura. Este enfoque permite capturar la variabilidad espacial y estructural de los distintos elementos asociados a cada clase, así como sus particularidades geométricas y contextuales. De esta manera, se maximizan los puntos de las clases minoritarias en área y ocurrencia (por ejemplo: los aerogeneradores en Extremadura) permitiendo una distribución de puntos más equilibrada.

El proceso de etiquetado de los datos se ha llevado a cabo mediante una estrategia semiautomática, combinando técnicas automáticas de clasificación de nube de puntos inicial mediante GeoSAM (Sultan *et al*., 2025) con una fase posterior de revisión y refinado manual. Este procedimiento permite alcanzar un equilibrio entre eficiencia en la generación de etiquetas y calidad en la anotación final, especialmente relevante en escenarios complejos o con alta densidad de elementos.

Adicionalmente, con el objetivo de mejorar la capacidad de generalización del modelo y aumentar la robustez frente a variaciones espaciales y geométricas, se ha aplicado una estrategia de aumento de datos (*data augmentation*) durante el entrenamiento. Dicho aumento se realiza de forma dinámica y en tiempo de ejecución, sin generar nuevos ficheros persistentes, e incluye transformaciones espaciales y estructurales tales como

rotaciones, traslaciones, reflejos, deformaciones geométricas y modificaciones controladas en la densidad de puntos. Este enfoque contribuye a enriquecer el espacio de aprendizaje del modelo sin incrementar el volumen almacenado del *dataset*.

2.3. Preprocesado de datos

Como parte del preprocesado de los datos, se llevó a cabo un estudio exhaustivo de los predictores empleados en los modelos de clasificación. En particular, se analizó la distribución estadística de las variables espectrales y geométricas disponibles —incluyendo los canales R, G y B, el canal NIR, la coordenada altimétrica (Z) y la intensidad del retorno— mediante el estudio de sus histogramas y estadísticas descriptivas, con el fin de evaluar la capacidad de separabilidad de cada predictor entre las distintas clases temáticas. Previamente a su uso en el modelo, todas las variables fueron normalizadas a un rango común [0,1], lo que permitió homogeneizar las escalas, mejorar la estabilidad numérica del entrenamiento y facilitar la comparación relativa entre predictores. Este análisis se integró en un proceso iterativo de ajuste del modelo y de definición de tareas de postprocesado orientadas a mejorar la coherencia y precisión de la clasificación final.

2.4. Modelo DL - KPConv

Para la clasificación de la nube de puntos se adoptó un modelo basado en convoluciones sobre puntos, concretamente una arquitectura inspirada en KPConv (*Kernel Point Convolution*). Este tipo de modelos está especialmente diseñado para trabajar directamente con geometría no estructurada, evitando la necesidad de rasterización o voxelización previa de los datos.

El modelo se basa en una arquitectura de convolución específicamente diseñada para operar directamente sobre nubes de puntos, donde las convoluciones se definen en el espacio tridimensional a partir de conjuntos locales de puntos (*kernel points*). Este enfoque permite capturar de forma eficaz la geometría local y su contexto espacial, adaptándose a la irregularidad inherente de los datos LiDAR. En este trabajo, la configuración del modelo se ha centrado en un reducido conjunto de hiperparámetros considerados clave para su comportamiento, como el tamaño y el radio de los kernels de convolución, que determinan el nivel de detalle geométrico capturado, así como las estrategias de muestreo y reducción de resolución empleadas a lo largo de la red. Adicionalmente, el proceso de entrenamiento se ha ajustado mediante parámetros globales como la tasa de aprendizaje y el número máximo de épocas, combinados con criterios de parada temprana, con el objetivo de garantizar una convergencia estable y un buen equilibrio entre precisión y eficiencia computacional.

2.5. Postprocesado

El postprocesado tiene como objetivo refinar y completar la clasificación inicial obtenida por el modelo de DL, incorporando información adicional derivada del análisis geométrico y espacial de la nube de puntos extraída mediante el software CloudCompare v2.13.2. Esta etapa se apoya en un conjunto de variables descriptoras calculadas a partir del vecindario local de cada punto, ampliamente utilizadas en el análisis de nubes de puntos tridimensionales.

Entre las variables consideradas se incluyen vectores normales, descriptores basados en análisis de componentes principales (PCA) —como valores propios y métricas derivadas—, así como indicadores de dispersión, anisotropía, planaridad, linealidad, esfericidad y verticalidad. Asimismo, se emplean descriptores relacionados con la rugosidad y curvatura de la superficie, medidas de densidad local y variables geométricas asociadas a la distribución espacial de los puntos. Estas características permiten caracterizar de forma más precisa la estructura local de los distintos elementos del territorio desde un punto de vista complementario al modelo de DL.

A partir de dichas variables, se aplicó una estrategia de decisión basada en modelos y reglas, diseñada para actuar de manera selectiva sobre determinadas clases. Este proceso combina árboles de decisión y operaciones de suavizado espacial, manteniendo sin modificación aquellas clases que presentan un alto grado de confianza en la clasificación inicial y centrando el refinamiento en clases con mayor complejidad geométrica o menor coherencia espacial.

2.6. Metodología de Evaluación

La evaluación del enfoque propuesto se realizó sobre un conjunto de datos independiente del entrenamiento, compuesto por 2.000 muestras distribuidas homogéneamente por el territorio de Extremadura y seleccionadas para garantizar la representación de todas las clases temáticas consideradas. La validación combinó un análisis cuantitativo, basado en métricas estándar de clasificación ampliamente utilizadas en el ámbito LiDAR —incluyendo la matriz de confusión, la precisión, el *recall*, la exactitud global (*accuracy*) y el F1-score—, con un análisis cualitativo orientado a la inspección visual y a la coherencia espacial de los resultados. Este análisis cualitativo fue llevado a cabo por personal experto mediante áreas no vistas durante el entrenamiento, permitiendo evaluar la capacidad de generalización del modelo y detectar posibles inconsistencias espaciales. Adicionalmente, los resultados fueron sometidos a un proceso de validación independiente por parte del Instituto Geográfico Nacional, realizado sobre áreas distintas a las empleadas en la evaluación interna y no conocidas por los autores, reforzando así la robustez y generalización del enfoque propuesto.

3. RESULTADOS

Los resultados cuantitativos se presentan de forma resumida en una tabla comparativa (Tabla 2), en la que se contrastan las métricas obtenidas directamente tras la fase de DL con aquellas resultantes tras la aplicación de la fase de postprocesado. El análisis de dicha tabla pone de manifiesto una mejora consistente de las métricas al incorporar los algoritmos de refinamiento, lo que confirma la aportación positiva del enfoque híbrido propuesto, obteniendo una Precisión global del 88,2 %.

Tabla 2. Rendimiento global de la clasificación. La Precisión, Recall y F-Score son los rendimientos obtenidos después de aplicar el postprocesado, y Dif. DL es la diferencia entre antes y después del postprocesado.

Clase	Precision final (%)	Recall (%)	F1-score (%)	Dif. DL / Postproc (%)
Suelo	87,1	95,6	91,2	+0,4
Vegetación baja	67,0	33,4	44,5	+10,7
Vegetación media	82,9	91,5	87,0	−0,1
Vegetación alta	99,2	95,0	97,0	−0,4
Edificios	96,7	96,6	96,7	−0,2
Agua	98,1	91,2	94,5	−2,1
Ferrocarril	79,3	87,0	83,0	+3,5
Carreteras	81,5	82,6	82,0	+2,3
Puentes	97,1	87,1	91,8	+4,2
Vehículos	96,8	78,8	86,9	0,0
Torres eléctricas	86,5	79,1	82,7	0,0
Cables eléctricos	94,1	92,1	93,1	0,0
Aerogeneradores	100,0	88,9	94,1	0,0
Placas solares	92,6	83,5	87,8	+0,7

Finalmente, el análisis visual de los resultados se complementa con ejemplos gráficos representativos (Figura 1). En particular, se observa una mejora notable en la uniformidad de la clase de vegetación baja, cuya discriminación respecto al suelo presenta una mayor subjetividad, sobre todo en zonas donde la vegetación baja está muy apelmazada al suelo. Asimismo, en las clases asociadas a infraestructuras lineales, como carreteras y ferrocarril, el postprocesado contribuye a una mayor continuidad espacial y reducción de fragmentaciones, lo que redunda en resultados más coherentes desde el punto de vista cartográfico y operativo.

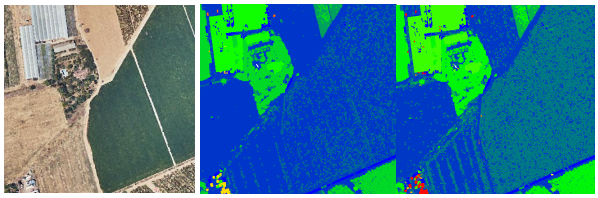


Figura 1. Ejemplos de resultados. Imagen en RGB (izqu.), resultados de DL (centro) y resultados finales tras postprocesado (dcha.). Leyenda: suelo (azul), edificios (verde claro), vegetación (verde oscuro).

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto permite extraer conclusiones relevantes tanto sobre el uso de DL como sobre la aportación del postprocesado en la clasificación de nubes de puntos LiDAR. Los resultados ponen de manifiesto la importancia de disponer de un conjunto de datos bien distribuido espacial y temáticamente, ya que una adecuada representatividad del territorio permite entrenar modelos de DL con un alto nivel de desempeño utilizando un volumen de muestras contenido. Este enfoque facilita un proceso de entrenamiento iterativo e incremental, reduciendo los tiempos de etiquetado y permitiendo la incorporación progresiva de nuevas muestras en aquellas clases o zonas donde se detectan limitaciones. Asimismo, este flujo de trabajo presenta un alto potencial de escalabilidad, se pueden ampliar las clases en la clasificación, y es operacional, se puede aplicar al resto de España en un tiempo de máquina razonable (2 minutos por hoja de 1×1 km).

En cuanto al postprocesado, este actúa como una etapa complementaria orientada a refinar la clasificación inicial del modelo de DL. Si bien el margen de mejora global es limitado debido al buen desempeño general del modelo, se observan mejoras significativas en clases complejas como la vegetación baja, así como en elementos lineales como carreteras, ferrocarril y puentes, donde se incrementa la continuidad espacial y la coherencia de los resultados. No obstante, el postprocesado presenta una dependencia directa de las predicciones del modelo de DL y conlleva un aumento del tiempo de ejecución, por lo que resulta clave encontrar un equilibrio entre mejora en precisión y coste computacional.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de un contrato de licitación con el Instituto Geográfico Nacional (IGN), en el contexto del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, y ha sido financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU. Por otro lado, la investigación realizada por la UPV ha sido financiada con Ayuda a Primeros Proyectos de Investigación (PAID-06-23), Vicerrectorado de Investigación de la Universitat Politècnica de València (UPV).

6. REFERENCIAS

Jing, Z., Guan, H., Zhao, P., Li, D., Yu, Y., Zang, Y., ... & Li, J. (2021). Multispectral LiDAR point cloud classification using SE-PointNet++. *Remote Sensing*, *13*(13), 2516.

Kowalczuk, Z., & Szymański, K. (2019). Classification of objects in the LIDAR point clouds using Deep Neural Networks based on the PointNet model. *IFAC-PapersOnLine*, *52*(8), 416-421.

Montero-Calvo, A. J., Martín-Tardío, M. A., & Felicísimo, Á. M. (2025). Automated Morphological Characterization of Mediterranean Dehesa Using a Low-Density Airborne LiDAR Technique: A DBSCAN–Concaveman Approach for Segmentation and Delineation of Tree Vegetation Units. F*orests, 17*(1), 16.

Sultan, R. I., Li, C., Zhu, H., Khanduri, P., Brocanelli, M., & Zhu, D. (2024). GeoSAM: Fine-tuning SAM with multi-modal prompts for mobility infrastructure segmentation. arXiv preprint arXiv:2311.11319.

Thomas, H., Qi, C. R., Deschaud, J. E., Marcotegui, B., Goulette, F., & Guibas, L. J. (2019). Kpconv: Flexible and deformable convolution for point clouds. In *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision* (pp. 6411-6420).

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.185

Lanzamiento y características de nuevos productos de vegetación de LSA SAF: el Data Record EPS VEGA-R

Jiménez-Guisado, Adrián [1] **García-Haro, F. Javier** [1] **Campos-Taberner, Manuel** [1] **Martínez, Beatriz** [1] **Sánchez-Ruiz, Sergio** [1] **Gilabert, María Amparo** [1] **Camacho, Fernando** [2] **Sánchez-Zapero, Jorge** [2] **Martínez-Sánchez, Enrique** [2]

[1] Universitat de València, España

[2] Earth Observation Laboratory (EOLAB), España

ORCID: Jiménez-Guisado 0009-0005-9691-5567 García-Haro 0000-0001-5888-0061 Campos-Taberner 0000-0001-5929-3942 Martínez 0000-0002-6354-9899 Sánchez-Ruiz 0000-0002-4849-9918 Gilabert 0000-0002-3548-1524 Camacho 0000-0001-8679-1912 Sánchez-Zapero 0000-0001-9028-9925

Correspondencia: adrian.jimenez@uv.es j.garcia.haro@uv.es manuel.campos@uv.es beatriz.martinez@uv.es sergio.sanchez@uv.es m.amparo.gilabert@uv.es fernando.camacho@eolab.es jorge.sanchez@eolab.es enrique.martinez@eolab.es

RESUMEN

El Satellite Application Facility on Land Surface Analysis (LSA SAF) de EUMETSAT proporciona variables clave para la caracterización y monitorización de los ecosistemas terrestres. Este trabajo presenta los avances recientes en los productos globales de vegetación derivados del sensor AVHRR a bordo del EUMETSAT Polar System (EPS), con especial énfasis en el nuevo Data Record (DR) EPS VEGA-R, que cubre el periodo 2007-2021. Combinado con los productos operacionales en tiempo real (NRT), este conjunto permite disponer de una serie continua hasta la actualidad. Se describe la metodología empleada en su generación y su consistencia con los productos NRT, lo que posibilita su uso conjunto en estudios climáticos de largo plazo. Mediante el análisis de un episodio de sequía extrema en el Cuerno de África (2010-2011), se demuestra la capacidad de estos productos para capturar y describir patrones espaciales y temporales en la dinámica de la vegetación y en la evolución de la actividad fotosintética a escala regional y global.

Palabras clave: *Teledetección; Vegetación; Series temporales; LSA SAF; EPS VEGA-R*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Lanzamiento y características de nuevos productos de vegetación de LSA SAF: el Data Record EPS VEGA-R

Jiménez-Guisado, Adrián [(1)], García-Haro, F. Javier [(1)], Campos-Taberner, Manuel [(1)], Martínez, Beatriz [(1)], Sánchez-Ruiz, Sergio [(1)], Gilabert, María Amparo [(1)], Camacho, Fernando [(2)], Sánchez-Zapero, Jorge [(2)], Martínez-Sánchez, Enrique [(2)]

[(1)] Universitat de València, España.

0009-0005-9691-5567, adrian.jimenez@uv.es ; 0000-0001-5888-0061, j.garcia.haro@uv.es

0000-0001-5929-3942, manuel.campos@uv.es ; 0000-0002-6354-9899, beatriz.martinez@uv.es

0000-0002-4849-9918, sergio.sanchez@uv.es ; 0000-0002-3548-1524, m.amparo.gilabert@uv.es

[(2)] Earth Observation Laboratory (EOLAB), España.

0000-0001-8679-1912, fernando.camacho@eolab.es ; 0000-0001-9028-9925, jorge.sanchez@eolab.es

enrique.martinez@eolab.es

Resumen: El *Satellite Application Facility on Land Surface Analysis* (LSA SAF) de EUMETSAT proporciona variables clave para la caracterización y monitorización de los ecosistemas terrestres. Este trabajo presenta los avances recientes en los productos globales de vegetación derivados del sensor AVHRR a bordo del *EUMETSAT Polar System* (EPS), con especial énfasis en el nuevo *Data Record* (DR) EPS VEGA-R, que cubre el periodo 2007-2021. Combinado con los productos operacionales en tiempo real (NRT), este conjunto permite disponer de una serie continua hasta la actualidad. Se describe la metodología empleada en su generación y su consistencia con los productos NRT, lo que posibilita su uso conjunto en estudios climáticos de largo plazo. Mediante el análisis de un episodio de sequía extrema en el Cuerno de África (2010-2011), se demuestra la capacidad de estos productos para capturar y describir patrones espaciales y temporales en la dinámica de la vegetación y en la evolución de la actividad fotosintética a escala regional y global.

Palabras clave: Teledetección; Vegetación; Series temporales; LSA SAF; EPS VEGA-R

Release and characteristics of new LSA SAF vegetation products: the EPS VEGA-R Data Record

***Abstract**: The EUMETSAT Satellite Application Facility on Land Surface Analysis (LSA SAF) provides key variables for the characterization and monitoring of terrestrial ecosystems. This work presents recent advances in the global vegetation products derived from the AVHRR sensor onboard the EUMETSAT Polar System (EPS), with particular emphasis on the new EPS VEGA-R Data Record (DR), which covers the period 2007-2021. When combined with the operational near-real-time (NRT) products, this dataset enables the construction of a continuous time series up to the present. The methodology used in generating the DR and its consistency with the NRT products are described, enabling their joint use in long-term climate studies. By analysing one major drought episode in the Horn of Africa (2010-2011), we demonstrate the ability of these products to capture and describe spatial and temporal patterns in vegetation dynamics and photosynthetic activity at regional to global scales.*

***Keywords**: Remote Sensing; Vegetation; Time Series; LSA SAF; EPS VEGA-R*

1. INTRODUCCIÓN

Las misiones de observación de la Tierra constituyen una herramienta fundamental para la monitorización del estado y la dinámica de la vegetación. Los productos derivados de satélite proporcionan información esencial para aplicaciones en meteorología, climatología, modelización de ecosistemas y monitorización ambiental. No obstante, la comunidad científica requiere series temporales largas, con incertidumbres bien caracterizadas y adecuadas para representar la evolución de los ecosistemas terrestres y los ciclos de energía a escalas regionales y globales (Bojinski *et al*., 2014; GCOS, 2021).

En este contexto, la *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) impulsa diferentes programas orientados a la

explotación coordinada de observaciones satelitales tanto geoestacionarias como de órbita polar (Trigo *et al*., 2011). Entre ellos, el *Satellite Application Facility on Land Surface Analysis* (LSA SAF) constituye un centro de referencia europeo dedicado al desarrollo y generación operacional de productos de la superficie terrestre.

El LSA SAF produce variables biofísicas esenciales para la caracterización la vegetación, entre ellas el índice de área foliar (LAI), la fracción de cobertura vegetal (FVC) y la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (FAPAR). Tanto el LAI como la FAPAR están reconocidas como *Essential Climate Variables* (ECV) por el *Global Climate Observing System* (GCOS), dada su relevancia para el seguimiento del clima y la modelización de procesos biofísicos.

Los modelos de superficie terrestre y de clima requieren habitualmente datos en *near-real time* (NRT), con alta frecuencia temporal y cobertura regional a global. Para dar respuesta a estas necesidades, el LSA SAF opera dos líneas de productos de vegetación: productos derivados del sensor SEVIRI a bordo de los satélites geoestacionarios *Meteosat Second Generation* (MSG) (García-Haro *et al*., 2019; Jiménez-Guisado *et al*., 2025), y productos derivados del sensor AVHRR en los satélites Metop-A, B y C, dentro del marco del *EUMETSAT Polar System* (EPS) (García-Haro *et al*., 2018).

Este trabajo presenta el estado actual y los avances recientes en los productos de vegetación generados a partir de EPS, haciendo especial énfasis en el desarrollo de un *Data Record* (DR) coherente y estable que extiende la serie temporal desde 2007 hasta la actualidad. Asimismo, se ilustran ejemplos del potencial de estos datos para la detección temprana de episodios con condiciones climáticas extremas, destacando su utilidad para la vigilancia y caracterización de impactos en la vegetación a escalas regionales y continentales.

2. CARACTERÍSTICAS DE PRODUCTOS EPS

Los productos globales EPS se producen en proyección sinusoidal, con una resolución espacial aproximada de 1.1 km y una frecuencia decenal (días 5, 15 y 25 de cada mes). Las principales características de los productos se resumen en la Tabla 1. Su generación se basa en un enfoque híbrido que combina algoritmos de regresión con simulaciones PROSAIL (García-Haro *et al*., 2018), garantizando una relación físicamente consistente entre las observaciones y las variables biofísicas.

Los datos de entrada proceden de reflectividades isotrópicas corregidas atmosféricamente, derivadas del producto de la *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF) generado a partir de observaciones instantáneas acumuladas en ventanas temporales de 20 días mediante el algoritmo del albedo (Geiger *et al*., 2008; Delmotte *et al*., 2024).

Además de las variables principales, el producto incluye campos adicionales de gran valor para el usuario, como las estimaciones de incertidumbre (barras de error) para aplicaciones de asimilación de datos, y un indicador de calidad (QFLAG) que señala la fiabilidad de las observaciones.

Tabla 1. Descripción de los productos de vegetación EPS (FVC, LAI, FAPAR) generados en LSA SAF.

Característica	Descripción
Productos	FVC, LAI, FAPAR
Identificador	NRT: ETFVC (LSA-403), ETLAI (LSA-406), ETFAPAR (LSA-409) DR: ETFVC-R (LSA-455), ETLAI (LSA-456), ETFAPAR (LSA-457)
Cobertura espacial	Global
Resolución espacial	0.01° (~ 1.1 km × 1.1 km)
Resolución temporal	Decenal (10 días)
Periodo temporal	NRT: 2015 – Presente DR: 2007 – 2021

Este conjunto de datos se distribuye por EUMETSAT a través del portal del LSA SAF (https://landsaf.ipma.pt/en) en formatos HDF5 y NetCDF4. Asimismo, con el fin de facilitar su integración en modelos climáticos globales, se ofrece una versión reproyectada a Plate Carrée, con resolución de 0.05°.

3. EL DATA RECORD EPS VEGA-R

En el marco de la estrategia de EUMETSAT para garantizar series temporales consistentes y plenamente alineadas con los productos operacionales, el LSA SAF ha generado un *Data Record* de productos EPS (EPS VEGA-R). Este reprocesado, sometido a un proceso exhaustivo de validación (Camacho *et al*., 2025), cubre de forma homogénea el periodo 2007-2021 y proporciona una serie temporal estable y coherente para aplicaciones climáticas de largo plazo.

El reprocesado VEGA-R incorpora varias mejoras clave:

1) Homogeneidad interna y reducción de artefactos temporales. El tratamiento unificado de toda la serie AVHRR permite mitigar discontinuidades típicas en la cadena de producción.
2) Integración de mejoras en la corrección atmosférica. La incorporación del *Data Record* ETAL-R (Delmotte *et al*., 2024) introduce una corrección atmosférica más estable en el tiempo, lo que reduce la sensibilidad a aerosoles y vapor de agua.
3) Consistencia muy alta entre plataformas Metop-A/B, con valores sin sesgos apreciables y diferencias mínimas.
4) Compatibilidad retrospectiva con los productos NRT. La coherencia estadística entre VEGA-R y los productos NRT es alta, lo que permite concatenar ambos conjuntos para construir una serie continua desde 2007 hasta el presente. Dado que el *Data Record* presenta mayor estabilidad temporal, se recomienda utilizar la versión VEGA-R durante el periodo de solapamiento (2015-2021).

En conjunto, VEGA-R constituye un recurso muy valioso para estudios a largo plazo en agricultura, hidrología, ecología terrestre, análisis de sequías o evaluación de riesgos, donde la consistencia temporal es tan importante como la precisión instantánea.

4. APLICACIÓN: ESTUDIO DE ANOMALÍAS

El análisis de anomalías constituye una de las aplicaciones más directas de los productos VEGA-R, ya que combina información biofísica con estabilidad temporal. Dichas anomalías se han calculado respecto a una climatología 2007-2024, considerando desviaciones porcentuales con respecto a la media histórica.

En este estudio se analiza un evento de sequía severa que asoló la región del Cuerno de África durante el periodo 2010-2011. El episodio de sequía fue impulsado por un fenómeno de La Niña excepcionalmente fuerte, resultando en dos temporadas de lluvia consecutivas severamente deficitarias, con importantes pérdidas de cosecha en la región (Dutra *et al*., 2013). La Figura 1 muestra la climatología de FAPAR en África y los valores observados sobre el 15 de enero de 2011, durante el pico de la crisis. Aunque las diferencias visuales entre la climatología y los valores observados pueden parecer moderadas en términos absolutos, el análisis de EPS VEGA-R revela anomalías relativas negativas de FAPAR superiores al 40% en Kenia, Somalia y Etiopía durante el pico de la crisis, tal como se muestra en la Figura 2.

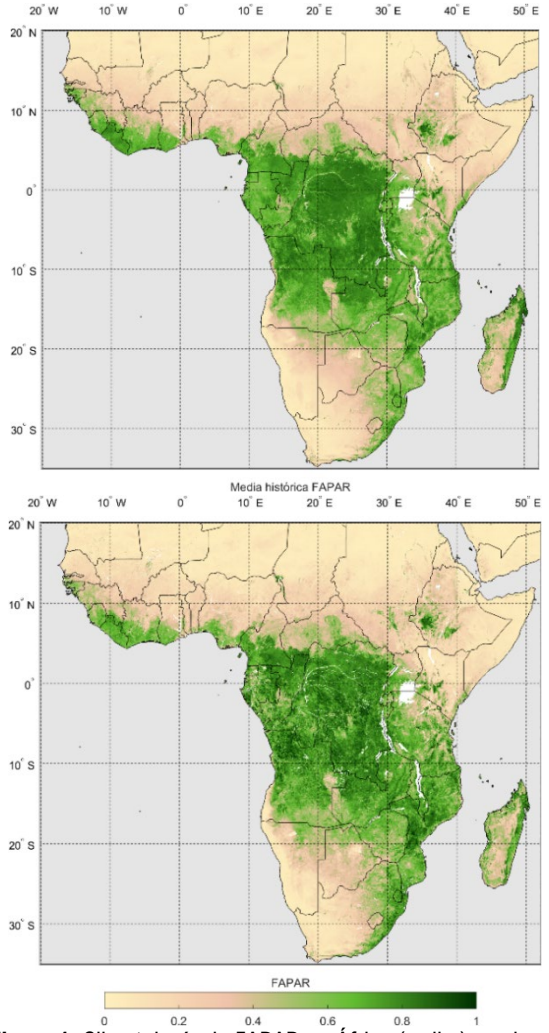


Figura 1. Climatología de FAPAR en África (arriba) y valores observados para el 15 de enero de 2011 (abajo).

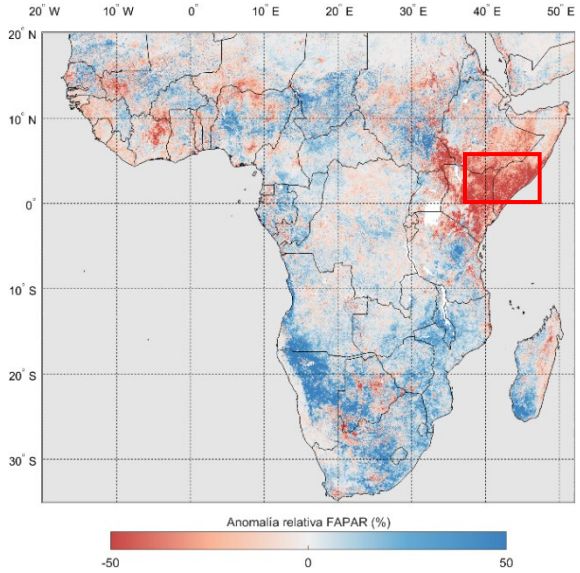


Figura 2. Anomalía relativa de FAPAR en África para el 15 de enero de 2011. El rectángulo rojo delimita la región sobre la cual se ha realizado el estudio hidrológico.

Esta aparente discrepancia se debe a la normalización respecto a la climatología, que amplifica las desviaciones relativas incluso cuando los valores absolutos no presentan contrastes marcados.

En dicha región de estudio, las anomalías de FAPAR derivadas presentan patrones espaciales consistentes con la literatura, con un buen compromiso entre detalle espacial y estabilidad temporal, lo que evidencia su utilidad en análisis operacionales y climáticos. Para contextualizar estos datos, en la Figura 3 se integraron datos de precipitación de la base de datos *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS), que confirmaron el déficit hídrico extremo durante el año hidrológico 2010-2011 en la región delimitada en rojo en la Figura 2.

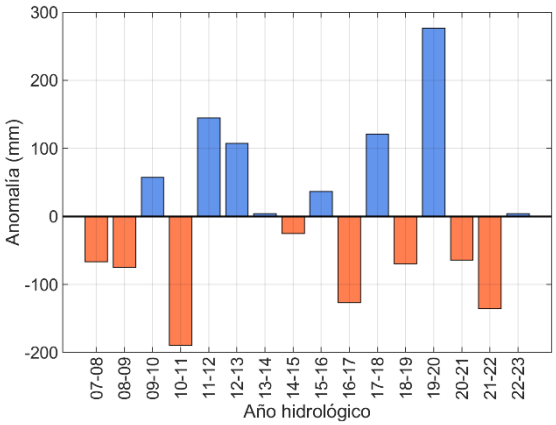


Figura 3. Anomalías en las precipitaciones anuales para la región señalada con un rectángulo rojo en la Figura 2.

5. CONCLUSIONES

Los resultados presentados ilustran el potencial de los productos EPS VEGA-R como herramienta de análisis a escala regional y global en aplicaciones climáticas y de monitorización ambiental.

Los productos EPS aúnan robustez operacional y estabilidad temporal y metadatos exhaustivos, proporcionando una base fiable para el seguimiento de la dinámica interanual de la vegetación.

La generación de anomalías de FAPAR asociadas a diferentes episodios de sequía demuestra su capacidad para capturar patrones espaciales y temporales del impacto del estrés hídrico, reflejados en una marcada reducción de la actividad fotosintética.

El *Data Record* EPS VEGA-R representa un avance sustancial en la capacidad de EUMETSAT/LSA SAF para proporcionar productos de vegetación coherentes a largo plazo. Una de las contribuciones clave de VEGA-R es su excelente consistencia temporal, superior a la de muchos productos globales derivados de sensores multisatélite. Ello permite utilizar la climatología obtenida como una línea base robusta frente a condiciones actuales, facilitando la integración DR+NRT en aplicaciones operacionales.

Mirando al futuro, el LSA SAF ampliará esta línea de productos con la inminente incorporación de las nuevas misiones MTG/FCI y EPS-SG/VII, que ofrecerán mayor resolución espacial y espectral, dando continuidad al servicio para el seguimiento del clima y la vegetación en Europa y otras regiones del mundo.

6. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por los proyectos LSA SAF (EUMETSAT) y ECCE EO (PID2020-118036RB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033).

7. REFERENCIAS

Bojinski, S., Verstraete, M., Peterson, T. C., Richter, C., Simmons, A., & Zemp, M. (2014). The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy. *Bulletin of the American Meteorological Society, 95*(9), 1431-1443. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00047.1

Camacho, F., Sánchez-Zapero, J., Martínez-Sánchez, E., García-Haro, F. J., Campos-Taberner, M., Jiménez-Guisado, A. (2025). Validation Report for EPS/AVHRR Vegetation Parameters Data Record (VEGA-R). Ref. No. SAF/LAND/UV/VR_EPSVEGA-R

Delmotte, A., Juncu, D., Ceamanos, X., Trigo, I. F., & Gomes, S. (2024). Upgrade and extension of LSA-SAF land surface albedo archive from EPS Metop/AVHRR: description and quality assessment. *European Journal of Remote Sensing*, *57*(1), 2300043. https://doi.org/10.1080/22797254.2023.2300043

Dutra, E., Magnusson, L., Wetterhall, F., Cloke, H. L., Balsamo, G., Boussetta, S., & Pappenberger, F. (2013). The 2010-2011 drought in the Horn of Africa in ECMWF reanalysis and seasonal forecast products. I*nternational Journal of Climatology, 33*(7), 1720-1729. https://doi.org/10.1002/joc.3545

García-Haro, F. J., Campos-Taberner, M., Muñoz-Marí, J., Laparra, V., Camacho, F., Sanchez-Zapero, J., & Camps-Valls, G. (2018). Derivation of global vegetation biophysical parameters from EUMETSAT Polar System. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 139*, 57-74. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.03.005

García-Haro, F. J., Camacho, F., Martínez, B., Campos-Taberner, M., Fuster, B., Sánchez-Zapero, J., & Gilabert, M. A. (2019). Climate data records of vegetation variables from geostationary SEVIRI/MSG data: Products, algorithms and applications. *Remote Sensing, 11*(18), 2103. https://doi.org/10.3390/rs11182103

Geiger, B., Carrer, D., Franchisteguy, L., Roujean, J. L., & Meurey, C. (2008). Land surface albedo derived on a daily basis from Meteosat Second Generation observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46*(11), 3841-3856. https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2001798

Global Climate Observing System [GCOS]. (2021). Implementation plan and status of the Global Climate Observing System. Recuperado de https://gcos.wmo.int

Jiménez-Guisado, A., García-Haro, F. J., Campos-Taberner, M., Martínez, B., Sánchez-Ruiz, S., Camacho, F., ... & Gilabert, M. A. (2025). Toward a unifying framework for biophysical variable retrieval from EUMETSAT sensors: application to Meteosat data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 63.* https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3600250

Trigo, I. F., Dacamara, C. C., Viterbo, P., Roujean, J. L., Olesen, F., Barroso, C., ... & Arboleda, A. (2011). The satellite application facility for land surface analysis. International *Journal of Remote Sensing, 32*(10), 2725-2744. https://doi.org/10.1080/01431161003743199

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.187

Aplicación de los principios FAIR en el desarrollo de una plataforma de datos de teledetección: aprendizaje del proyecto GOYAS

Aguilar Gómez, Fernando [1] **González-Haro, Cristina** [2] **García-Espriu, Aina** [2] **Caballero de Frutos, Isabel** [3] **García-Díaz, Daniel** [4] **García Díaz, Diego** [5] **Afán, Isabel** [2] **Flo, Eva** [2] **López, Antonio** [2]

[1] Instituto de Física de Cantabria (CSIC-UC)

[2] Institut de Ciències del Mar (CSIC)

[3] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (CSIC)

[4] Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CSIC)

[5] Estación Biológica de Doñana (CSIC)

ORCID: Aguilar Gómez 0000-0001-9462-4831 González-Haro 0000-0003-4602-852X García-Espriu 0000-0001-9793-5547 Caballero de Frutos 0000-0001-7485-0989 García-Díaz 0000-0002-3399-1598 García Díaz 0000-0002-2757-7112 Afán 0000-0003-3874-0461 Flo 0000-0002-4423-4779 López 0009-0004-6954-0184

Correspondencia: aguilarf@ifca.unican.es cgharo@icm.csic.es ainagarcia@icm.csic.es isabel.caballero@csic.es garciad@ifca.unican.es diegogarcia@ebd.csic.es isabel.afan@csic.es evaflo@icm.csic.es antoniolopez@icm.csic.es

RESUMEN

La creciente disponibilidad de datos de teledetección plantea nuevos retos en términos de documentación, trazabilidad, interoperatividad y reutilización. En este contexto, los principios FAIR (Encontrables, Accesibles, Intereoperables y reutilizables, por sus siglas en inglés) se han consolidado como marco conceptual para mejorar la gestión y explotación de datos científicos, facilitando la reproducibilidad y reusabilidad. Sin embargo, su implementación práctica en plataformas operativas sigue siendo un desafío. Este trabajo presenta la experiencia del proyecto GOYAS (Geospatial Open Science Yielding Applications), desarrollado en el marco del proyecto Horizon Europe OSCARS y alineado con la "European Open Science Cloud" (EOSC). GOYAS propone una arquitectura integrada para la producción y publicación de productos derivados de datos satelitales bajo un enfoque FAIR-by-design. La plataforma combina distintos componentes para facilitar la ingesta de datos y publicación. En este artículo se describen todos los apartados técnicos y arquitectura definida, así como el aprendizaje adquirido a lo largo del proyecto. Finalmente, se reflexiona sobre la integración con infraestructuras mayores como ENVRI-HUB (Grupo de Infraestructuras de Investigación Medioambientales europeas) y EOSC como estrategia para aumentar la visibilidad y facilitar el acceso por parte de investigadores, gestores y administraciones públicas.

Palabras clave: *datos, FAIR, EOSC, trazabilidad, reproducibilidad*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Aplicación de los principios FAIR en el desarrollo de una plataforma de datos de teledetección: aprendizaje del proyecto GOYAS

Aguilar Gómez, Fernando [1], González-Haro, Cristina [2], García-Espriu, Aina [2], Caballero de Frutos, Isabel [3], García-Díaz, Daniel [4], García Díaz, Diego [5], Afán, Isabel [2], Flo, Eva [2], López, Antonio [2]

[1] Instituto de Física de Cantabria (CSIC-UC).
0000-0001-9462-4831, aguilarf@ifca.unican.es.

[2] Institut de Ciències del Mar (CSIC).
0000-0003-4602-852X, cgharo@icm.csic.es ; 0000-0003-3874-0461, isabel.afan@csic.es
0000-0002-4423-4779, evaflo@icm.csic.es ; 0009-0004-6954-0184, antoniolopez@icm.csic.es
0000-0001-9793-5547, ainagarcia@icm.csic.es

[3] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (CSIC).
0000-0001-7485-0989, isabel.caballero@csic.es

[4] Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CSIC).
0000-0002-3399-1598, garciad@ifca.unican.es

[5] Estación Biológica de Doñana (CSIC).
0000-0002-2757-7112, diegogarcia@ebd.csic.es

Resumen: La creciente disponibilidad de datos de teledetección plantea nuevos retos en términos de documentación, trazabilidad, interoperatividad y reutilización. En este contexto, los principios FAIR (Encontrables, Accesibles, Intereoperables y reutilizables, por sus siglas en inglés) se han consolidado como marco conceptual para mejorar la gestión y explotación de datos científicos, facilitando la reproducibilidad y reusabilidad. Sin embargo, su implementación práctica en plataformas operativas sigue siendo un desafío. Este trabajo presenta la experiencia del proyecto GOYAS (Geospatial Open Science Yielding Applications), desarrollado en el marco del proyecto Horizon Europe OSCARS y alineado con la "European Open Science Cloud" (EOSC). GOYAS propone una arquitectura integrada para la producción y publicación de productos derivados de datos satelitales bajo un enfoque FAIR-by-design. La plataforma combina distintos componentes para facilitar la ingesta de datos y publicación. En este artículo se describen todos los apartados técnicos y arquitectura definida, así como el aprendizaje adquirido a lo largo del proyecto. Finalmente, se reflexiona sobre la integración con infraestructuras mayores como ENVRI-HUB (Grupo de Infraestructuras de Investigación Medioambientales europeas) y EOSC como estrategia para aumentar la visibilidad y facilitar el acceso por parte de investigadores, gestores y administraciones públicas.

Palabras clave: datos, FAIR, EOSC, trazabilidad, reproducibilidad

Application of FAIR principles in the development of a remote sensing data platform: lessons learned from the GOYAS project

***Abstract**: This paper presents the experience of the GOYAS project (Geospatial Open Science Yielding Applications), developed within the Horizon Europe OSCARS project and aligned with the European Open Science Cloud (EOSC). GOYAS proposes an integrated architecture for the production and publication of satellite-derived products under a FAIR-by-design approach. The platform integrates different components to facilitate data ingestion and publication. The article describes the technical decisions adopted, the lessons learned, and the opportunities for producers of innovative, experimental, or highly localized remote sensing products. It discusses the importance of adopting appropriate metadata standards, assigning persistent identifiers to ensure traceability and versioning, and automating data curation and ingestion processes. This article describes the technical details and defined architecture, as well as leasons learnt during the project. Finally, it reflects on integration with larger infrastructures such as ENVRI-HUB (Cluster of Environmentar Research Infrastructures) and EOSC as a strategy to increase*

visibility and facilitate access for researchers, decision-makers, and public administrations.

***Keywords**: data, FAIR, EOSC, trackability, reproducibility*

1. INTRODUCCIÓN

La teledetección ha experimentado un crecimiento exponencial en volumen, resolución y frecuencia de adquisición de datos. Más allá de los datos originales, los productos de datos derivados, proporcionando distintos tipos de variables y estimaciones, son cada vez más utilizadas en el ámbito científico y por las administraciones públicas. Sin embargo, la mera disponibilidad de estos datos no garantiza su reutilización efectiva. La falta de documentación estructurada, información de procedencia, versionado explícito o identificadores persistentes dificulta la reproducibilidad científica y la trazabilidad de los productos derivados, así como su utilización, por lo que es necesario automatizar y protocolizar el preprocesado (Vu-Duc *et al*., 2025). Los principios FAIR proporcionan un marco conceptual para abordar estos desafíos (Wilkinson *et al*., 2016). No obstante, su implementación práctica requiere decisiones técnicas y organizativas que deben adoptarse desde la concepción del sistema de información. El proyecto GOYAS surge precisamente con este objetivo: diseñar una plataforma de productos de datos de teledetección que integre los principios FAIR desde su arquitectura inicial, bajo un enfoque FAIR-by-design. GOYAS se desarrolla en el contexto del proyecto Horizon Europe OSCARS y en alineación con la European Open Science Cloud (EOSC), buscando no solo la producción de datos FAIR sino también su integración en ecosistemas europeos de ciencia abierta.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La arquitectura de GOYAS se basa en cuatro elementos integrados (Fig. 1). Primero, un catálogo de metadatos basado en una versión personalizada de GeoNetwork, con énfasis en transparencia estructural del producto. Segundo, GeoServer como motor de publicación de servicios OGC (WMS, WCS, WFS). Tercero, un pipeline automatizado de ingestión y generación de metadatos. Por último, un sistema de gestión de identificadores persistentes (PIDs). Esta integración permite cubrir simultáneamente los cuatro pilares FAIR.

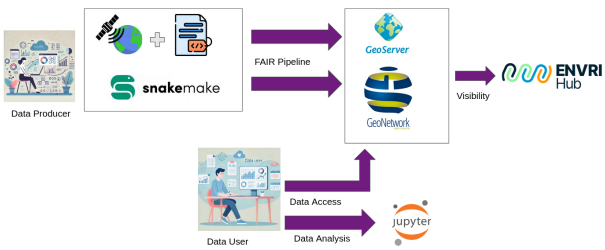


Figura 1. Arquitectura y componentes

2.1. Estándares de metadatos

Uno de los aprendizajes fundamentales es la necesidad de emplear un estándar de metadatos capaz de recoger información estructural, contextual y administrativa. En el caso de productos derivados satelitales, no basta con describir la cobertura espacial y temporal; es necesario documentar: variables físicas incluidas en el producto, algoritmos y versiones empleados, parámetros de procesamiento, dependencias de datos de entrada e información de calidad y validación.

La adopción de estándares interoperables permite que esta información sea interpretable tanto por humanos como por máquinas, facilitando la reutilización y la integración en infraestructuras mayores. En particular, dentro del proyecto GOYAS el estándar utilizado es el ISO 19139, es decir, la codificación XML del modelo conceptual definido en ISO 19115 (metadatos para información geográfica). Es compatible con los perfiles del reglamento europeo de metadatos INSPIRE. Este estándar permite la definición de diversos detalles sobre el proceso de producción y documentación concreta sobre la calidad de los productos y las variables que contienen. La Figura 1 muestra una captura de cómo se ven representados estos metadatos en el sistema.

2.2. PIDs y trazabilidad

La asignación de identificadores persistentes constituye un elemento central del diseño. Cada producto maduro recibe un PID que permite: distinguir versiones, garantizar la citabilidad. facilitar la trazabilidad entre producto, metadatos y servicios y mantener referencias estables en el tiempo.

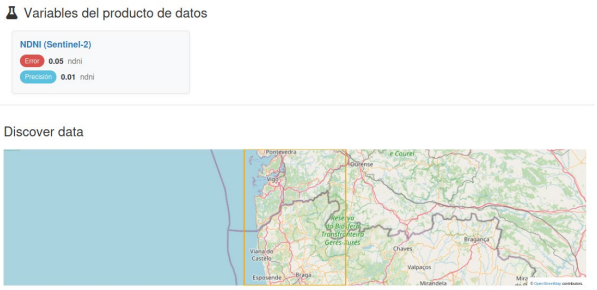


Figura 2. Vista de producto de datos con identificación de variables (precisión, error) y cobertura geográfica.

El uso de PIDs no se limita al dataset final, sino que se concibe como parte de una estrategia más amplia de gestión de ciclo de vida del dato. Esta aproximación resulta esencial para entornos EOSC, donde la interoperatividad y persistencia son requisitos clave. Asimismo, gracias al estándar de metadatos elegido, es posible definir ciertos procesos de preprocesado o curación para indicar los pasos de generación del producto. Esto también se representa en el sistema de información (Fig. 3).

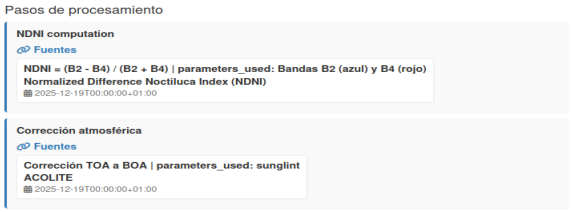


Figura 3. Vista de metadatos con información de procedencia

2.3. "Pipeline" de ingestión de datos

La producción de datos FAIR no puede depender exclusivamente de procesos manuales que pueda llevar a errores o inconsistencias. GOYAS incorpora un pipeline automatizado que genera metadatos estructurados como subproducto del procesamiento. Está basado en la librería de Python "Snakemake" y su misión principal es asegurarse que cada paso de la ingestión de datos sea completado de forma correcta. A partir de un fichero de configuración en el que se expresan todos los detalles de un producto de datos, este sistema valida la coherencia entre los archivos y prepara la estructura adecuada que permite la elaboración automática de los metadatos. Al estar basada en un sistema de transacción paso a paso, el "pipeline" asegura que todos los pasos se realizan de la forma esperada y, en caso de error, se paraliza el proceso de ingestión, que puede ser reanudado en el mismo punto una vez se ha solucionado (ejemplo: inconsistencia en los metadatos). Además, al tratarse de un sistema integrado, facilita la publicación coordinada en catálogo y servicios, de modo que garantiza esta consistencia. La automatización reduce errores humanos, mejora la consistencia y disminuye la barrera de entrada para nuevos productores de datos, que no necesitan conocer el estándar de metadatos complejo para poder publicar. Este enfoque es especialmente relevante en escenarios de producción continua de productos derivados. Una vez finaliza la ingestión de los datos, el propio sistema Geonetwork puede validar el cumplimiento del estándar. Sólo en ese caso, se puede asignar un identificador persistente al conjunto de datos.

3. PRODUCTOS DE DATOS

El proyecto GOYAS está formado por un consorcio de cuatro institutos del CSIC productores de datos de teledetección. Dentro del proyecto se están haciendo disponibles distintos productos, entre los que se encuentran: datos de calidad de agua en embalses, información de inundación del Parque Nacional de Doñana, batimetría derivada de satélite en zonas someras, información de la calidad del agua del Mar Menor y variables oceanográficas. El objetivo es que todos los productos estén representados de forma homogénea, con información similar de procedencia, detalles de variables y basado en estándares aceptados internacionalmente. A través de la plataforma, disponible en goyas.csic.es, se permite el acceso libre a usuarios para la descarga de datos e imágenes en distintos formatos como GeoTIFF o NetCDF, así como la conexión a través de estándares de la OGC. Gracias al uso de identificadores persistentes, los datos pueden ser directamente citados en caso de reutilización.

4. ECOSISTEMAS EUROPEOS

Un objetivo estratégico del proyecto es su alineación con infraestructuras mayores como EOSC y ENVRI-HUB. La agregación a estos ecosistemas permite: Incrementar la visibilidad, facilitar el descubrimiento transdisciplinar, mejorar la confianza institucional y garantizar sostenibilidad a largo plazo. Asimismo, GOYAS incluye demostradores basados en notebooks Jupyter que permiten a usuarios explorar y reproducir análisis directamente sobre los datos publicados. Este componente contribuye tanto a la accesibilidad como a la reutilización efectiva. La automatización de los procesos de ingestión y publicación de datos facilita y agiliza la disponibilidad. Esto permite el uso de datos en situaciones de emergencia, para la toma de decisiones o en la gestión de entornos naturales. A diferencia de otros repositorios y portales de datos ([3, 4, 5]), GOYAS se enfoca en datos de teledetección experimentales: productos derivados de satélite u otras fuentes remotas que suelen ser discontinuos o generados con nuevos métodos de investigación.

5. DISCUSIÓN

Nuestra experiencia previa en la producción de datos y en la participación en iniciativas internacionales para la interoperatividad de datos y servicios nos ha permitido diseñar un sistema que tiene a la reproducibilidad y la transparencia como concepto principal. Gracias al proyecto GOYAS hemos podido generar un sistema FAIR desde el inicio, facilitando esta reutilización de datos. A lo largo del proyecto hemos ido superando distintos retos y dificultades, que nos han llevado a desarrollar distintas reflexiones y adquirir cierto aprendizaje. Creemos que el concepto FAIR debe integrarse desde el diseño arquitectónico, no añadirse a posteriori. De este modo se toman decisiones estructurales que ayudaran a la producción de datos y a mejorar su uso. El esquema de metadatos a utilizar debe ser suficientemente expresivo para explicar todos los detalles de cómo se ha creado el producto de datos, las fuentes originales, los procesos involucrados, etc. Esto implica que la estructura del documento de metadatos puede ser completa y el número de campos a rellenar alto. Sin conocer a priori el estándar puede ser costoso entender qué información debe ir en cada apartado, por lo que creemos que sustituir un formulario o un documento XML por una lista puede resultar más sencillo para publicadores de datos. Esta información estructurada beneficia a posibles usuarios de los datos, que pueden identificar claramente la utilidad de la información. Los identificadores persistentes son esenciales para la trazabilidad y el versionado. Es la mejor forma que tenemos de indicar un uso y citar fuentes. La automatización del pipeline es clave para la sostenibilidad y para facilitar a los productores de datos una ingestión sencilla. Por último, la integración en infraestructuras mayores amplifica el impacto científico y social. La experiencia demuestra que implementar FAIR implica decisiones técnicas

concretas que afectan a la arquitectura, los flujos de trabajo y la gobernanza del dato. La plataforma GOYAS propone una nueva arquitectura integrando distintos componentes que facilitan la producción de los datos siguiendo los principios FAIR, adoptando distintas buenas prácticas de la ciencia abierta que hacen los productos más transparentes y reproducibles.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto GOYAS, financiado a través del programa OSCARS y alineado con la European Open Science Cloud (EOSC). También se ha financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, proyecto PROFECIA (PID2023-152114OB-I00), correspondiente a la convocatoria de Proyectos de Generación de Conocimiento.

7. REFERENCIAS

Vu-Duc, A., et al. (2025). A comprehensive survey of super-resolution remote sensing image datasets: Evolution, challenges, and future directions. *IEEE Access, 13*, 145350–145372. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3599535

Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., et al. (2016). The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data, 3*(1), 1–9. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18

Roncella, R., et al. (2023). Publishing NextGEOSS data on the GEOSS Platform. *Big Earth Data, 7*(2), 413–427. https://doi.org/10.1080/20964471.2022.2135234

Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). (2026). Centro de Descargas del CNIG. https://centrodedescargas.cnig.es

European Space Agency (ESA). (2023). Copernicus Data Space Ecosystem. https://dataspace.copernicus.eu

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.188

Obtención de mapas de altura de las nubes mediante una red de cámaras de todo cielo

Herrero del Barrio, Celia [1,2] **Román Diez, Roberto** [1,2] **Herrero-Anta, Sara** [1,2] **González-Fernández, Daniel** [1,2] **Carracedo, Rogelio** [1,2] **González, Ramiro** [1,2] **Longarela, Bruno** [1,2] **Gatón, Javier** [1,2] **Mateos, David** [1,2] **Calle, Abel** [1,2] **Toledano, Carlos** [1,2] **Cachorro, Victoria Eugénia** [1,2] **de Frutos, Ángel** [1,2]

[1] Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Paseo de Belén, 7, 47011, Valladolid, España;

[2] Laboratory for Disruptive Interdisciplinary Science de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Paseo de Belén, 7, 47011, Valladolid, España

ORCID: Herrero del Barrio 0009-0001-9508-3886 Román Diez 0000-0003-4889-1781 Herrero-Anta 0000-0003-4246-1836 González-Fernández 0000-0002-3302-8080 Carracedo 0000-0001-6966-8867 González 0000-0003-0017-5591 Longarela 0009-0005-7323-462X Gatón 0000-0002-1229-155X Mateos 0000-0001-5540-4721 Calle 0000-0003-4161-7798 Toledano 0000-0002-6890-6648 Cachorro 0000-0002-4627-9444 de Frutos 0000-0001-5748-5078

Correspondencia: celia@goa.uva.es robertor@goa.uva.es sara@goa.uva.es daniel@goa.uva.es rogelio@goa.uva.es ramiro@goa.uva.es bruno@goa.uva.es gaton@goa.uva.es mateos@goa.uva.es abel.calle@uva.es toledano@goa.uva.es chiqui@goa.uva.es angel@goa.uva.es

RESUMEN

Este estudio presenta una metodología para la detección y cálculo de la altura de las nubes utilizando una red de 20 cámaras de todo cielo distribuidas por la ciudad de Valladolid (España) y sus alrededores. Todas estas cámaras son idénticas (model o OMEA-3C-TF), y son operadas y calibradas geométricamente dentro de la infraestructura GOA-SCAN del Grupo de Óptica Atmosférica (GOA-UVa). La metodología propuesta combina el preprocesamiento de imágenes, la segmentación de píxeles de nubes, la identificación de píxeles coincidentes y la reconstrucción estereoscópica para obtener mapas de altura de las nubes. El sistema proporciona observaciones continuas cada cinco minutos durante el día y cada dos minutos durante la noche, lo que permite monitorizar la estructura espacial de las nubes y su evolución a corto plazo. Para cada instante, cada cámara se empareja con todas las demás cámaras de la red, lo que produce múltiples estimaciones independientes de la altura de las nubes. Estas estimaciones se filtran utilizando restricciones geométricas, métricas de calidad de correlación y criterios de plausibilidad física. El uso de múltiples distancias de cámara permite la sensibilidad a diferentes capas de nubes y garantiza una cobertura espacialmente coherente del área urbana y sus alrededores.

Palabras clave: *Nubes, Cámaras de todo cielo, Estereoscopía*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Obtención de mapas de altura de las nubes mediante una red de cámaras de todo cielo

Herrero del Barrio, Celia [1,2], Román Diez, Roberto [1,2], Herrero-Anta, Sara [1,2], González-Fernández, Daniel [1,2], Carracedo, Rogelio [1,2], González, Ramiro [1,2], Longarela, Bruno [1,2], Gatón, Javier [1,2], Mateos, David [1,2], Calle, Abel [1,2], Toledano, Carlos [1,2], Cachorro, Victoria Eugénia [1,2], de Frutos, Ángel [1,2]

[1] Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, España.

[2] Laboratory for Disruptive Interdisciplinary Science de la Universidad de Valladolid, Dpto de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, España

0009-0001-9508-3886, celia@goa.uva.es ; 0000-0003-4889-1781, robertor@goa.uva.es
0000-0003-4246-1836, sara@goa.uva.es ; 0000-0002-3302-8080, daniel@goa.uva.es
0000-0001-6966-8867, rogelio@goa.uva.es ; 0000-0003-0017-5591, ramiro@goa.uva.es
0009-0005-7323-462X, bruno@goa.uva.es ; 0000-0002-1229-155X, gaton@goa.uva.es
0000-0001-5540-4721, mateos@goa.uva.es ; 0000-0003-4161-7798, abel.calle@uva.es
0000-0002-6890-6648, toledano@goa.uva.es ; 0000-0002-4627-9444, chiqui@goa.uva.es
0000-0001-5748-5078, angel@goa.uva.es

Resumen: Este estudio presenta una metodología para la detección y cálculo de la altura de las nubes utilizando una red de 20 cámaras de todo cielo distribuidas por la ciudad de Valladolid (España) y sus alrededores. Todas estas cámaras son idénticas (model o OMEA-3C-TF), y son operadas y calibradas geométricamente dentro de la infraestructura GOA-SCAN del Grupo de Óptica Atmosférica (GOA-UVa). La metodología propuesta combina el preprocesamiento de imágenes, la segmentación de píxeles de nubes, la identificación de píxeles coincidentes y la reconstrucción estereoscópica para obtener mapas de altura de las nubes. El sistema proporciona observaciones continuas cada cinco minutos durante el día y cada dos minutos durante la noche, lo que permite monitorizar la estructura espacial de las nubes y su evolución a corto plazo. Para cada instante, cada cámara se empareja con todas las demás cámaras de la red, lo que produce múltiples estimaciones independientes de la altura de las nubes. Estas estimaciones se filtran utilizando restricciones geométricas, métricas de calidad de correlación y criterios de plausibilidad física. El uso de múltiples distancias de cámara permite la sensibilidad a diferentes capas de nubes y garantiza una cobertura espacialmente coherente del área urbana y sus alrededores.

Palabras clave: Nubes, Cámaras de todo cielo, Estereoscopía

Cloud-height mapping from all-sky camera network

***Abstract**: This study presents a general framework for cloud detection and cloud-height retrieval using a network of 20 all-sky cameras distributed across the city of Valladolid (Spain) and its surrounding areas. All instruments are OMEA-3C-TF all-sky cameras operated and geometrically calibrated within the GOA-SCAN infrastructure of the Group of Atmospheric Optics. The proposed methodology combines image preprocessing, cloud-pixel segmentation, identification of matching cloud pixels, and stereoscopic reconstruction to derive instantaneous cloud-height fields. The system provides continuous observations every five minutes during daytime and every 2 minutes at night, allowing the monitoring of cloud spatial structure and short-term evolution. For each acquisition time, every camera is paired with all other cameras in the network, producing multiple independent cloud-height. These estimates are filtered using geometric constraints, correlation quality metrics, and physical plausibility criteria. The use of multiple camera distances enables sensitivity to different cloud layers and ensures spatially consistent coverage of the urban area and its surroundings.*

***Keywords**: Clouds, All-sky Cameras, Stereoscopy*

1. INTRODUCCIÓN

Las nubes desempeñan un papel fundamental en el balance energético de la Tierra al reflejar y absorber la radiación solar y térmica. Su capacidad para regular la energía en el sistema Tierra-atmósfera modula tanto la dinámica atmosférica a gran escala como los procesos regionales. Sin embargo, a pesar de su importancia, las retroalimentaciones entre nubes y atmósfera siguen siendo una de las mayores fuentes de incertidumbre en los modelos climáticos actuales (Stephens *et al*., 2005).

Para comprender este impacto radiativo, es esencial determinar la estructura vertical de las nubes, específicamente la altura de la base y del tope (normalmente expresados en inglés Cloud Base Height, CBH y Cloud Top Height, CTH). Estas variables también sirven como restricciones físicas para la clasificación de nubes. Además, el monitoreo espacial preciso de la CBH en tiempo real ha resultado ser muy útil para la predicción en tiempo real del recurso solar, clave en la producción de energías renovables.

Actualmente, existen diversas técnicas de teledetección para medir estas alturas, pero presentan limitaciones importantes. Los ceilómetros y lídares ofrecen alta resolución temporal, pero carecen de resolución espacial al medir solo en el cenit. Por otro lado, los satélites proporcionan cobertura global, pero sus resoluciones temporal y espacial suelen ser insuficientes para aplicaciones regionales o en tiempo real. Además, en muchos casos no pueden estimar la medida de la altura base de las nubes, solo la de la capa más alta.

Una alternativa son las cámaras de todo cielo (all-sky cameras). Estos dispositivos poseen un amplio campo de visión y alta resolución a bajo coste, además de ser más fáciles de manejar, sin partes móviles y pueden trabajar de forma automática. El uso de cámaras para identificar la cubierta nubosa o propiedades como el factor de modificación de la radiación solar por las nubes ya ha sido probado en trabajos previos (González-Fernández *et al*., 2024). También el empleo de técnicas estereoscópicas utilizando pares de cámaras para triangular la posición de las nubes y obtener su altura (Beekmans *et al*., 2016).

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar y validar una metodología refinada para generar mapas de altura de nubes que sea automática, reproducible, escalable y computacionalmente eficiente. Con esto se quiere demostrar que una red de cámaras desplegada por todo Valladolid puede superar las limitaciones de otros instrumentos y proporcionar una reconstrucción del campo nuboso.

2. INSTRUMENTACIÓN

2.1. Red PRESENTE

La red de medidas PRESENTE, situada en Valladolid (España), cuenta actualmente con 20 estaciones de medida desplegadas en edificios públicos. Está integrada dentro de la red GOA-SCAN, manejada por el Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid (GOA-UVa). Todas las cámaras instaladas se calibran geométricamente utilizando el software ORION (Antuña-Sánchez *et al*., 2022), que utiliza las posiciones conocidas de las estrellas. Esto permite conocer con precisión para cada píxel sus coordenadas de cenit y azimut (Román *et al*., 2025).

2.2. Cámaras de todo cielo

El instrumento empleado de cámara de todo cielo es el modelo OMEA-3C-TF, una versión modificada del modelo OMEA-3C de la casa comercial *Alcor Systems*. Utiliza un sensor CMOS SONY IMX178 RGB con una lente ojo de pez, protegidos por una cúpula de vidrio BK7 en una carcasa resistente a la intemperie. Incorpora un filtro tribanda en lugar de uno infrarrojo. Cada cámara está gestionada por un ordenador externo con el software GOA OMEA-Capture (Román *et al*., 2025), que automatiza la configuración de captura y el envío de datos. Las imágenes se toman cada 5 minutos de día y cada 2 minutos de noche. El instrumento captura secuencias multi-exposición en formato RAW para generar imágenes de Alto Rango Dinámico (HDR). Los tiempos de exposición se ajustan según el ángulo cenital solar y también diferenciando en el modo nocturno si hay presencia de luna o no (Román *et al*., 2025).

3. METODOLOGÍA

El proceso comienza con el emparejamiento de todas las imágenes simultáneas de las cámaras de la red PRESENTE para un instante de tiempo dado. Para cada pareja, las imágenes hemisféricas originales se proyectan sobre un plano horizontal común y se rotan para alinear sus filas (imágenes rectificadas). Esto permite realizar una correlación fila a fila entre los pares de imágenes con bajo coste computacional. Se almacenan las matrices de correlación entre los píxeles de una imagen con los de la otra y la posición de los píxeles que mejor correlacionan. Este emparejamiento inicial se realiza solo con cámaras con suficiente solapamiento de su campo de visión para aumentar la eficiencia del algoritmo, evitando cálculos innecesarios.

Una vez establecidas las correspondencias de píxeles, se utiliza la geometría del sistema y los ángulos de azimut y cenit de cada cámara para calcular la altitud mediante relaciones trigonométricas. Para asegurar la precisión, se realiza un análisis de sensibilidad desplazando la posición del píxel; si la diferencia entre alturas resultante supera el kilómetro, la estimación se descarta. Además, se aplican filtros de plausibilidad física que eliminan valores fuera del rango de 0 a 15 km o aquellos provenientes de ángulos azimutales extremos. Finalmente se conserva el valor de la mediana de las alturas de todos los emparejamientos entre imágenes y se revierte la rotación inicial para alinear los datos con el sistema de referencia norte-sur.

Para refinar los resultados, se aplica un filtro de mediana que elimina valores atípicos. Posteriormente se determinan las capas de nubes dominantes mediante un histograma de alturas, reteniendo solo los píxeles con valores de altura pertenecientes a los rangos de alturas más poblados.

Finalmente, las estimaciones de altura se georreferencian y se integran en una rejilla geográfica regular con una resolución de 0.0005°. Para garantizar la

fiabilidad del mapa final, solo se conservan las celdas que reciben información de al menos dos cámaras distintas y contienen cuatro o más puntos de altura. De esta forma se generan mapas de alturas máximas y mínimas junto con otros parámetros estadísticos, proporcionando una caracterización detallada de la estructura vertical y la variabilidad espacial del campo de nubes.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de la red PRESENTE para la reconstrucción tridimensional del campo nuboso. Cada cámara de la red permite obtener una estimación local de la altura de las nubes basada en las múltiples combinaciones con el resto. La Figura 1 ilustra cómo diferentes cámaras capturan el mismo campo nuboso, obteniendo muy buena resolución de la forma de las nubes. Esto demuestra la capacidad de este algoritmo también como segmentador e identificador de nubes en las imágenes. Aunque la red PRESENTE cuenta con 20 estaciones, la disponibilidad operativa puede variar debido a factores externos como paros en el suministro eléctrico o tareas de mantenimiento. En particular, para los resultados mostrados en la Figura 1, se utilizaron 15 cámaras, descartando aquellas que aún no estaban instaladas o que sufrieron cortes técnicos en ese instante.

El uso de diversas distancias entre cámaras permite al algoritmo ser sensible a diferentes capas de nubes simultáneamente. Con pares de cámaras alejados se aprecian las capas más altas y los pares más cercanos permiten más en detalle las nubes más bajas. Como se observa en la Figura 2, el sistema identifica variaciones espaciales en la altura, incluso en situaciones de nubosidad fragmentada.

Para comprobar la solidez de los resultados obtenidos, estos se han comparado con el producto de clasificación de escenas de Sentinel-2 (SCL, resolución de 60 m, Drusch *et al*., 2012). Dicho producto identifica cuatro clases relacionadas con las nubes (nubes con alta probabilidad, media probabilidad, cirros y cielo despejado) y seis clases para la superficie (sombras, vegetación, suelo desnudo o desierto, agua y nieve).

El método propuesto con las cámaras logra generar mapas regionales de la altura de la base de las nubes con una resolución de aproximadamente 50 m. La comparación punto a punto con el producto de clasificación de Sentinel-2 (Fig. 3) muestra un alto grado de coherencia espacial. El sistema basado en cámaras no solo coincide con la detección satelital (zonas verdes), sino que es capaz de detectar estructuras nubosas que el satélite podría clasificar de forma ambigua debido al bajo contraste de las nubes más finas.

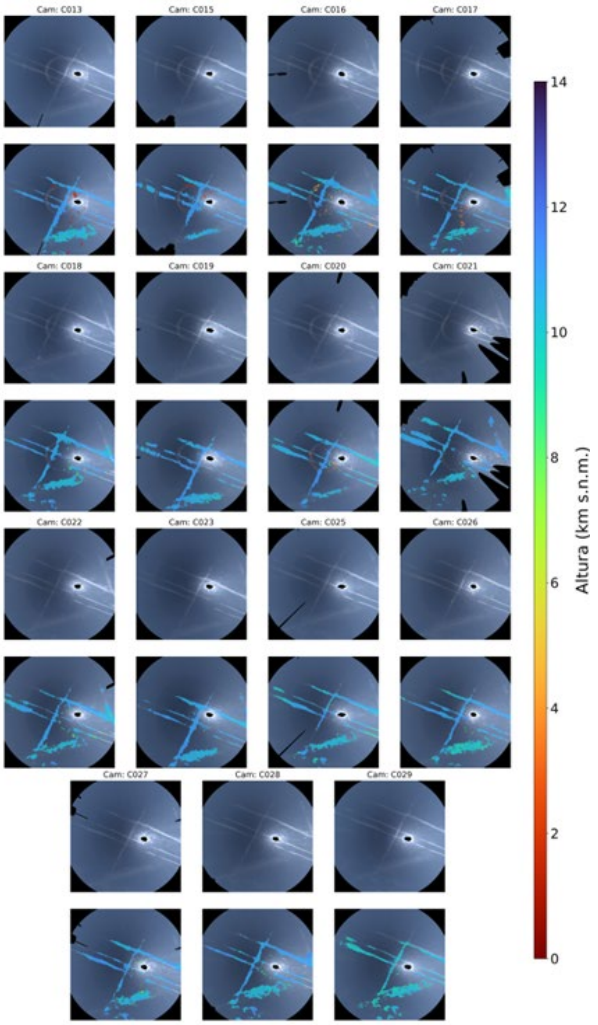


Figura 1. Imagen del cielo sin (arriba) y con (abajo) la altura de las nubes obtenida con todas las cámaras de la red PRESENTE para el 7 de julio de 2025 a las 15:50 UTC.

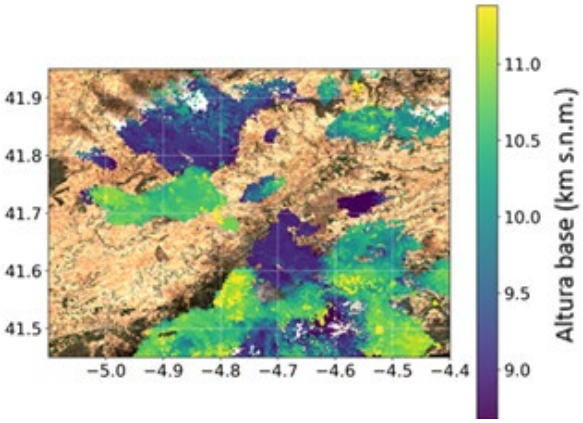


Figura 2. Mapa de nubes obtenido el 30 de agosto de 2025 a las 11:20 UTC sobre Valladolid mediante el método propuesto basado en la red de cámaras PRESENTE. El mapa de colores representa la altura de la base de las nubes. Los ejes representan las coordenadas geográficas en el sistema WGS84. La imagen de fondo corresponde al producto de color real de Sentinel-2.

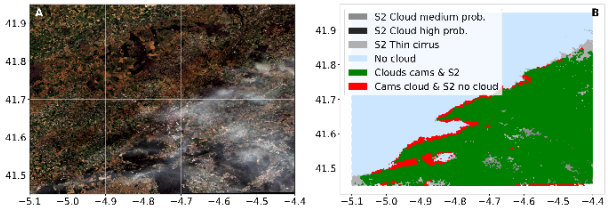


Figura 3. A la derecha la comparación del mapa de nubes obtenido el 24 de febrero de 2025 a las 11:20 UTC sobre Valladolid mediante el método propuesto basado en la red de cámaras y el producto de clasificación de Sentinel-2. A la izquierda la imagen en color real de Sentinel-2 del mismo instante. Los ejes representan las coordenadas geográficas en el sistema WGS84

5. CONCLUSIONES

El método propuesto resuelve la falta de resolución espacial de otros instrumentos de superficie y la baja frecuencia temporal de los satélites. Se ha logrado implementar un flujo de trabajo computacionalmente eficiente que facilita el monitoreo en tiempo real, ofreciendo mapas de altura de nubes con una frecuencia de hasta 2 minutos. La aplicación de restricciones geométricas y filtros estadísticos garantiza la calidad de los mapas generados. La capacidad de obtener la estructura vertical y espacial de las nubes de forma continua representa una herramienta de alto valor tanto para la mejora de modelos climáticos regionales, como para la validación/calibración de productos satelitales.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), bajo la subvención n.º PID2024-157697OB-I00. Esta investigación forma parte del proyecto TED2021-131211B-I00375, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR, y se basa en el trabajo de la Acción COST CA21119 HARMONIA.

Se agradece de igual modo el apoyo financiero de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León y de los Fondos FEDER (Referencia: CLU-2023-1-05). Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea a través del proyecto EUBURN-RISK (INTERREG-SUDOE; S2/2.4/F0327). Los autores agradecen el respaldo del Ministerio de Ciencia e Innovación de España a ACTRIS ERIC y a las Acciones de Intercambio de Personal Marie Skłodowska-Curie mediante el proyecto GRASP-SYNERGY (subvención n.º 101131631).

7. REFERENCIAS

Antuña-Sánchez, JC, Román, R, Bosch, JL, Toledano, C, Mateos, D., González, R., Cachorro, V., de Frutos, A. (2022). ORION software tool for the geometrical calibration of all-sky cameras. PLOS ONE,17(3), https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265959

Beekmans, C., Schneider, J., Läbe, T., Lennefer, M., Stachniss, C. and Simmer, C. (2016). Cloud photogrammetry with dense stereo for fisheye cameras. *Atmospheric Chemistry and Physics, (16)*. doi:10.5194/acp-16-14231-2016, 2016.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., and Bargellini, P. (2012) Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services, *Remote Sensing of Environment,(120)*,https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026.

Opportunities for Science, 2012.

González-Fernández, D., Román, R., Mateos, D., Herrero del Barrio, C., Cachorro, V. E., Copes, G., Sánchez, R., García, R. D., Doppler, L., Herrero-Anta, S., Antuña-Sánchez, J. C., Barreto, , González, R., Gatón, J., Calle, A., Toledano, C., and de Frutos, (2024) Retrieval of Solar Shortwave Irradiance from All-Sky Camera Images, *Remote Sensing, (16)*, https://doi.org/10.3390/rs16203821, 2024.

Román, R., González-Fernández, D., Antuña Sánchez, J. C., Herrero del Barrio, C., Herrero-Anta, S., Barreto, A., Cachorro, V. E., Doppler, L., González, R., Ritter, C., Mateos, D., Kouremeti, N., Copes, G., Calle, A., Granados-Muñoz, M. J., Toledano, C., and de Frutos, A. M. (2025) Star photometry with all-sky cameras to retrieve aerosol optical depth at night-time, *Atmospheric Measurement Techniques, (18)* https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-667, 2025.

Stephens, G. L. (2005), Cloud Feedbacks in the Climate System: A Critical Review, *Journal of Climate, (18)*, https://doi.org/10.1175/JCLI-3243.1, 2005.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.196

FLEX-E, el simulador end-to-end de la misión FLuorescence EXplorer (FLEX)

Ruiz-Verdú, Antonio [1] **Tenjo, Carolina** [1] **Martín, Ana Amelia** [2] **Falcão, António** [3] **Jacinto, Adrián** [1] **Isola, Claudia** [4] **Moreno, José** [1]

[1] Universidad de Valencia, España

[2] GMV Aerospace and Defence S.A.U., España

[3] INDRA - Deimos Engenharia, Portugal

[4] European Space Agency (ESA)

ORCID: Ruiz-Verdú 0000-0001-6832-3496 Moreno 0000-0002-5283-3333

Correspondencia: antonio.ruiz@uv.es carolina.tenjo@uv.es anamartin@gmv.com ajfalcao@indracompany.com adrian.jacinto@uv.es Claudia.Isola@esa.int jose.moreno@uv.es

RESUMEN

FLEX-E, el simulador extremo a extremo (end-to-end) de la misión tándem FLEX/S3 es una herramienta informática que simula el proceso completo de adquisición de escenas durante el desarrollo del sistema de observación (plataformas e instrumentos) y de los algoritmos de proceso. Con una arquitectura modular, incluye la simulación de la geometría de observación, un generador de escenas basado en modelos de transferencia radiativa, módulos de instrumento y algoritmos de proceso a nivel 1 (L1) y nivel 2 (L2). Durante las fases A/B (diseño preliminar) y C/D (cualificación y producción) FLEX-E ha permitido evaluar el cumplimiento de los requisitos de misión y la consolidación de los algoritmos de calibrado, corrección geométrica, co-registrado, corrección atmosférica y productos L2. Es también una herramienta clave en la fase actual, previa al lanzamiento del satélite (previsto para septiembre de 2026), en la que se prueban los procesadores operacionales, así como durante la fase de comisionado, en la que permitirá evaluar escenarios de ajuste de algoritmos L1 y L2.

Palabras clave: *FLEX, simulador de misión, generador de escenas, fluorescencia, fotosíntesis*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

FLEX-E, el simulador end-to-end de la misión FLuorescence EXplorer (FLEX)

Ruiz-Verdú, Antonio [1], Tenjo, Carolina [1], Martín, Ana Amelia [2], Falcão, António [3], Jacinto, Adrián [1], Isola, Claudia [4], Moreno, José [1]

[1] Universidad de Valencia, España.

0000-0001-6832-3496, antonio.ruiz@uv.es. ; carolina.tenjo@uv.es

adrian.jacinto@uv.es ; 0000-0002-5283-3333, jose.moreno@uv.es

[2] GMV Aerospace and Defence S.A.U., España

anamartin@gmv.com

[3] INDRA - Deimos Engenharia, Portugal.

ajfalcao@indracompany.com

[4] European Space Agency (ESA).

Claudia.Isola@esa.int

Resumen: FLEX-E, el simulador extremo a extremo (*end-to-end*) de la misión tándem FLEX/S3 es una herramienta informática que simula el proceso completo de adquisición de escenas durante el desarrollo del sistema de observación (plataformas e instrumentos) y de los algoritmos de proceso. Con una arquitectura modular, incluye la simulación de la geometría de observación, un generador de escenas basado en modelos de transferencia radiativa, módulos de instrumento y algoritmos de proceso a nivel 1 (L1) y nivel 2 (L2). Durante las fases A/B (diseño preliminar) y C/D (cualificación y producción) FLEX-E ha permitido evaluar el cumplimiento de los requisitos de misión y la consolidación de los algoritmos de calibrado, corrección geométrica, co-registrado, corrección atmosférica y productos L2. Es también una herramienta clave en la fase actual, previa al lanzamiento del satélite (previsto para septiembre de 2026), en la que se prueban los procesadores operacionales, así como durante la fase de comisionado, en la que permitirá evaluar escenarios de ajuste de algoritmos L1 y L2.

Palabras clave: FLEX, simulador de misión, generador de escenas, fluorescencia, fotosíntesis.

FLEX-E, the end-to-end simulator of the FLuorescence Explorer (FLEX) mission

***Abstract**: FLEX-E, the end-to-end simulator for the FLEX/S3 tandem mission, is a software tool that simulates the complete scene acquisition process during the development of the observation system (platforms and instruments) and the processing algorithms. With a modular architecture, it includes simulation of the observation geometry, a scene generator based on radiative transfer models, instrument modules, and processing algorithms at Level 1 (L1) and Level 2 (L2). During phases A/B (preliminary design) and C/D (qualification and production), FLEX-E has enabled the evaluation of mission requirements' compliance, as well as the consolidation of calibration, geometric correction, co-registration, atmospheric correction, and L2 algorithms. It is also a key tool in the current phase, prior to the satellite launch (scheduled for September 2026), in which the operational processors are tested, as well as during the commissioning phase, where it will allow for the evaluation of L1 and L2 algorithm tuning scenarios.*

***Keywords**: FLEX, mission simulator, scene generation, fluorescence, photosynthesis.*

1. INTRODUCCIÓN

La misión espacial FLEX (FLuorescence Explorer) es la octava misión científica del programa Earth Explorer de la Agencia Espacial Europea (ESA). Seleccionada en 2015 tras una fase A/B competitiva (ESA, 2015), es la primera misión específicamente diseñada para la cuantificación de la actividad fotosintética de los ecosistemas terrestres, mediante la estimación de la fracción de energía solar absorbida por la vegetación y sus vías de disipación (fotoprotección, disipación térmica y emisión de fluorescencia).

El principal desafío de FLEX es la obtención de la emisión de fluorescencia de la clorofila-a inducida por el sol (*Sun Induced chlorophyll Fluorescence*, SIF), que es una

señal muy baja para cuya medida es necesaria una elevada sensibilidad y resolución ultraespectral en las bandas de absorción del oxígeno atmosférico (Drusch *et al*. 2017). Para cuantificar la disipación no fotoquímica (NPQ) se requiere información hiperespectral en la región 500-780 nm (Van Wittenberghe *et al*., 2024) y medidas en el infrarrojo térmico, mientras que la estimación de la radiación solar fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (APAR) requiere todo el intervalo de 400 a 700 nm (Verrelst *et al*., 2015).

FLEX consta de una plataforma con el instrumento FLORIS (FLuORescence Imaging Spectrometer), consistente en dos espectrómetros de barrido, que cubren, respectivamente, el rango espectral 500-780 nm con 0,6 nm de muestreo espectral (FLORIS-LR) y las regiones de absorción del oxígeno atmosférico en el rojo (O2B) e infrarrojo (O2A) con tan solo 0,093 nm de muestreo espectral (FLORIS HR). El satélite y el instrumento están en la última fase de cualificación y el lanzamiento está previsto en septiembre de 2026.

FLEX orbitará en tándem con Sentinel 3 (S3B), con un ancho de imagen de 150 km (coincidente con la cámara 4 de OLCI) y una resolución espacial de 300 m. La adquisición cuasi síncrona con S3 permitirá utilizar la información de OLCI y SLSTR, complementaria con FLORIS, para la obtención de los productos L2 y L3 de FLEX (Figura 1).

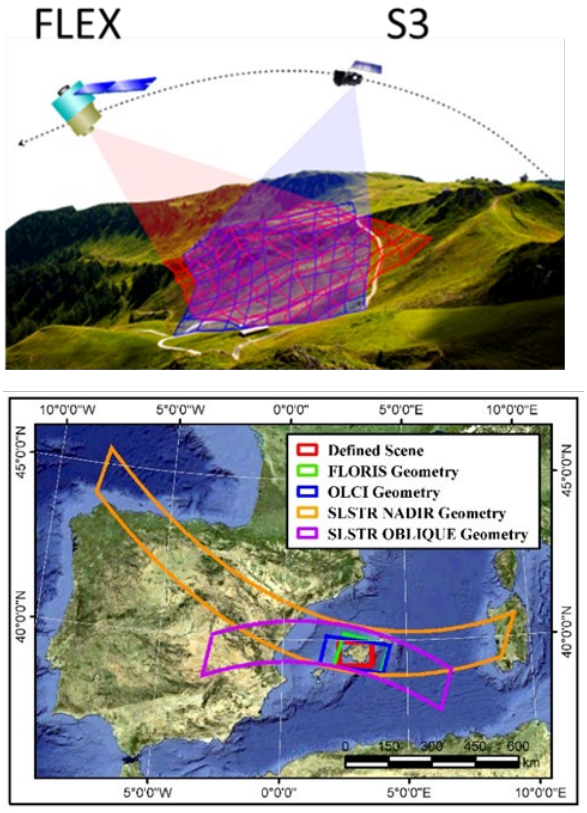


Figura 1. Adquisición en tándem de FLEX y S3 y superposición de las imágenes obtenidas.

Un simulador de misión extremo a extremo (*end-to-end simulato*r o E2ES) es una herramienta informática que permite la evaluación de los requisitos de misión, la consolidación del sistema y los requisitos técnicos, durante sus diferentes fases de desarrollo. En una misión científica como FLEX, en la que se pretende poner a prueba un concepto novedoso en Observación de la Tierra, el E2ES, denominado FLEX-E es especialmente necesario y requiere un mayor nivel de complejidad que los simuladores diseñados para misiones operacionales,

El proyecto FLEX-E comenzó en 2017, tras la selección de FLEX como Earth-Explorer 8, partiendo de un prototipo de E2ES (Vicent *et al*., 2016) diseñado durante las fases A/B (estudio de viabilidad y diseño preliminar). Y ha evolucionado durante la fase C/D (diseño detallado, calificación y producción) para convertirse en una herramienta de apoyo en el desarrollo y validación de los algoritmos de proceso. Es una herramienta flexible que puede generar muy diversos conjuntos de datos de entrada (escenas de radiancia en el techo de la atmósfera para diferentes tipos de superficie, atmósfera y geometrías de observación) sobre las que probar los prototipos de procesador L1 y L2 y, finalmente, los procesadores operacionales, antes del lanzamiento del satélite.

2. DISEÑO Y ARQUITECTURA DE FLEX-E

Cada uno de los módulos de FLEX-E ha sido desarrollado independientemente por socios industriales y científicos y se ha integrado en un entorno de simulación genérico basado en OpenSF, en el que se configuran y ejecutan las simulaciones extremo a extremo. Para facilitar la operatividad de FLEX-E, cada módulo se ejecuta secuencialmente, como se muestra en la Figura 2.

Los Módulos de Geometría (GM para FLORIS y S3G para Sentinel-3) se ejecutan primero, proporcionando la geometría de observación de cada sensor en cada punto de la órbita, partiendo de coordenadas o tiempos orbitales definidos por el usuario. Posteriormente, el Módulo Generador de Escenas (SGM) utiliza la geometría de observación, junto con los parámetros de configuración, para generar escenas de alta resolución espacial y espectral, para cada sensor de la misión tándem FLEX/S3 (FLORIS-HR, FLORIS-LR, OLCI y SLSTR).

El SGM, desarrollado en la Universidad de Valencia (Tenjo *et al*., 2017), permite simular escenas sintéticas, con patrones geométricos simples o con texturas realistas, en las que el usuario define las propiedades biofísicas de la vegetación (como concentración de clorofila o índice de área foliar, entre otras) y el tipo de suelo, así como la composición de la atmósfera (perfiles de vapor de agua, aerosoles, temperatura, nubosidad). Para las condiciones de iluminación de la escena, el SGM propaga la radiación solar incidente mediante el código de transferencia radiativa MODTRAN y simula la interacción de esa radiación con el modelo SCOPE (Yang *et al*, 2021), teniendo en cuenta los efectos de la altitud y el relieve mediante modelos digitales de elevaciones. La radiación reflejada y emitida es finalmente propagada desde la superficie (*Top-Of-Canopy*, TOC) hasta el techo de la atmósfera (*Top-Of-Atmosphere*, TOA), tal y como se resume en la Figura 3,

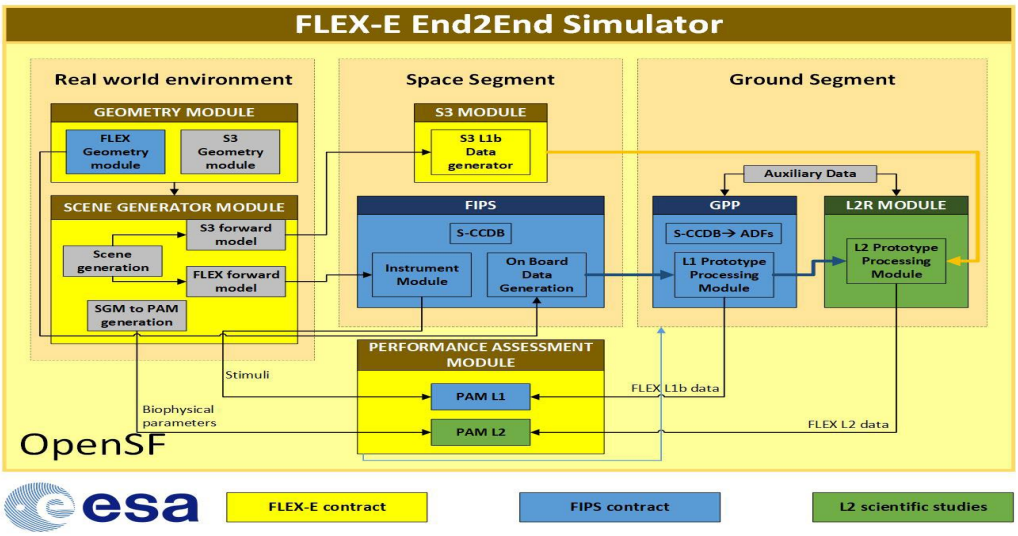


Figura 2. Arquitectura de FLEX-E.

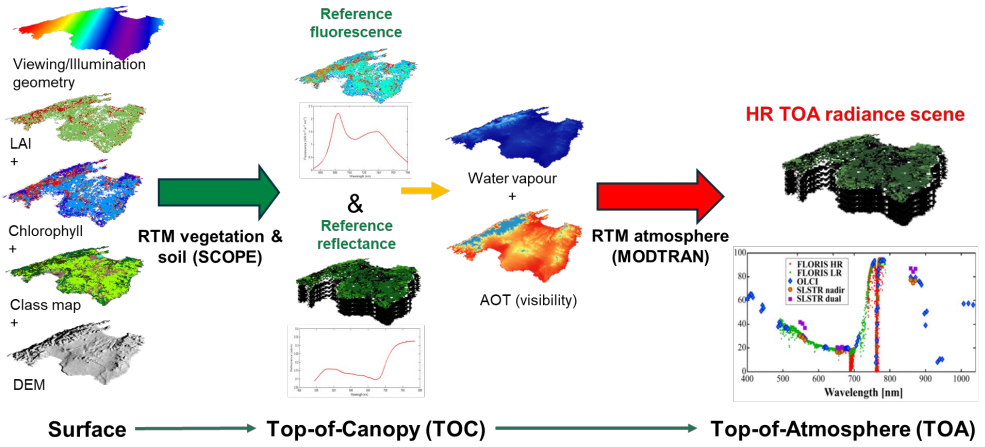


Figura 3. Ejemplo de generación de escenas TOA por el Módulo generador de Escenas (SGM).

Estas escenas TOA se proporcionan posteriormente a los módulos de Instrumento: *FLEX Instrument Performance Simulator* (FIPS) y *Sentinel-3 Instrument Module* (S3M). FIPS, proporcionado por la industria, simula la creación de los datos brutos a bordo (L0) partiendo de las especificaciones de los espectrómetros de FLORIS, con sus diferentes fuentes de ruido radiométrico y espectral, que se pueden seleccionar independientemente, para evaluar su impacto en los productos L1 y L2. A su vez los datos L0 se proporcionan al Ground Processor Prototype (GPP) que es el prototipo del procesador operacional de Nivel 1 (L1OP), que hará parte del segmento terreno de la misión.

El GPP genera las escenas L1B (radiancias TOA) en el formato final de los productos FLORIS. Por su parte, el S3M es una versión simplificada del procesador operacional de Sentinel-3, generando escenas simuladas L1B de OLCI y SLSTR, partiendo de los mismos datos de referencia del SGM.

Finalmente, los datos L1B son leídos por el procesador de nivel 2, inicialmente denominado *L2 Retrieval Module* (L2RM) y que en la fase actual del proyecto se denomina L2PP (*L2 Prototype Processor*), prototipo del procesador operacional del segmento terreno (L2OP).

El L2PP contiene los algoritmos científicos que obtienen los productos L2 especificados en los requisitos de misión. Se divide a su vez en varios submodulos encadenados:

- L1C, que realiza la proyección y el co-registrado de las escenas TOA de los diferentes instrumentos sobre una geometría de referencia común.
- L2A, que lleva a cabo la caracterización y corrección atmosférica, a partir de las radiancias TOA del L1C, para obtener la denominada reflectividad aparente Top-of-Canopy, que resulta de la combinación de la

reflectividad real y la emisión de fluorescencia (Sabater *et al*., 2017).

- L2B, que descompone la señal de la reflectividad aparente para obtener la curva de emisión de fluorescencia de la clorofila- a (Sun-Induced-Fluorescence, SIF) (Cogliati *et al*, 2015).
- L2C, que genera productos biofísicos de la vegetación y suelos, estima la disipación no fotoquímica (NPQ) y, finalmente la tasa de transporte electrónico en la fotosíntesis (ETR).

3. USO DE FLEX-E EN LA EVALUACIÓN DE LOS REQUISITOS DE MISIÓN

La función principal de FLEX-E es la evaluación de los requisitos de misión L1 y L2 para diferentes escenarios (tipos de escenas, ruidos instrumentales, versiones de los algoritmos de proceso), mediante la comparación de los productos con los datos de referencia generados por el SGM.

Para ello existen dos módulos de evaluación del desempeño, a nivel 1 (*L1 Performance Assessment Module*) y a nivel 2 (*L2 Performance Evaluation Module*), que hacen una comparación píxel a píxel y generan estadísticos de error, mapas, histogramas y otras salidas gráficas que permiten determinar si el producto cumple con el documento de requisitos de la misión (ESA, 2024).

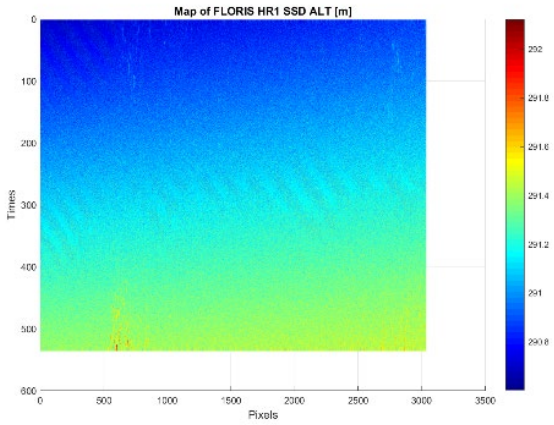


Figura 4. Ejemplo de resultado del módulo L1 PAM.

4. CONCLUSIONES

FLEX-E es el simulador integral del desempeño de la misión tándem FLEX/S3

Es la herramienta clave para demostrar la viabilidad del concepto de la misión FLEX y la base para el diseño del segmento terreno.

También es una herramienta científica versátil que permite simular la variabilidad de las condiciones terrestres, atmosféricas y de observación a las que se enfrentará la misión tándem FLEX-Sentinel-3.

Permite evaluar el impacto, en los productos científicos L2, de las limitaciones o restricciones impuestas por las soluciones técnicas adoptadas para el instrumento y la plataforma.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el proyecto de la Agencia Espacial europea (ESA) "*FLEX L2 End to End Mission Performance Simulator*" (Contrato 4000119707/17/NL/MP). https://leoipl.uv.es/l2e2es/

6. REFERENCIAS

Cogliati, S., Verhoef, W., Kraft, S., Sabater, N., Alonso, L., Vicent, J., ... & Colombo, R. (2015). Retrieval of sun-induced fluorescence using advanced spectral fitting methods. *Remote Sensing of Environment, 169*, 344-357.

Drusch, M., Moreno, J., Del Bello, U., Franco, R., Goulas, Y., Huth, A., ... & Verhoef, W. (2016). The fluorescence explorer mission concept—ESA's earth explorer 8. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55*(3), 1273-1284.

ESA. (2015) "Report for mission selection: FLEX," ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Tech. Rep. ESA SP-1330/2, Jun. 2015.

ESA, "FLEX Earth Explorer 8 Mission Requirements Document - FLEX MRD". ESAEOP-SM/2221/MDru-md. Version 3.1. Dec. 2024

Sabater, N., Vicent, J., Alonso, L., Cogliati, S., Verrelst, J., & Moreno, J. (2017). Impact of atmospheric inversion effects on solar-induced chlorophyll fluorescence: Exploitation of the apparent reflectance as a quality indicator. *Remote Sensing, 9*(6), 622.

Tenjo, C., Rivera-Caicedo, J. P., Sabater, N., Servera, J. V., Alonso, L., Verrelst, J., & Moreno, J. (2017). Design of a generic 3-D scene generator for passive optical missions and its implementation for the ESA's FLEX/Sentinel-3 tandem mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56*(3), 1290-1307.

Van Wittenberghe, S., Amin, E., Pascual-Venteo, A. B., Pérez-Suay, A., Tenjo, C., Sabater, N., ... & Moreno, J. (2024). Retrieval of leaf-level fluorescence quantum efficiency and NPQ-related xanthophyll absorption through spectral unmixing strategies for future VIS-NIR imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment, 300*, 113879.

Verrelst, J., van der Tol, C., Magnani, F., Sabater, N., Rivera, J. P., Mohammed, G., & Moreno, J. (2016). Evaluating the predictive power of sun-induced chlorophyll fluorescence to estimate net photosynthesis of vegetation canopies: A SCOPE modeling study. *Remote Sensing of Environment, 176*, 139-151.

Vicent, J., Sabater, N., Tenjo, C., Acarreta, J. R., Manzano, M., Rivera, J. P., ... & Moreno, J. (2016). FLEX end-to-end mission performance simulator. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54*(7), 4215-4223.

Yang, P., Prikaziuk, E., Verhoef, W., & van Der Tol, C. (2021). SCOPE 2.0: A model to simulate vegetated land surface fluxes and satellite signals. *Geoscientific Model Development, 14*(7), 4697-4712.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.209

Intercomparación "outdoor" de espectrorradiómetros de campo dentro del plan de calibración y validación SpaFLEX

Muela Pillajo, Jimmy A. [1] **Jiménez Michavila, Marcos** [1] **Peón Garcia, Juan J.** [1] **Gutiérrez de la Cámara Ara, Óscar** [1] **Muñoz Sánchez, Félix** [1] **Cendrero-Mateo, Mª Pilar** [2] **Moncholí-Estornell, Adrián** [2] **Chardi-Raga, Cynthia** [2] **Gómez-Giraldez, Pedro J.** [3] **Aragonés, David** [3]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, España

[2] Universidad de Valencia, Paterna, España

[3] Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC), Sevilla, España

ORCID: Muela Pillajo 0009-0002-9524-5483 Jiménez Michavila 0000-0002-6852-2732 Peón Garcia 0000-0001-7551-2236 Gutiérrez de la Cámara Ara 0000-0003-2555-9292 Muñoz Sánchez 0000-0002-6421-8725 Cendrero-Mateo 0000-0001-5887-7890 Moncholí-Estornell 0000-0002-8832-2594 Chardi-Raga 0009-0007-7886-4801 Gómez-Giraldez 0000-0002-1247-7557 Aragonés 0000-0003-4989-9005

Correspondencia: jmuepil@inta.es jimenezmm@inta.es jpeogar@inta.es gutierrezcao@inta.es munozsf@inta.es m.pilar.cendrero@uv.es adrian.moncholi@uv.es cynthia.chardi@uv.es pedro.gomez@ebd.csic.es daragones@ebd.csic.es

RESUMEN

El proyecto SpaFLEX está implementando un sistema integral de Calibración y Validación (Cal/Val) para la misión en tándem Fluorescence Explorer-Sentinel 3 (FLEX-S3). Con el fin de alcanzar medidas fiduciales in-situ, SpaFLEX establece un protocolo de intercomparaciones en interior y exterior de espectrorradiómetros de campo. En este trabajo se presenta el experimento de intercomparación llevado a cabo en conjunto con la campana de Cal/Val en Doñana (Huelva, España) en Julio de 2025. En una configuración de mesas y trípodes, se registraron conjuntos de medidas de varios objetivos y paneles de referencia con diferentes propiedades de reflectancia. Para la adquisición de datos se emplearon cuatro espectrorradiómetros con diferentes características (ASD FieldSpec 3 y FLOX). Como último paso del protocolo de intercomparación, con el objetivo de evaluar la consistencia e interoperabilidad de los instrumentos empleados durante la campaña, se realizó un chequeo radiométrico y espectral de radiancia (L) e irradiancia (E) frente a las simulaciones de L y E del código de transferencia radiativa LibRadtran. Los resultados indican que existen diferencias significativas entre las mediciones realizadas con el ASD FieldSpec 3 y las realizadas con FLOX. Por otro lado, las comparaciones intra-instrumento revelaron una mayor concordancia. El uso de simulaciones radiativas como referencia complementaria demuestra ser una herramienta eficaz para reforzar la robustez del protocolo y apoyar la evaluación de la calidad de las mediciones en el contexto de actividades de Cal/Val de FLEX.

Palabras clave: *SpaFLEX, Cal/Val, espectrorradiómetros, intercomparación, LibRadtran*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Intercomparación “outdoor” de espectrorradiómetros de campo dentro del plan de calibración y validación SpaFLEX

Muela Pillajo, Jimmy A. [(1)], Jiménez Michavila, Marcos [(1)], Peón Garcia, Juan J. [(1)], Gutiérrez de la Cámara Ara, Óscar [(1)], Muñoz Sánchez, Félix [(1)], Cendrero-Mateo, Mª Pilar [(2)], Moncholí-Estornell, Adrián [(2)], Chardi-Raga, Cynthia [(2)], Gómez-Giraldez, Pedro J. [(3)], Aragonés, David [(3)]

[(1)] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, España.

0009-0002-9524-5483, jmuepil@inta.es ; 0000-0002-6852-2732, jimenezmm@inta.es

0000-0001-7551-2236, jpeogar@inta.es ; 0000-0003-2555-9292, gutierrezcao@inta.es

0000-0002-6421-8725, munozsf@inta.es.

[(2)] Universidad de Valencia, España.

0000-0001-5887-7890, m.pilar.cendrero@uv.es ; 0000-0002-8832-2594, adrian.moncholi@uv.es

0009-0007-7886-4801, cynthia.chardi@uv.es.

[(3)] Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC), España.

0000-0002-1247-7557, pedro.gomez@ebd.csic.es ; 0000-0003-4989-9005, daragones@ebd.csic.es

Resumen: El proyecto SpaFLEX está implementando un sistema integral de Calibración y Validación (Cal/Val) para la misión en tándem Fluorescence Explorer-Sentinel 3 (FLEX-S3). Con el fin de alcanzar medidas fiduciales in-situ, SpaFLEX establece un protocolo de intercomparaciones en interior y exterior de espectrorradiómetros de campo. En este trabajo se presenta el experimento de intercomparación llevado a cabo en conjunto con la campana de Cal/Val en Doñana (Huelva, España) en Julio de 2025. En una configuración de mesas y trípodes, se registraron conjuntos de medidas de varios objetivos y paneles de referencia con diferentes propiedades de reflectancia. Para la adquisición de datos se emplearon cuatro espectrorradiómetros con diferentes características (ASD FieldSpec 3 y FLOX). Como último paso del protocolo de intercomparación, con el objetivo de evaluar la consistencia e interoperabilidad de los instrumentos empleados durante la campaña, se realizó un chequeo radiométrico y espectral de radiancia (L) e irradiancia (E) frente a las simulaciones de L y E del código de transferencia radiativa LibRadtran. Los resultados indican que existen diferencias significativas entre las mediciones realizadas con el ASD FieldSpec 3 y las realizadas con FLOX. Por otro lado, las comparaciones intra-instrumento revelaron una mayor concordancia. El uso de simulaciones radiativas como referencia complementaria demuestra ser una herramienta eficaz para reforzar la robustez del protocolo y apoyar la evaluación de la calidad de las mediciones en el contexto de actividades de Cal/Val de FLEX.

Palabras clave: SpaFLEX, Cal/Val, espectrorradiómetros, intercomparación, LibRadtran

Outdoor intercomparison of field spectroradiometers within the SpaFLEX calibration and validation plan

***Abstract**: The SpaFLEX project is implementing a comprehensive Cal/Val plan for the Fluorescence Explorer – Sentinel 3 tandem mission (FLEX-S3). In order to achieve in-situ fiducial measurements, SpaFLEX establishes a protocol for indoor and outdoor intercomparisons of field spectroradiometers. This work presents the intercomparison experiment carried out in Doñana (Huelva, Spain) in July 2025. At a set-up with tables and tripods, sets of measurements were recorded for various targets and reference panels with different reflectance properties. Four spectroradiometers with distinct characteristics were employed for data acquisition (ASD FieldSpec 3 and FLOX). At the final step of the intercomparison protocol, in order to evaluate the consistency, and interoperability of the instruments employed during the campaign the L and E measurements were checked radiometrically and spectrally against LibRadtran radiative transfer code L and E simulations. The results indicate that there are significant differences between the ASD Fieldspec 3 and FLOX measurements. In contrast, intra-instrument comparisons revealed greater agreement. The use of radiative transfer simulations as a complementary reference proves to be an effective strategy to strengthen the robustness of the protocol and support the assessment of measurement quality within FLEX calibration and validation activities.*

***Keywords**: SpaFLEX, Cal/Val, spectroradiometers, intercomparison, LibRadtran*

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo nace dentro del marco del proyecto SpaFLEX (SpaFLEX.org), liderado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) que coordina el plan nacional de Calibración y Validación (Cal/Val) para la misión FLuorescence Explorer-Sentinel 3 (FLEX-S3) de la Agencia Espacial Europea (ESA). El INTA aspira a ser fundamental en el desarrollo de dicha misión y para ello, contribuye con sus avanzados sensores aerotransportados hiperespectrales y de fluorescencia de clorofila, en colaboración con equipos interdisciplinares de la Universitat de València (LEO-UV) y la Estación Biológica de Doñana (LAST-EBD) (Gómez-Giráldez *et al*., 2025).

En este enfoque, la espectrorradiometría juega un papel fundamental al ser una técnica usada para caracterización de superficies, desarrollo de modelos empíricos o físicos en varias disciplinas y apoyo a la Cal/Val en teledetección y la evaluación de incertidumbre (Badura & Dąbski, 2022). Dicha técnica es posible gracias a los espectrorradiómetros que permiten evaluar la fisiología de la vegetación, estudiar ecosistemas, agricultura de precisión y validar productos de teledetección. Sin embargo, puesto que estos instrumentos suelen caracterizarse y calibrarse en un laboratorio, bajo condiciones ambientales y de iluminación estables (Pacheco-Labrador et al., 2024), al momento de usarlos en el campo, surgen diversas dificultades y factores (inestabilidades ambientales, variaciones de temperatura, humedad, polvo, y otros) que conllevan a diferencias importantes en el registro de mediciones, provocando mayor o menor incertidumbre y dificultando la exactitud de los datos, haciendo más difícil su comparación.

Por ello, el objetivo de este trabajo es evaluar y proponer un protocolo de inter e intra-comparación en exteriores para espectrorradiómetros de campo (ASD FieldSpec 3, FLuorescence bOX) en el marco del plan de Cal/Val de FLEX-S3, utilizando simulaciones de transferencia radiativa (LibRadtran) como referencia física. A partir de esta intercomparación, lo que se busca es garantizar una consistencia entre las medidas registradas en campo, dentro de unas condiciones ambientales y técnicas lo más similares posibles, para que puedan ser un referente sólido en los futuros proceso de Cal/Val de la misión FLEX-S3; de esta forma, poder aumentar la calidad y precisión de los productos de SIF y reflectancia.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Descripción de la campaña

Este trabajo presenta los resultados de un experimento de intercomparación radiométrica en exteriores realizado el 7 de julio de 2025 en el marco de la campaña de Cal/Val del proyecto SpaFLEX, llevada a cabo en el Parque Natural de Doñana, Huelva, España.

La campaña se desarrolló bajo condiciones atmosféricas favorables, caracterizadas por cielos mayormente despejados y baja variabilidad nubosa durante el periodo de adquisición, todo ello permitió realizar las mediciones bajo un régimen de iluminación solar estable. La zona de medida corresponde a un área abierta con topografía prácticamente plana y sin obstáculos cercanos que pudieran producir sombras o reflexiones.



Figura 1. Campaña de Cal/Val del proyecto SpaFLEX en el Parque Natural de Doñana (Huelva, España).

2.2. Descripción de la instrumentación

Para este experimento se emplearon cuatro espectrorradiómetros, cada uno con características espectrales y radiométricas propias:

- Dos espectrorradiómetros ASD FieldSpec3 (serie 16040) y ASD FieldSpec4 (serie 18864) (Malvern Panalytical, Reino Unido), con rango espectral nominal de 350–2500 nm y configuración VNIR + SWIR. Adecuados para mediciones de reflectancia y radiancia de campo. El instrumento ASD 16040 se calibró en abril de 2021 y el ASD 18864, en noviembre de 2020.
- Dos sistemas FLOX (JB Hyperspectral Devices, Düsseldorf, Alemania), consta de dos módulos: FLUO (650–800 nm), con alta resolución para detectar la señal SIF en las líneas de absorción de oxígeno (O_2A y O_2B), y el módulo FULL, que cubre un rango de 400 a 1000 nm para la medición de reflectancia. El sistema FLOX JB-022 fue calibrado en mayo de 2025 y FLOX JB-060 se calibró en junio de 2025.

2.3. Adquisición de datos

2.3.1. Condiciones Meteorológicas

Durante la intercomparación se prestó especial atención a la monitorización de las condiciones atmosféricas y radiación solar, factores que pueden introducir variabilidad significativa en las mediciones espectrales. Además, se caracterizó el estado de la atmósfera mediante un fotómetro solar Microtops II que proporcionó medidas de espesor óptico de aerosoles (AOD) y contenido de vapor de agua, necesarios para la posterior simulación de transferencia radiativa.

2.3.2. Procedimiento de medición

Los cuatro sensores se instalaron en un soporte común (trípode modificado) sobre una mesa de trabajo, alineando las fibras ópticas en una geometría de observación al Nadir, Figura 1. Cada instrumento fue operado por un técnico dedicado, responsable de la adquisición de datos y del registro de la información operativa. Sincronizaron los espectrorradiómetros a la hora UTC+0 y se encendieron 30 minutos antes del inicio para asegurar la estabilidad térmica de los detectores.

Se emplearon los siguientes paneles de referencia:

- Panel Blanco de Referencia (WR): Panel de Spectralon (Labsphere Inc.) de ~99% de reflectancia (calibrado), tamaño [10 × 10 cm]
- Panel Gris de Referencia (GRAY): Spectralon de ~25% de reflectancia, tamaño [10 × 10 cm]

La adquisición se organizó en 5 rondas temporales. Cada ronda, siguió la secuencia: *WR → GRAY → WR*.

2.4. Procesamiento de datos

Se inició con un preprocesado que consistió en aplicar los respectivos ficheros de calibración para obtener las radiancias en el caso del ASD y de las radiancias e irradiancias para FLOX. Se promediaron las repeticiones sobre cada panel para tener la media representativa de cada panel en cada ronda.

Dado que los sensores FLOX y ASD presentan diferentes Funciones de Respuesta Espectral (SRF) y muestreos, la comparación directa no es posible. Por ello, se definió una "malla espectral común" correspondiente a la intersección de los rangos espectrales de los instrumentos.

Además, los espectros de alta resolución del FLOX(E_{FLOX}) fueron convolucionados utilizando las funciones de respuesta gaussianas del ASD (SRF_{ASD}).

2.5. Modelado de Transferencia Radiativa

Para validar la precisión absoluta de los sensores, se generaron simulaciones de irradiancia total (directa + difusa) (E_{model}), utilizando el código de transferencia radiativa LibRadtran. El modelo fue alimentado con los parámetros atmosféricos medidos in situ por el Microtops II (AOD, Vapor de Agua, Ozono) y la geometría solar exacta (SZA) del momento de cada ronda de medición.

2.6. Intercomparación y análisis de métricas

Para evaluar cuantitativamente el grado de concordancia entre instrumentos y su proximidad a la referencia física simulada con LibRadtran, se calcularon las siguientes métricas espectrales estándar:

Bias espectral: $Bias(\lambda) = E_{ins}(\lambda) - E_{model}(\lambda)$ (1)

Error rel. espectral: $RE(\lambda) = \frac{E_{inst} - E_{model}}{E_{model}} \times 100$ (2)

RMSE espectral: $RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{N}\sum(E_i - E_{model})^2}$ (3)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez procesados los datos y homogeneizados espectralmente, se procedió con la intercomparación espectral entre los instrumentos de campo (ASD y FLOX) y las simulaciones obtenidas mediante el modelo de transferencia radiativa LibRadtran.

La Figura 2 muestra la comparación de irradiancia espectral medida por los sistemas FLOX y ASD junto con la simulación radiativa para la quinta ronda. Se puede apreciar como la curva del ASD presenta valores sistemáticamente superiores a los registrados por FLOX en gran parte del dominio espectral analizado. Además, el espectro simulado mediante LibRadtran se sitúa entre ambos instrumentos, lo que sugiere que cada sensor presenta un sesgo característico respecto al modelo. La forma espectral general se conserva entre los tres, indicando coherencia en la estructura radiativa y ausencia de desviaciones espectrales severas.

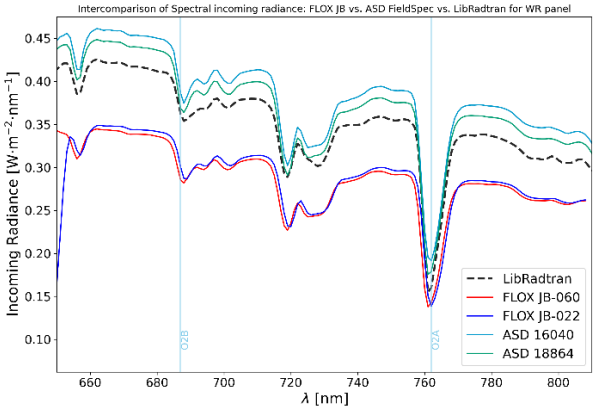


Figura 2. Comparación de irradiancia espectral entre los instrumentos FLOX JB y ASD FieldSpec frente a la simulación radiativa de LibRadtran. Las bandas O_2B ($\sim 687\ nm$) y O_2A ($\sim 760\ nm$) se indican mediante líneas verticales celestes.

La figura 3 presenta la comparación de la radiancia reflejada medida por los cuatro instrumentos enfocándose específicamente en el comportamiento de los espectrómetros en módulo "FULL" de los sistemas FLOX. Se aprecia saturación de los valores registrados por los sistemas FLOX en el rango $\sim 450 - 680\ nm$.

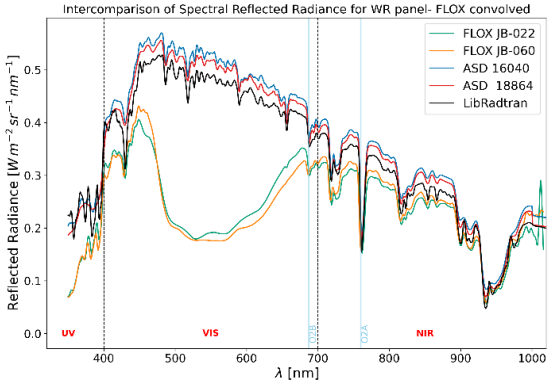


Figura 3. Comparación de radiancia espectral reflejada entre los cuatro espectrorradiómetros frente a la simulación

radiativa de LibRadtran. Las bandas O_2B $(\sim 687\ nm)$ y O_2A $(\sim 760\ nm)$ se indican mediante líneas verticales celestes.

La Figura 4 muestra los espectros de reflectancia aparente, calculada como el cociente entre la radiancia reflejada y la irradiancia. Se compararon los dos sistemas FLOX (módulo FLUO) y los dos ASD FieldSpec. El resultado muestra una alta concordancia entre los espectrorradiómetros con valores que oscilan aproximadamente entre 0,23 y 0,25, situándose las estimaciones de ASD entre las obtenidas por ambos sistemas FLOX. Esto permite verificar una buena una buena consistencia inter-instrumental en la estimación de la reflectancia aparente en mediciones de campo.

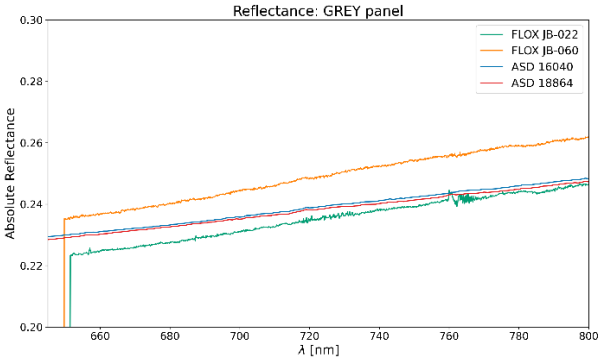


Figura 4. Intercomparación de la Reflectancia Absoluta entre las FLOX JB en modo FLUO y los ASD FieldSpec para el panel Gris.

Además del análisis gráfico, se calcularon métricas estadísticas estándar, recopiladas en la Tabla 1, que permiten sintetizar las diferencias espectrales y compararlas de forma objetiva.

Tabla 1. Métricas de intercomparación para ASD y FLOX JB respecto a LibRadtran.

Instrumento	Bias	RMSE	Error Relativo
ASD 16040	0.0241	0.0295	9.20 %
ASD 18864	0.0136	0.0211	6.29 %
FLOX-022-MP [FULL]	−0.0617	0.0673	18.08 %
FLOX-022-MP [FLUO]	−0.0600	0.0612	17.09 %
FLOX-060-MP [FULL]	−0.0625	0.0732	18.46 %
FLOX-060-MP [FLUO]	−0.0640	0.0650	18.23 %

El bias espectral confirma las tendencias observadas en las gráficas. Los instrumentos ASD presentan un sesgo positivo moderado respecto a la simulación, indicando una ligera sobreestimación de la irradiancia, mientras que los sistemas FLOX presentan sesgos negativos más pronunciados, lo que sugiere una posible subestimación radiométrica consistente.

El RMSE proporciona una medida integrada del error a lo largo del espectro. Los valores obtenidos muestran que el ASD presenta menor dispersión respecto al modelo. Por otro lado, FLOX JB muestra mayor desviación total, coherente con su mayor error relativo.

El error relativo medio confirma que ambos instrumentos se mantienen dentro de rangos aceptables para aplicaciones de Cal/Val, aunque con claras diferencias: ~6–9% para ASD y ~17–18% para FLOX.

4. CONCLUSIONES

Se ha realizado un ensayo de intercomparación de espectrorradiómetros de campo que va encaminado al desarrollo de un protocolo para estimar la consistencia de las medidas de estos instrumentos. La incorporación de simulaciones de transferencia radiativa (LibRadtran) resultó crítica para caracterizar el desempeño de los sensores. La irradiancia simulada por LibRadtran se sitúa consistentemente entre las medidas de los ASD (sesgo positivo) y los sistemas FLOX (sesgo negativo) confirmando la consistencia física de las observaciones.

Este comportamiento de acotación *("bracketing")* valida el protocolo planteado de intercomparación y determina que la combinación de medidas de campo y modelado físico es indispensable para establecer una incertidumbre radiométrica robusta que asegure un referente sólido en los futuros proceso de Calibración y Validación.

La comparación de la reflectancia aparente entre los instrumentos muestra una alta convergencia entre los valores recuperados. Este comportamiento indica que, pese a las discrepancias sistemáticas observadas en irradiancia y radiancia, la estimación de reflectancia resulta robusta; mostrando así, que los sesgos de calibración son proporcionales y tienden a cancelarse durante el proceso de cociente L/E que recupera el factor de reflectancia.

Finalmente se puede concluir que existe una consistencia espectral general entre instrumentos es adecuada; sin embargo, hay que considerar las diferencias sistemáticas en el balance de incertidumbre.

5. REFERENCIAS

Badura, I., & Dąbski, M. (2022). Reflectance spectroscopy in geology and soil sciences: Literature review. *Quaestiones Geographicae, 41*(3), 157-167. doi:https://doi.org/10.2478/quageo-2022-0031

Gómez-Giráldez, P., Aragonés, D., Jiménez, M., Cendrero-Mateo, M., Van Wittenberghe, S., Peón, J., . . . Díaz-Delgado, R. (2025). SpaFLEX: Field campaign for calibration and validation of FLEX-S3 mission products. *Engineering Proceedings, 94*(1), 13. doi:https://doi.org/10.3390/engproc2025094013

Pacheco-Labrador, J., Peón, J., Jiménez, M., Rodríguez-Pérez, J., Jiménez-Berni, J., Aragonés, D., . . . Martín, M. (2024). Quantifying the compatibility of optical reflectance factors in a field intercomparison experiment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62*. https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3488785

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.216

Estrategia de muestreo espacial multiescala para el diseño de campañas de validación dentro del proyecto SpaFLEX

Gómez Giráldez, Pedro Jesús [1] **Aragonés, David** [1] **Jiménez, Marcos** [2] **Cendrero-Mateo, Mª Pilar** [3] **Muela, Jimmy** [2] **Moncholi-Estornell, Adrián** [3] **Moreno, José** [3] **Cobos, Joaquín** [1]

[1] Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC), Sevilla, España

[2] Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA), Torrejón de Ardoz, España

[3] Laboratory for Earth Observation, Universidad de Valencia, Paterna, España

ORCID: Gómez Giráldez 0000-0002-1247-7557 Aragonés 0000-0003-4989-9005 Jiménez 0000-0002-6852-2732 Cendrero-Mateo 0000-0001-5887-7890 Muela 0009-0002-9524-5483 Moncholi-Estornell 0000-0002-8832-2594 Moreno 0000-0002-5283-3333 Cobos 0000-0003-0285-7617

Correspondencia: pedro.gomez@ebd.csic.es daragones@ebd.csic.es jimenezmm@inta.es m.pilar.cendrero@uv.es jmuepil@inta.es adrian.moncholi@uv.es jose.moreno@uv.es joaquin.cobos@ebd.csic.es

RESUMEN

La validación de los productos de la misión The Fluorescence Explorer (FLEX) requiere estrategias de muestreo estadísticamente robustas que garanticen la representatividad espacial de las mediciones de campo a la resolución del píxel de 300 × 300 m. Los requisitos de incertidumbre de la misión (<30% global, ~10% para fluorescencia y ~1% para reflectancia) exigen protocolos rigurosos. Este trabajo presenta una metodología integral de muestreo estratificado desarrollada en el marco del proyecto SpaFLEX, implementada en cuatro zonas correspondientes a dos sitios Cal/Val en España: dos encinares (Sarrión y Manzanera, Teruel) y dos matorrales mediterráneos en el Parque Nacional de Doñana (Monteblanco y Montenegro). La metodología integra: análisis de autocorrelación espacial mediante índice de Moran para selección de variables proxy, determinación del número óptimo de unidades de muestreo (Elementary Sampling Unit, ESU) a través de un muestreo estratificado y cuantificación de la variabilidad intra-ESU usando imágenes hiperespectrales de alta resolución (4 cm). Los resultados demuestran que se requieren 6-7 ESUs por zona y 5-12 puntos de medición por ESU para cumplir los umbrales FLEX.

Palabras clave: *FLEX, muestreo estratificado, escalado, Sentinel-2, Dron*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Estrategia de muestreo espacial multiescala para el diseño de campañas de validación dentro del proyecto SpaFLEX

Gómez Giráldez, Pedro Jesús [(1)], Aragonés, David [(1)], Jiménez, Marcos [(2)], Cendrero-Mateo, Mª Pilar [(3)], Muela, Jimmy [(2)], Moncholi-Estornell, Adrián [(3)], Moreno, José [(3)], Cobos, Joaquín [(1)]

[(1)] Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC), España.
0000-0002-1247-7557, pedro.gomez@ebd.csic.es ; 0000-0003-4989-9005, daragones@ebd.csic.es
0000-0003-0285-7617, joaquin.cobos@ebd.csic.es.

[(2)] Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA), Torrejón de Ardoz, España.
0000-0002-6852-2732, jimenezmm@inta.es ; 0009-0002-9524-5483, jmuepil@inta.es

[(3)] Laboratory for Earth Observation, Universidad de Valencia, España.
0000-0001-5887-7890, m.pilar.cendrero@uv.es ; 0000-0002-8832-2594, adrian.moncholi@uv.es
0000-0002-5283-3333, jose.moreno@uv.es

Resumen: La validación de los productos de la misión *The Fluorescence Explorer* (FLEX) requiere estrategias de muestreo estadísticamente robustas que garanticen la representatividad espacial de las mediciones de campo a la resolución del píxel de 300 × 300 m. Los requisitos de incertidumbre de la misión (<30% global, ~10% para fluorescencia y ~1% para reflectancia) exigen protocolos rigurosos. Este trabajo presenta una metodología integral de muestreo estratificado desarrollada en el marco del proyecto SpaFLEX, implementada en cuatro zonas correspondientes a dos sitios Cal/Val en España: dos encinares (Sarrión y Manzanera, Teruel) y dos matorrales mediterráneos en el Parque Nacional de Doñana (Monteblanco y Montenegro). La metodología integra: análisis de autocorrelación espacial mediante índice de Moran para selección de variables proxy, determinación del número óptimo de unidades de muestreo (*Elementary Sampling Unit*, ESU) a través de un muestreo estratificado y cuantificación de la variabilidad intra-ESU usando imágenes hiperespectrales de alta resolución (4 cm). Los resultados demuestran que se requieren 6-7 ESUs por zona y 5-12 puntos de medición por ESU para cumplir los umbrales FLEX.

Palabras clave: FLEX, muestreo estratificado, escalado, Sentinel-2, Dron

Multiscale spatial sampling strategy for the design of validation campaigns within the SpaFLEX project

***Abstract**: Validation of products from the Fluorescence Explorer (FLEX) mission requires statistically robust sampling strategies that ensure the spatial representativeness of field measurements at the 300 × 300 m pixel resolution. The mission's uncertainty requirements (<30% global, ~10% for fluorescence and ~1% for reflectance) demand rigorous protocols. This work presents a comprehensive stratified sampling methodology developed within the framework of the SpaFLEX project, implemented across four zones corresponding to two Cal/Val sites in Spain: two holm oak woodlands (Sarrión and Manzanera, Teruel) and two Mediterranean shrublands in Doñana National Park (Monteblanco and Montenegro). The methodology integrates: spatial autocorrelation analysis using Moran's index for proxy variable selection, determination of the optimal number of Elementary Sampling Units (ESUs) through stratified sampling, and quantification of intra-ESU variability using high-resolution hyperspectral imagery (4 cm). Results demonstrate that 6–7 ESUs per zone and 5–12 measurement points per ESU are required to meet FLEX thresholds.*

***Keywords**: FLEX, stratified sampling, Sentinel-2, UAV*

1. INTRODUCCIÓN

La fluorescencia inducida por el sol (SIF) y la radiancia reflejada de la vegetación terrestre serán productos operativos clave de nivel 2 proporcionados por la misión *FLuorescence EXplorer* (FLEX) de la Agencia Espacial Europea (ESA), cuyo lanzamiento está previsto para 2026 (ESA, 2017). La fiabilidad de estos productos debe evaluarse mediante un proceso de validación que compare los productos satelitales con datos de

referencia fiducial procedentes de mediciones in situ. La teledetección de SIF representa un campo en rápido avance, con capacidades emergentes para metodologías satelitales y diversas aplicaciones prospectivas (Mohammed *et al*., 2019). La validación de productos FLEX sigue las recomendaciones del CEOS, que establecen un marco de muestreo anidado basado en Unidades Elementales de Muestreo (ESU) para conectar mediciones de campo con productos satelitales (Morisette *et al*., 2006).

Según el Documento de Requisitos de la Misión FLEX (MRD), las incertidumbres deben ser inferiores al 30% globalmente, aproximadamente 10% para la eficiencia fotosintética mediante emisión de fluorescencia, 10% para la irradiancia solar y aproximadamente 1% para la incertidumbre aparente de reflectancia. El proyecto SpaFLEX, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España, tiene como objetivo desarrollar e implementar protocolos rigurosos de calibración y validación (Cal/Val) que conecten las observaciones in situ con las estimaciones satelitales a escala de píxel FLEX (300 × 300 m).

El objetivo de este trabajo es presentar el marco teórico-algorítmico para cuantificar la heterogeneidad espacial de las variables biofísicas proxy de SIF y extinción no fotoquímica (NPQ) dentro de un píxel FLEX, determinar el diseño muestral óptimo que garantice la representatividad estadística minimizando el esfuerzo de campo y establecer una base para los posteriores procedimientos de escalado espacial y propagación del error cumpliendo con los requisitos de la misión FLEX.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en cuatro parcelas de dos zonas Cal/Val en España (Fig. 1): dos encinares en la provincia de Teruel (Sarrión, de baja densidad arbórea, y Manzanera, de alta densidad arbórea); y dos sitios en el Parque Nacional de Doñana (Monteblanco, matorral xerófilo mediterráneo, y Montenegro, matorral húmedo). Esta diversidad ecológica proporciona diferentes regímenes de heterogeneidad espacial para evaluar la adaptabilidad de la metodología.

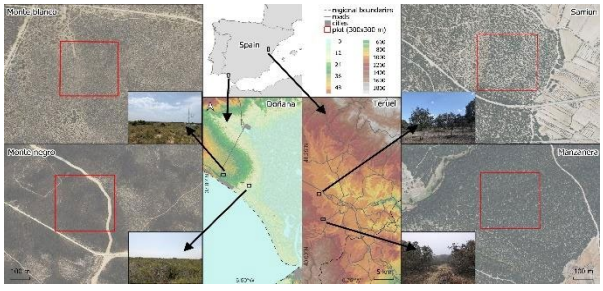


Figura 1. Mapa de situación de las 4 parcelas de estudio. Izquierda zona de matorral (Doñana); derecha zona de encinar (Teruel).

2.2. Diseño muestral

El diseño muestral de este trabajo se desarrolla en 3 etapas: 1) análisis de la heterogeneidad de la parcela, 2) determinación del número de ESUs (*Elementary Sampling Units*) mediante un muestreo estratificado y 3) la determinación del número de puntos de muestreo dentro de la ESU.

2.2.1. Análisis de la heterogeneidad espacial.

Este apartado presenta dos análisis espaciales complementarios. Por un lado, se realizaron regresiones entre parámetros biofísicos derivados de imágenes Sentinel-2 y los correspondientes mapas de residuos mediante TerrSet, con el objetivo de evaluar la capacidad explicativa de cada variable y visualizar la distribución espacial de los errores del modelo. Por otro lado, se calculó la autocorrelación espacial de los valores originales de cada parámetro biofísico mediante el índice de Moran y su desviación estándar, utilizando Python, con el fin de cuantificar el grado de agrupamiento espacial inherente a cada variable. Este segundo análisis constituye el criterio principal para la selección de la variable más limitante sobre la que fundamentar la estratificación del área de estudio, bajo la premisa de que una mayor autocorrelación espacial indica una estructuración del paisaje más adecuada para definir unidades homogéneas.

2.2.2. Determinación del número de ESUs.

La ESU se define con dimensiones de 20 × 20 m para coincidir con la resolución espacial de Sentinel-2, resultando en N = 225 ESUs candidatas por píxel FLEX. El tamaño muestral se determina mediante la fórmula integral de Cochran (1977) para muestreo aleatorio estratificado (Eq. 1):

$$n = \frac{\sum(N_h \times S_h)^2}{N^2 \times D + \sum(N_h \times {S_h}^2)} \quad (1)$$

donde D expresa la precisión deseada, N_h es el tamaño del estrato h, y S_h es la desviación estándar dentro del estrato. Esta fórmula optimiza la asignación considerando simultáneamente todos los estratos.

Una vez determinado n, se distribuye entre estratos mediante asignación óptima de Neyman (1934) (Eq. 2):

$$n_h = \frac{n \times (N_h \times S_h)}{\sum(N_h \times S_h)} \quad (2)$$

asignando más muestras a estratos con mayor variabilidad y tamaño. El número óptimo de estratos K se determinó mediante el índice de Calinski-Harabasz (Calinski & Harabasz, 1974).

Para que el muestreo estratificado sea operativamente válido, debe cumplirse n ≥ 2×K (mínimo 2 ESUs por estrato para estimar varianza intra-estrato).

2.2.3. Estimación del número de mediciones por ESU.

La caracterización de la variabilidad intra-ESU se realizó mediante datos hiperespectrales de muy alta resolución (~4 cm) obtenidos con la cámara Cubert S185 a bordo de un dron DJI Matrice 600, a una altura de vuelo de 120 m. Un aspecto metodológico crítico es la corrección por agregación espacial: el sensor de campo (FLOX) integra señal sobre un FOV de ~0.89 m de diámetro, correspondiendo a 495 píxeles por unidad FOV. Se

utilizaron índices de vegetación clave como proxies de medición: el *Photochemical Reflectance Index* (PRI) (Eq. 3, Peñuelas *et al*. 1995) para el NPQ, dado que refleja cambios en la reflectancia a 531 nm asociados a la conversión de violaxantina en zeaxantina en el ciclo de las xantofilas, el principal mecanismo de disipación térmica del exceso de energía luminosa subyacente al NPQ; y el índice de clorofila *Red Edge Chlorophyll Index* (ChlRE, Gitelson *et al*. 2005) (Eq. 4) para la fluorescencia, ya que el contenido de clorofila determina la cantidad de radiación absorbida disponible para la emisión de fluorescencia, siendo por tanto un indicador del potencial de emisión de la cubierta vegetal.

$$PRI = \frac{531\,nm - 570\,nm}{531\,nm + 570\,nm} \quad (3)$$

Donde 531 nm y 570 nm son los valores de reflectancia en longitudes de onda de 531 y 570 nanómetros respectivamente.

$$ChlRE = \frac{750\,nm}{710\,nm} - 1 \quad (4)$$

Donde 750 nm y 710 nm son los valores de reflectancia en longitudes de onda de 750 y 710 nanómetros respectivamente.

Se aplicó la fórmula de Cochran para poblaciones finitas (Eq. 5) :

$$m = \frac{Z^2 \times \sigma^2}{E^2 + \frac{Z^2 \times \sigma^2}{M}} \quad (5)$$

donde:

m es el número de puntos de medición requeridos, M la población de unidades de medición potenciales (función del FOV del sensor), σ² la varianza intra-ESU de la variable (ChlRE o PRI), Z el nivel de confianza 95% y E el error máximo permitido (10% para Fluorescencia, 1% para Reflectividad).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de heterogeneidad espacial

La Tabla 1 presenta el análisis de autocorrelación espacial y variabilidad para las variables biofísicas derivadas de Sentinel-2 (usando el programa SNAP): fracción absorbida de la radiación fotosintéticamente activa (FAPAR), fracción de cobertura de la vegetación (FVC) y contenido de clorofila en hoja (Cab). La selección de la variable proxy se basó en identificar aquella con máxima heterogeneidad (mayor σ) y mínima autocorrelación espacial (menor índice de Moran), valores altos de desviación estándar combinados con baja autocorrelación indican una distribución más aleatoria que requiere mayor esfuerzo muestral (Moran, 1950).

Los valores del índice de Moran muestran un patrón diferenciado entre ecosistemas: los matorrales mediterráneos presentan índices elevados (0.60-0.83), indicando fuerte autocorrelación espacial, mientras que los encinares muestran valores menores (0.11-0.41).

Tabla 1. Análisis de autocorrelación espacial y variabilidad por zona y variable biofísica

Variable	Parámetro	Sarrión	Manzanera	Monteblanco	Montenegro
Cab	σ	0.181	0.120	0.003	0.005
	Moran I	0.348	0.107	0.798	0.601
FVC	σ	0.002	0.001	0.002	0.003
	Moran I	0.368	0.459	0.827	0.608
FAPAR	σ	0.002	0.001	0.002	0.003
	Moran I	0.406	0.346	0.826	0.650

Esta diferencia refleja las características estructurales de cada ecosistema, donde los matorrales forman mosaicos de parches con alta conectividad espacial. Se seleccionó Cab como variable proxy atendiendo al balance entre heterogeneidad y autocorrelación espacial: en los encinares, Cab presenta la mayor variabilidad relativa (σ = 0.12-0.18) con los menores índices de Moran (0.11-0.35), indicando una distribución espacial menos predecible que requiere mayor esfuerzo muestral. En los matorrales, aunque todas las variables muestran σ similares, Cab presenta valores de Moran ligeramente inferiores a FAPAR.

3.2. Número de ESUs y mediciones por ESU.

La Tabla 2 presenta los resultados del muestreo estratificado. Todas las zonas requieren 6-7 ESUs tras aplicar la restricción de mínimos operativos (n ≥ 2×K con K = 3) (Fig. 2). Para el muestreo intra-ESU, la corrección por agregación espacial reduce el CV efectivo a ~1-2%, resultando en 1 punto por ESU para fluorescencia (ChlRE) y 5-12 puntos para reflectancia (PRI), siendo ésta la variable limitante

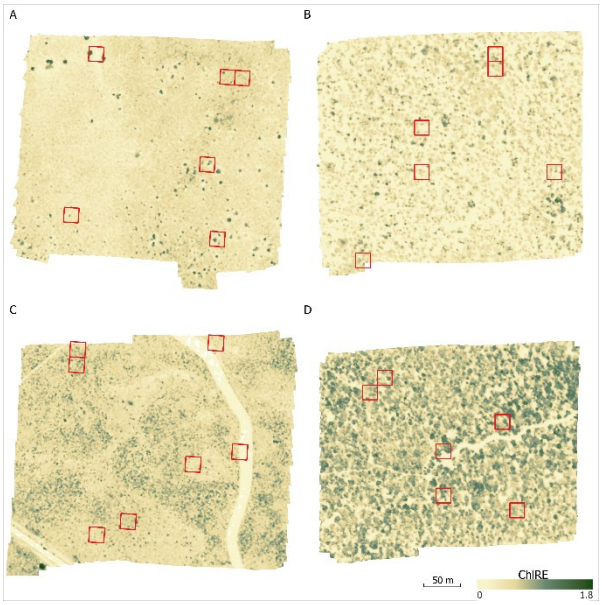


Figura 2. Distribución de las ESUs en las parcelas de estudio (A Monteblanco, B Sarrión, C Montenegro y D Manzanera) sobre la imagen de ChlRE tomado con la cámara hiperespectral.

Tabla 2. Resultados del muestreo estratificado y requerimientos intra-ESU.

Zona	CV Cab (%)	n ESUs	CV ChlRE (%)	m Fluo	CV PRI (%)	m Ref
Sarrión	10.0	6*	2.38	1	1.17	6
Manzanera	9.2	6*	1.68	1	1.07	5
Monteblanco	17.6	6*	1.81	1	1.17	6
Montenegro	32.6	7	1.59	1	1.72	12

* Valores corregidos por restricción de mínimos operativos (mínimo 2 por estrato). CV: coeficiente de variación.

La convergencia hacia 6-7 ESUs independientemente del grado de heterogeneidad (CV 9-33%) indica que la restricción operativa mínima domina sobre el cálculo teórico de Cochran, resultado coherente con protocolos previos de validación de productos biofísicos (Baret *et al*., 2006).

El PRI emerge como variable limitante, requiriendo 5-12 puntos frente a 1 punto para ChlRE. Esta asimetría refleja la mayor sensibilidad del PRI a la variabilidad espacial del NPQ a escala de dosel. Estudios previos han demostrado que el PRI correlaciona significativamente con el estado de de-epoxidación del ciclo de xantofilas, pero también está influenciado por la composición pigmentaria, lo que explica su mayor variabilidad espacial (Garbulsky *et al*., 2011). La corrección por agregación espacial (495 píxeles/FOV) resulta esencial para reconciliar escalas de observación y hacer viables los umbrales FLEX MRD.

4. CONCLUSIONES

El diseño establece un número manejable de ESUs y mediciones de campo para alcanzar el objetivo de errores inferiores al 10% en fluorescencia y 1% en reflectancia. El muestreo estratificado mediante la fórmula integral de Cochran con asignación óptima de Neyman resulta eficiente para todas las zonas analizadas, requiriendo 6-7 ESUs por zona independientemente del grado de heterogeneidad espacial (CV 9-33%).

La corrección por agregación espacial en el análisis intra-ESU es esencial para hacer viables los umbrales FLEX MRD. El PRI (reflectancia) es la variable limitante, determinando 5-12 puntos por ESU, mientras que fluorescencia (ChlRE) requiere solo 1 punto. El protocolo recomendado consiste en diseñar el muestreo según los requerimientos de reflectancia y obtener simultáneamente fluorescencia en los mismos puntos, garantizando cumplir ambos umbrales de incertidumbre con un único protocolo de campo. El escalado y los resultados de propagación de incertidumbre verificarán si estos errores permanecen dentro del límite permitido para un píxel FLEX de 300 × 300 m.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a los proyectos SpaFLEXVal (PID2022-137022OB-C33) y SpaFLEXInt (PCI2023-145988-2, PCI2023-145955-2, PCI2023-146023-2) financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores participan en las Plataformas Temáticas Interdisciplinares del CSIC PTI EcoBioDiv y PTI Teledetect. El apoyo logístico y técnico fue proporcionado por ICTS-RBD-CSIC.

6. REFERENCIAS

Baret, F., Morissette, J. T., Fernandes, R. A., Champeaux, J. L., Myneni, R. B., Chen, J., ... & Nickeson, J. E. (2006). Evaluation of the representativeness of networks of sites for the global validation and intercomparison of land biophysical products: Proposition of the CEOS-BELMANIP. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44*(7), 1794-1803.

Calinski, T., & Harabasz, J. (1974). A dendrite method for cluster analysis. Communications in *Statistics, 3*(1), 1-27.

Cochran, W. G. (1977). Sampling Techniques (3rd ed.). John Wiley & Sons.

ESA (2017). Report for Mission Selection: FLEX. ESA SP-1330/2. European Space Agency.

Garbulsky, M. F., Peñuelas, J., Gamon, J., Inoue, Y., & Filella, I. (2011). The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: A review and meta-analysis. *Remote sensing of environment, 115*(2), 281-297.

Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters, 32*(8), L08403.

Mohammed, G. H., Colombo, R., Middleton, E. M., Rascher, U., Van Der Tol, C., Nedbal, L., ... & Zarco-Tejada, P. J. (2019). Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. *Remote sensing of environment, 231*, 111177.

Moran, P. A. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. Biometrika, 37(1/2), 17-23.

Morisette, J. T., Baret, F., Privette, J. L., Myneni, R. B., Nickeson, J. E., Garrigues, S., ... & Cook, R. (2006). Validation of global moderate-resolution LAI products: A framework proposed within the CEOS land product validation subgroup. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44*(7), 1804-1817.

Neyman, J. (1934). On the two different aspects of the representative method. *Journal of the Royal Statistical Society, 97*(4), 558-625

Peñuelas, J.; Filella, I.; Gamon, J.A. Assessment of Photosynthetic Radiation-Use Efficiency with Spectral Reflectance. *New Phytol. 1995*, *131*(3), 291–296.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.221

SpaFLEX: estrategia Cal/Val del producto Fluorescencia y Reflectancia de la misión FLEX-S3 en test-sites de variadas formaciones vegetales y gradientes de heterogeneidad

Jiménez, Marcos [1] **Cendrero-Mateo, M.ª Pilar** [2,4] **Gómez-Giráldez, Pedro J.** [3] **Moncholi-Estornell, Adrián** [2] **Peón, Juanjo** [1] **Gutierrez de la Camara Ara, Oscar** [1] **Muñoz Sanchez, Félix** [1] **Cobos, Joaquín** [3] **Montoro, Amelia** [4] **Muela, Jimmy A.** [1] **Aragones, David** [3] **Carretero, Laura** [1] **López-Ballesteros, Ana** [5] **Doblas-Rodrigo, Álvaro** [5] **Chardi-Raga, Cynthia** [2] **Tenjo, Carolina** [2] **Marchante-Cambrón, J.Cesar** [2] **Van Wittenberghe, Shari** [2] **Díaz-Delgado, Ricardo** [3] **Delegido, Jesús** [2] **Moreno, José** [2]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Torrejón de Ardoz, España

[2] Laboratory for Earth Observation, Universidad de Valencia (LEO-UV), Paterna, España

[3] Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC), Sevilla, España

[4] Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE), CSIC-UV-GVA, Valencia, España

[5] Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Zaragoza, España

ORCID: Jiménez 0000-0002-6852-2732 Cendrero-Mateo 0000-0001-5887-7890 Gómez-Giráldez 0000-0002-1247-7557 Moncholi-Estornell 0000-0002-8832-2594 Peón 0000-0001-7551-2236 Gutierrez de la Camara Ara 0000-0003-2555-9292 Muñoz Sanchez 0000-0002-6421-8725 Cobos 0000-0001-6527-1440 Montoro 0000-0002-3491-6821 Muela 0009-0002-9524-5483 Aragones 0000-0003-4989-9005 Carretero 0000-0001-5587-4707 López-Ballesteros 0000-0003-0609-360X Chardi-Raga 0009-0007-7886-4801 Van Wittenberghe 0000-0002-5699-0352 Díaz-Delgado 0000-0002-0460-4616 Delegido 0000-0002-2819-6979 Moreno 0000-0002-5283-3333

Correspondencia: jimenezmm@inta.es m.pilar.cendrero@uv.es pedro.gomez@ebd.csic.es adrian.moncholi@uv.es jpeogar@inta.es gutierrezcao@inta.es munozsf@inta.es joaquin.campos@csic.es amelia.montoro@csic.es jmuepil@inta.es daragones@ebd.csic.es carreteroml@inta.es alopezb@cita-aragon.es adoblas@cita-aragon.es Cynthia.Chardi@uv.es carolina.tenjo@uv.es jumarcam@alumni.uv.es Shari.Wittenberghe@uv.es rdiaz@ebd.csic.es Jesus.Delegido@uv.es jose.moreno@uv.es

RESUMEN

La fluorescencia de la clorofila inducida por el sol (SIF) y la reflectancia de la vegetación (Ref) serán productos operativos de nivel 2 que proporcionará la próxima misión Fluorescence Explorer (FLEX) de la Agencia Espacial Europea (ESA). Con el fin de cumplir con los requisitos de incertidumbre de la ESA para los productos de nivel 2, el proyecto SpaFLEX está implementando un plan integral de calibración y validación (Cal/Val) para la misión FLEX. El plan se basa en realizar mediciones fiduciales con instrumentos in situ (aerotransportados, UAV y terreno) en test-sites de variadas formaciones vegetales y gradientes de heterogeneidad espacial, estimando la incertidumbre para los valores agregados a los 300 m de píxel de FLEX. Los diferentes protocolos desarrollados en el marco de SpaFLEX se muestran en la campaña de campo realizada en la Reserva Biológica de Doñana (RBD), donde se ha calculado el valor de SIF y Ref con su incertidumbre total para el píxel FLEX en las parcelas de matorral**Palabras clave:** *FLEX-S3, SpaFLEX, Fluorescencia, Calibración y Validación, Medidas Fiduciales.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

SpaFLEX: estrategia Cal/Val del producto Fluorescencia y Reflectancia de la misión FLEX-S3 en test-sites de variadas formaciones vegetales y gradientes de heterogeneidad

Jiménez, Marcos [1], Cendrero-Mateo, M.ª Pilar [2,4], Gómez-Giráldez, Pedro J. [3], Moncholi-Estornell, Adrián [2], Peón, Juanjo [1], Gutierrez de la Camara Ara, Oscar [1], Muñoz Sanchez, Félix [1], Cobos, Joaquín [3], Montoro, Amelia [4], Muela, Jimmy A. [1], Aragones, David [3], Carretero, Laura [1], López-Ballesteros, Ana [5], Doblas-Rodrigo, Álvaro [5], Chardi-Raga, Cynthia [2], Tenjo, Carolina [2], Marchante-Cambrón, J.Cesar [2], Van Wittenberghe, Shari [2], Díaz-Delgado, Ricardo [3], Delegido, Jesús [2], Moreno, José [2]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Torrejón de Ardoz, España.
0000-0002-6852-2732, jimenezmm@inta.es ; 0000-0001-7551-2236, jpeogar@inta.es
0000-0003-2555-9292, gutierrezcao@inta.es ; 0000-0002-6421-8725, munozsf@inta.es
0009-0002-9524-5483, jmuepil@inta.es ; 0000-0001-5587-4707, carreteroml@inta.es

[2] Laboratory for Earth Observation, Universidad de Valencia (LEO-UV), España.
0000-0002-8832-2594, adrian.moncholi@uv.es ; 0009-0007-7886-4801, Cynthia.Chardi@uv.es.
carolina.tenjo@uv.es ; jumarcam@alumni.uv.es.
0000-0002-5699-0352, Shari.Wittenberghe@uv.es; 0000-0002-2819-6979, Jesus.Delegido@uv.es.
0000-0002-5283-3333, jose.moreno@uv.es.

[3] Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC), España.
0000-0002-1247-7557, pedro.gomez@ebd.csic.es ; 0000-0003-0285-7617, joaquin.cobos@ebd.csic.es.
0000-0003-4989-9005, daragones@ebd.csic.es ; 0000-0002-0460-4616, rdiaz@ebd.csic.es.

[4] Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE), CSIC-UV-GVA, España.
0000-0001-5887-7890, m.pilar.cendrero@uv.es ; 0000-0002-3491-6821, amelia.montoro@csic.es.

[5] Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), España.
0000-0003-0609-360X, alopezb@cita-aragon.es ; adoblas@cita-aragon.es.

Resumen: La fluorescencia de la clorofila inducida por el sol (SIF) y la reflectancia de la vegetación (Ref) serán productos operativos de nivel 2 que proporcionará la próxima misión *Fluorescence Explorer* (FLEX) de la Agencia Espacial Europea (ESA). Con el fin de cumplir con los requisitos de incertidumbre de la ESA para los productos de nivel 2, el proyecto SpaFLEX está implementando un plan integral de calibración y validación (Cal/Val) para la misión FLEX. El plan se basa en realizar mediciones fiduciales con instrumentos *in situ* (aerotransportados, UAV y terreno) en *test-sites* de variadas formaciones vegetales y gradientes de heterogeneidad espacial, estimando la incertidumbre para los valores agregados a los 300 m de píxel de FLEX. Los diferentes protocolos desarrollados en el marco de SpaFLEX se muestran en la campaña de campo realizada en la Reserva Biológica de Doñana (RBD), donde se ha calculado el valor de SIF y Ref con su incertidumbre total para el píxel FLEX en las parcelas de matorral.

Palabras clave: FLEX, SpaFLEX, Fluorescencia, Calibración y Validación, Medidas Fiduciales

SpaFLEX: Cal/Val strategy of the fluorescence and reflectance product of FLEX at test-sites with varied vegetation formations and heterogeneity gradients

***Abstract**: Sun-induced chlorophyll fluorescence (SIF) and vegetation reflectance (Ref) will be Level 2 operational products provided by the European Space Agency's (ESA) upcoming Fluorescence Explorer (FLEX) mission. In order to meet the ESA's uncertainty requirements for Level 2 products, the SpaFLEX project is implementing a comprehensive calibration and validation (Cal/Val) plan for the FLEX mission. The plan is based on performing fiducial measurements with in-situ instruments (airborne, UAV, and ground-based) at test-sites with varied vegetation formations and spatial heterogeneity gradients, estimating the uncertainty for the values aggregated to the 300 m pixel size of FLEX. The different protocols developed within the*

framework of SpaFLEX are demonstrated in the field campaign carried out in the Doñana Biological Reserve (RBD) were the integrated SIF and Ref values and uncertainty at FLEX pixel size have been calculated for the scrubland plots.

***Keywords**: FLEX, SpaFLEX, Fluorescence, Calibration and Validation. Fiducial measurements,*

1. INTRODUCCIÓN: PROYECTO SPAFLEX

La misión *FLuorescence EXplorer* (FLEX) de la Agencia Espacial Europea (ESA) tiene, tras varios aplazamientos, la ventana de lanzamiento prevista para septiembre de 2026. Será la primera misión diseñada para monitorizar la actividad fotosintética de la vegetación terrestre mediante la medición de La fluorescencia de la clorofila inducida por el sol (SIF) y la reflectancia (Ref) de la vegetación (productos de nivel 2).

La ESA gestiona los productos de nivel 1, y delega en los Estados miembros, como España, el desarrollo de estrategias de Cal/Val para los productos de nivel 2. Los requisitos de la misión se han establecido en incertidumbres inferiores al 30 % para la eficiencia fotosintética requiriendo incertidumbres inferiores al 10 % para la emisión de fluorescencia y la irradiancia solar, y del 1 % para la reflectancia.

El proyecto SpaFLEX (SpaFLEX.org), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación español, y herencia de anteriores proyectos (AVANFLEX, FLEXL3L4) establece un marco integral de Cal/Val para FLEX en España. El proyecto define protocolos de muestreo estandarizados en tres ecosistemas españoles diferentes: agrícola, forestal y dehesa mediterránea. El objetivo es proporcionar datos precisos sobre el terreno caracterizando la heterogeneidad espacial mediante un protocolo multiescala dentro del píxel de FLEX de 300 metros. En este trabajo se presentan las bases del proyecto y la estrategia de Cal/Val implementada, mostrando la campaña desarrollada en el *test-site* de la Reserva Biológica de Doñana-ICTS en julio de 2025.

2. ESTRATEGIA CALVAL

La estrategia Cal/Val se basa en las recomendaciones del Comité de Satélites de Observación de la Tierra (CEOS) y sigue una estrategia ascendente en la que las mediciones SIF de la copa del dosel se amplían a la escala espacial de FLEX. Para ello SpaFLEX establece una serie de pilares y desarrolla protocolos de medición.

2.1. Pilares de SpaFLEX

El proyecto SpaFLEX se asienta en un grupo multidisciplinar de investigación y tecnología, formado por universidades e institutos que disponen de instrumentación de medidas *in situ* a multiescala, instalaciones y laboratorios, y acceso a *test-sites* de Cal/Val (Cendrero-Mateo *et al*., 2025).

El consorcio (ver filiaciones) agrupa varias fortalezas: LEO-UV ha sido el motor relevante de la misión FLEX en lo que respecta al diseño de instrumentos, el procesamiento de datos y el desarrollo de los productos finales de nivel 2, el LAST-EBD del CSIC aporta su experiencia en la validación de productos de observación de la Tierra basados en la instrumentación y las mediciones *in situ* desplegadas por la Infraestructura de Investigación ICTS-Doñana. Además, el ITAP y el CITA tienen el acceso a *test-sites* de Cal/Val. Por último, el INTA es la organización pública española especializada en investigación y desarrollo tecnológico aeroespacial que ha ejercido de coordinador.

SpaFLEX dispone de instrumentación para la medición de SIF y Ref a todas las escalas espaciales *in situ* (avión, dron, terreno). Integra mediciones a nivel foliar (FluoWat) con monitoreo continuo a nivel del dosel: FloX (Fluorescence boX JB-Hyperspectral Devices, Düsseldorf, Germany), Piccolo-FluoCat (Moncholi-Estornell *et al*., 2023) y ASD FieldSpec (Malvern Panalytical Ltd). Estos datos terrestres se escalan utilizando imágenes hiperespectrales Cubert S185 (Cubert GMBH) obtenidas con dron y sensores desde avión CASI 1500i (ITRES Research Limited) y Headwall CFL (Headwall Photonics, Fitchburg, MA, USA) para proporcionar un valor integrado del píxel de FLEX. Además, esta instrumentación se caracteriza y ensaya en instalaciones como la cámara de crecimiento de la UV y el laboratorio de calibración del INTA.

La red de *test-sites* Cal/Val cubre un gradiente de heterogeneidad espacial que va desde la más baja en la zona agrícola de la Finca Santa Marta (La Roda, Albacete), sustituyendo a la finca más utilizada de Las Tiesas (Barrax, Albacete). Una heterogeneidad media la encontramos en la zona forestal de Sarrión (Teruel). La mayor la encontramos en los bosques y matorrales de la ICTS-Doñana. Cada sitio Cal/Val está bien caracterizado (mapas de suelos, condiciones meteorológicas, especies vegetales y cobertura, etc.) y salvo el *test-site* agrícola, el resto tienen instaladas torres de flujos.

2.2. Protocolos de Mediciones

Los protocolos de medición desarrollados, tienen como objetivo principal la obtención de medidas fiduciales de SIF y Ref para la validación de FLEX.

Se han diseñado intercomparaciones periódicas radiométricas y espectrales de los espectrorradiómetros, siguiendo prácticas metrológicas para garantizar la trazabilidad de las mediciones. Se realizan ensayos *indoor* en condiciones controladas frente a esfera integradora, y *outdoor* en iluminación natural frente a simulaciones LibRadtran (www.libradtran.org).

Previo a la realización de medidas, se realiza la caracterización espacial de las parcelas. Mediante el uso de imágenes Sentinel-2 (S2) se estratifica y asigna un número de *Elementary Sampling Unit* (ESU) por estrato. Utilizando vuelos de dron con la cámara hiperespectral Cubert o imágenes desde avión se estima el número de puntos para caracterizar cada parcela de medidas que alcancen los requisitos de incertidumbre de FLEX (Gómez-Giraldez *et al*,. 2026)

Las mediciones de SIF y Ref se planifican siguiendo las ESUs y el número de puntos determinados, consisten en:

i) mediciones puntuales y continuadas situando FloX fijas en torres o trípodes, normalmente en localizaciones cercanas a torres de flujos, ii) mediciones movibles con FloX_toGO o FluoCat-Piccolo, y iii) mediciones de hoja con Fluowat.

La propagación de la incertidumbre de SIF y Ref para el área de 300 x 300 m que representa un píxel FLEX, se realiza utilizando la Ley de Propagación de Incertidumbres y los métodos de Monte Carlo en pasos sucesivos. En primer lugar, los componentes de incertidumbre sistemáticos y aleatorios de la radiancia (L) e irradiancia (E) se propagan utilizando la herramienta CoMet-Punpy (www.comet-punpy.org). A continuación, las simulaciones de Monte Carlo del algoritmo SpecFit propagan las obtenciones de SIF y Ref. Por último, el valor de SIF y Ref integrado al píxel de FLEX se propaga utilizando simulaciones de Monte Carlo de la función de transferencia de agregación aplicada.

3. CAMPAÑAS Y ADQUISICIÓN DE DATOS

En estos tres años de proyecto se han realizado ensayos de laboratorio, caracterización de la instrumentación y campañas de campo, tanto intensivas (*short*) como de larga duración (*seasonal*).

En los comienzos de los años 2024 y 2025 se han realizado caracterizaciones de FloX, Piccolo y ASD en laboratorio, que han recomendado recalibrar los equipos FloX. En cada campaña de campo, el primer día se dedica a una intercomparación de espectrorradiómetros con mediciones sobre paneles de referencia, que detectan posibles correcciones radiométricas y espectrales a aplicar previo a las mediciones.

Se realizaron experimentos controlados en la cámara de crecimiento de LEO-UV para caracterizar la respuesta no lineal de la SIF ante el estrés hídrico, térmico y los ciclos lumínicos. Mediante un enfoque integrado (PAM, espectroscopía y termografía), se evaluó la partición de energía y la activación de mecanismos fotoprotectores. Los resultados confirman que el estrés hídrico y las olas de calor rompen la linealidad entre la SIF y eficiencia fotosintética.

La primera campaña *short* fue Sarrión I, que se realizó del 27 al 31 de mayo de 2024. Las parcelas de Sarrión y Manzanera fueron caracterizadas con S2 y vuelo Cubert. Se midieron hojas con FluoWat, y reflectancia ASD de superficies. La campaña Sarrión II se planificó para julio de 2024 y poder realizar los vuelos dron con Piccolo, pero desafortunadamente no funciono el dron. Para esa campaña de Sarrión I no estaba operativo el sistema aeroportado del INTA. En julio de 2025 se desarrolló la campaña Doñana 2025 (se describe en el siguiente apartado). La última campaña ha consistido en un vuelo con los sensores hiperespectrales aeroportados CFL y CASI 1500 sobre los tres *test-sites* (Sarrión, Santa Marta y Doñana), contratando a la empresa Heligrafics. Simultáneamente a los vuelos se realizaron campañas de campo en los tres sitios Cal/Val.

Sarrión y Doñana-ICTS cuentan con instalaciones de torres de flujos propiedad del CITA y EBD, respectivamente. En ellos, se han realizado dos campañas *seasonal* instalando FloX fijas en torres o trípodes en las parcelas de Manzanera y Sarrión en 2024 y en Doñana en 2025. Todas en periodos en torno a 6 meses. Estas mediciones se comparan con las torres de flujos para evaluar la relación de SIF con la productividad primaria global (GPP) de las parcelas.

4. PROCESO, ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE DOÑANA 2025

La campaña SpaFLEX-Doñana 2025 se realizó del 6 al 12 de julio de 2025 en el *test-site* de La Reserva Biológica de Doñana (RDB). La RBD refleja la representatividad de los ecosistemas del Parque Nacional de Doñana (marismas interiores, dunas móviles y dunas estabilizadas). Se tienen instaladas 4 torres de flujo (ver figura 1), SpaFLEX situó parcelas de 1 km x 1 km de medida para la validación FLEX en torno a esas localizaciones.

La campaña de mediciones se ha centrado en las parcelas de Monte Negro (MN) y Monte Blanco (MB). Ambas parcelas son comunidades de matorral situadas en el ecosistema de las arenas estabilizadas. Este ecosistema presenta una topografía ondulada debido a la antigua morfología dunar que ha sido colonizada por la vegetación en respuesta a los cambios en el suministro de agua subterránea. La comunidad de MB se encuentra en las crestas de dunas antiguas donde el nivel freático supera en verano los 3 m, es más xerofítica y está dominada por *Juniperus phoenicea, Halimium commutatum, Halimium halimifolium, Rosmarinus officinalis, Stauracanthus genistoides y Cistus libanotis*. Por otro lado, el MN se encuentra en depresiones, donde el nivel freático en verano rara vez se encuentra a más de 1 m, es una comunidad higrofítica dominada por *Erica scoparia, Erica ciliaris, Calluna vulgaris, Ulex minor, Myrtus communis y Cistus salvifolius*.



Figura 1. Localización de las torres de flujos y las parcelas de 1km x 1km en el *test-site* de la Reserva Biológica de Doñana.

Siguiendo los protocolos SpaFLEX (apartado 3), se implementó una estrategia de muestreo para ambas parcelas. La caracterización espacial determinó 2 estratos y 2 ESUs tanto en MB como MN. Se dedicaron dos días de muestreo para cada parcela, instalando/desinstalando el mismo *set-up* multiescala y multisensor, ver Figura 2: trípode con la FloX propiedad de la EBD (nº 060) para la monitorización continua de la SIF, el Fluocat-Piccolo con una longitud de transecto de 70 m y entre 2-3 m de altura mediante dos camiones-grúas, la FloX propiedad de la UV (nº 030) muestreo en modo FloX_toGO los puntos dentro las 4 ESUs mediante un carrito movible o con mochila, también las ESUs se

recogieron hojas de las distintas especies y se midieron en mesa de medidas de hoja con Fluowat + ASD FieldSpec3. En paralelo, se midió con ASD Fieldspec3 la reflectancia espectral de las especies de matorral y de las superficies (arena de duna, lonas de Cal/Val) y se realizaron vuelos UAV con la Cubert.

En cada punto de medida de FloX_toGO se realizaban tres repeticiones. Se han procesado estos datos utilizando la herramienta de SpaFLEX (Peón *et al*., 2025) que obtiene la SIF y reflectancia real integrada para el píxel de FLEX y estima la incertidumbre siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3. Se han procesado las medidas de L y E de la FloX y se ha estimado la SIF, Ref y sus incertidumbres aleatorias, sistemáticas y totales.



Figura 2. Despliegue de instrumentación y mediciones en la parcela de Monte Blanco de la RBD.

En la Figura 3 se muestran las medias y las incertidumbres de SIF correspondientes a cada ESU de la parcela de MN. Se puede observar una mayor incertidumbre en las ESUs 2 y 3. Se observa también una mayor SIF en la ESU1. También en la figura 3 se muestra el valor de SIF, y su incertidumbre integrada para el pixel de FLEX en MN. Para ello se ha realizado la media de los valores de las ESUs, reduciendo la incertidumbre a un 8% en la región O_2B (@687nm) que la deja fuera de requisitos, y un 2 % en la O_2A (@760nm) que si está dentro de requisitos ESA.

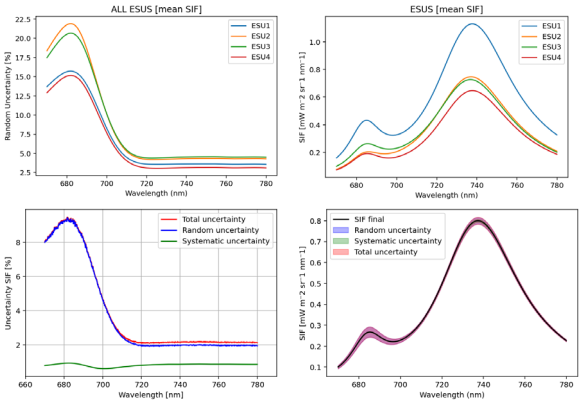


Figura 3. Valores de SIF y su incertidumbre de las ESUs de la parcela de Monte Negro. Gráficas inferiores son el valor de SIF y la incertidumbre integrada para el píxel de FLEX

5. CONCLUSIONES

El proyecto SpaFLEX establece el marco estratégico español de Cal/Val para la misión FLEX, mediante protocolos estandarizados de medidas fiduciales y una aproximación multiescala.

Tras tres años de ejecución, se han consolidado metodologías de caracterización instrumental en laboratorio y campañas de campo (*short* y *seasonal*) en ecosistemas clave. Los ensayos en cámara de crecimiento han servido para explicar la respuesta no lineal de la SIF ante situaciones de estrés.

En la campaña de Doñana 2025, la aplicación del protocolo en comunidades de matorral (Monte Blanco y Negro) permitió escalar la SIF al píxel de 300 m. Aunque la incertidumbre en la banda O_2B (8%) superó ligeramente los requisitos, los resultados en O_2A (2%) confirman la robustez de la estrategia para la validación de productos de nivel 2.

6. AGRADECIMIENTOS

El Proyecto de investigación SpaFLEX está financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades: Proyectos de Generación de Conocimiento (PID2022-137022OB-C31, C-32 y C-33), Proyectos de Colaboración Internacional (PCI2023-145955-2, PCI2023-1 46023-2 y PCI2023-145988-2).

El autor Ricardo Díaz-Delgado se encontraba afiliado a Estación Biológica de Doñana durante la realización de este trabajo. Actualmente está adscrito a Agencia Espacial Española. Su dirección de contacto actual es: ricardo.diaz@aee.gob.es

7. REFERENCIAS

Cendrero-Mateo, M.P., Jiménez, M., Díaz-Delgado, R., Peón, J., *et al*. SpaFLEX: A Comprehensive Approach to Calibrating and Validating FLEX Level-2 Products. European Space Agency Living Planet Symposium. DOI: 10.13140/RG.2.2.33764.23684. 23-27 June 2025, Vienna, Austria.

Moncholi-Estornell, A., S. Van Wittenberghe, M. Pilar Cendrero-Mateo, L. Alonso, M. Jiménez, P. Urrego, A. Mac Arthur, Moreno, J. (2023). FluoCat: A cable-suspended multi-sensor system for the vegetation SIF Cal/Val monitoring and estimation of effective sunlit surface fluorescence. International Journal of *Applied Earth Observation and Geoinformation, 116*, 103147.

Peón, J., Jiménez, M., Cendrero-Mateo, M.P., Moncholi-Estornell, A., Gorroño, J., Van Wittenberghe S., Moreno, J. (2024). Uncertainty Assessment in Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence Retrieval for FLEX Calibration and Validation Campaigns. EARSeL Valencia 2024.

Gómez-Giráldez, P.J., Aragonés, D., Jiménez, M., Cendrero-Mateo, M.P., Muela, J.A., Moncholi-Estornell, A., Moreno, J., Cobos, J. (2026). Estrategia de muestreo espacial multiescala para el diseño de campañas de validación dentro del proyecto SpaFLEX. XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Caceres, España.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.243

SIRIUS: Una misión candidata al programa SCOUT de la ESA en el infrarrojo térmico para la caracterización del entorno urbano

Sobrino, José Antonio [1] **Rodríguez-Alija, Alfonso** [2] **Vidal-Urriza, María A.** [2] **Moreno, Sergio** [2] **Pascual de la Torre, Luis** [2] **Romero, Jose** [2] **Sánchez-Labrador, Roberto** [2] **Branca, Federico** [2] **de Miguel Llanes, Eduardo** [3] **Carretero, Laura** [3] **Bobichon, Yves** [4] **Auruškevičius, Mantas** [5] **Proud, Simon** [6] **Paskeviciute-Kidron, Agne** [6] **Perrino, Adriana** [6] **Schifano, Luca** [6] **Skokovic, Drazen** [1] **LLorens, Rafael** [1]

[1] Unidad de Cambio Global, Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia. 4698 0 Paterna (Spain),

[2] Thales Alenia Space España, 28760 Tres Cantos (Spain)

[3] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), 28850 Torrejón de Ardoz (Spain)

[4] Thales Alenia Space (TAS), 06156 Cannes La Bocca (France)

[5] Kongsberg NanoAvionics UAB LT-08142 Vinius (Lithuania)

[6] European Space Agency (ESA), 2201 AZ Noordwijk (The Netherlands)

ORCID: Sobrino 0000-0003-3787-9373 Rodríguez-Alija 0009-0005-6615-5616 de Miguel Llanes 0000-0001-5284-5388 Carretero 0000-0001-5587-4707 Bobichon 0009-0000-2121-7565 Proud 0000-0003-3880-6774 Schifano 0000-0001-6191-7822 Skokovic 0000-0001-7103-9138 LLorens 0000-0002-1973-3437

Correspondencia: sobrino@uv.es alfonso.rodriguezalija@thalesaleniaspace.com maria-andrea.vidal-urriza@thalesaleniaspace.com sergio.moreno@thalesaleniaspace.com luis.pascual@thalesaleniaspace.com jose.romeroperez@thalesaleniaspace.com roberto.sanchez-labrador@thalesaleniaspace.com federico.brancaroncati@thalesaleniaspace.com demiguel@inta.es carreteroml@inta.es yves.bobichon@thalesaleniaspace.com mantas.auruskevicius@nanoavionics.com Simon.Proud@esa.int Agne.Paskeviciute-Kidron@esa.int Adriana.Perrino@ext.esa.int Luca.Schifano@esa.int drazen.skokovic@uv.es rafael.llorens@uv.es

RESUMEN

SIRIUS es una misión candidata al programa SCOUT de la ESA concebida para avanzar en la comprensión de los procesos de la Isla de Calor Urbana (UHI) mediante adquisiciones nocturnas repetibles sobre ciudades seleccionadas y observaciones multiangulares con geometría de visión controlada. La misión se basa en un satélite pequeño y ágil equipado con un sensor compacto no refrigerado (Smart-TIRI) con tres bandas en el infrarrojo térmico centradas en 8.85, 10.6 y 12.0 µm, lo que permite la estimación conjunta de la temperatura y la emisividad de la superficie (LST/LSE) mediante el algoritmo de separación temperatura–emisividad (TES). Con un muestreo espacial de 64 m y un ancho de barrido de aproximadamente 64 km, SIRIUS generará productos específicamente orientados al análisis de la UHI desde el Nivel L1 hasta el Nivel L3 (LST/LSE, SUHI, UTFVI, detección de puntos calientes e índice de Disconfort térmico), en complementariedad con las misiones térmicas LSTM, TRISHNA y SBG.

Palabras clave: *Isla de Calor Urbana; infrarrojo térmico; temperatura de la superficie terrestre; emisividad; TES; SCOUT.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

SIRIUS: Una misión candidata al programa SCOUT de la ESA en el infrarrojo térmico para la caracterización del entorno urbano

Sobrino, José Antonio [1], Rodríguez-Alija, Alfonso [2], Vidal-Urriza, María A. [2], Moreno, Sergio [2], Pascual de la Torre, Luis [2], Romero, Jose [2], Sánchez-Labrador, Roberto [2], Branca, Federico [2], de Miguel Llanes, Eduardo [3], Carretero, Laura [3], Bobichon, Yves [4], Auruškevičius, Mantas [5], Proud, Simon [6], Paskeviciute-Kidron, Agne [6], Perrino, Adriana [6], Schifano, Luca [6], Skokovic, Drazen [1], LLorens, Rafael [1]

[1] Unidad de Cambio Global, Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia. 4698 0 Paterna (Spain).

0000-0003-3787-9373, sobrino@uv.es ; 0000-0001-7103-9138, drazen.skokovic@uv.es
0000-0002-1973-3437, rafael.llorens@uv.es

[2] Thales Alenia Space España (Spain).
0009-0005-6615-5616, alfonso.rodriguezalija@thalesaleniaspace.com
maria-andrea.vidal-urriza@thalesaleniaspace.com; sergio.moreno@thalesaleniaspace.com
luis.pascual@thalesaleniaspace.com ; jose.romeroperez@thalesaleniaspace.com
roberto.sanchez-labrador@thalesaleniaspace.com ; federico.brancaroncati@thalesaleniaspace.com

[3] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) Torrejón de Ardoz (Spain).
0000-0001-5284-5388, demiguel@inta.es ; 0000-0001-5587-4707, carreteroml@inta.es.

[4] Thales Alenia Space (TAS), 06156 Cannes La Bocca (France)
0009-0000-2121-7565, yves.bobichon@thalesaleniaspace.com

[5] Kongsberg NanoAvionics UAB LT-08142 Vinius (Lithuania).
mantas.auruskevicius@nanoavionics.com.

[6] European Space Agency (ESA), AZ Noordwijk (The Netherlands).
0000-0003-3880-6774, simon.proud@esa.int ; agne.paskeviciute-kidron@esa.int.
adriana.perrino@ext.esa.int; 0000-0001-6191-7822, luca.schifano@esa.int.

Resumen: SIRIUS es una misión candidata al programa SCOUT de la ESA concebida para avanzar en la comprensión de los procesos de la Isla de Calor Urbana (UHI) mediante adquisiciones nocturnas repetibles sobre ciudades seleccionadas y observaciones multiangulares con geometría de visión controlada. La misión se basa en un satélite pequeño y ágil equipado con un sensor compacto no refrigerado (Smart-TIRI) con tres bandas en el infrarrojo térmico centradas en 8.85, 10.6 y 12.0 µm, lo que permite la estimación conjunta de la temperatura y la emisividad de la superficie (LST/LSE) mediante el algoritmo de separación temperatura–emisividad (TES). Con un muestreo espacial de 64 m y un ancho de barrido de aproximadamente 64 km, SIRIUS generará productos específicamente orientados al análisis de la UHI desde el Nivel L1 hasta el Nivel L3 (LST/LSE, SUHI, UTFVI, detección de puntos calientes e índice de Disconfort térmico), en complementariedad con las misiones térmicas LSTM, TRISHNA y SBG.

Palabras clave: Isla de Calor Urbana; infrarrojo térmico; temperatura de la superficie terrestre; emisividad; TES; misión SCOUT.

SIRIUS: A Candidate ESA SCOUT mission in the thermal infrared for the characterization of the urban environment

***Abstract**: SIRIUS is a Candidate ESA SCOUT mission conceived to advance the understanding of Urban Heat Island (UHI) processes through repeatable night-time acquisitions over selected cities and multi-angle observations with controlled viewing geometry. The mission relies on a small agile satellite carrying a compact uncooled imager (Smart-TIRI) with three longwave infrared (LWIR) bands centred near 8.85, 10.6, and 12.0 µm, enabling the joint retrieval of land surface*

temperature and emissivity (LST/LSE) through the temperature–emissivity separation (TES) algorithm. With 64 m spatial sampling and an approximately 64 km swath, SIRIUS will deliver products specifically tailored to UHI analysis from Level 1 to Level 3 (LST/LSE, SUHI, UTFVI, hot spot detection, and discomfort index), complementing the LSTM, TRISHNA, and SBG thermal missions.

***Keywords**: Urban Heat Island; thermal infrared; land surface temperature; emissivity; TES; Scout mission.*

1. INTRODUCCIÓN

Las misiones térmicas actuales no cubren plenamente las necesidades científicas para estudiar la Isla de Calor Urbana (UHI) a la escala espacial, temporal y angular requerida (Sobrino *et al*., 2012). Sistemas como Sentinel-3 ofrecen continuidad global, pero con una resolución insuficiente para analizar la variabilidad intraurbana, mientras que misiones de mayor resolución (Landsat, ECOSTRESS o la futura LSTM) no están diseñadas para realizar observaciones nocturnas repetibles con geometría de visión controlada sobre ciudades específicas. Sin un muestreo angular sistemático, los efectos direccionales asociados a la complejidad tridimensional urbana introducen incertidumbres significativas en la estimación de la temperatura y la emisividad de la superficie, así como en la comparación entre sensores.

SIRIUS surge para cubrir ese vacío observacional (Sobrino *et al*., 2016). Concebida como una misión SCOUT ágil y orientada en la ciencia, proporcionaría observaciones térmicas nocturnas de alta resolución (~64 m), con revisita diaria sobre ciudades seleccionadas y capacidad de adquisición angular controlada. Esta combinación permitirá cuantificar y modelizar la anisotropía térmica urbana, reducir los sesgos asociados a la geometría de observación en la estimación de LST/LSE y reforzar la comparabilidad de los productos entre misiones.

SIRIUS complementará a LSTM, TRISHNA y SBG al aportar observaciones nocturnas repetibles y capacidad multiangular específicamente orientadas al estudio del entorno urbano.

La justificación de SIRIUS se apoya en tres pilares: relevancia científica, al abordar procesos clave de la UHI y la dependencia angular de la señal térmica; urgencia social, al proporcionar información esencial para la adaptación al calor extremo y la planificación urbana; e innovación tecnológica, al demostrar un concepto térmico compacto, de bajo coste y optimizado para observación nocturna, que puede orientar futuras capacidades operacionales.

2. OBJETIVOS

Los objetivos científicos de la misión SIRIUS son los siguientes:

2.1. Comprensión del fenómeno de la Isla de Calor Urbana

SIRIUS tiene como objetivo principal mejorar la comprensión de la UHI y su impacto en los microclimas urbanos mediante observaciones térmicas nocturnas de alta resolución y revisita diaria. La misión proporcionará estimaciones robustas de temperatura y emisividad (LST/LSE), optimizadas para superficies urbanas heterogéneas, permitiendo analizar la magnitud, persistencia y estructura espacial de la UHI, así como apoyar la validación de modelos de balance energético y estrategias de mitigación.

2.2. Cuantificación y modelización de la anisotropía térmica urbana

SIRIUS permitirá caracterizar los efectos direccionales de la señal térmica en entornos urbanos complejos mediante adquisiciones off-nadir controladas a lo largo de la traza orbital. Este enfoque facilitará la cuantificación de la anisotropía térmica, la mejora de los algoritmos de separación temperatura–emisividad y la reducción de sesgos asociados a la geometría de observación, fortaleciendo la coherencia y comparabilidad de los productos térmicos urbanos.

2.3. Oportunidades científicas adicionales

Además de su foco urbano, SIRIUS ofrecerá oportunidades complementarias de alto valor científico:

- **Criósfera:** seguimiento de variabilidad térmica a corto plazo en permafrost, glaciares y hielo marino mediante observaciones nocturnas de alta resolución.
- **Ecosistemas acuáticos:** análisis de anomalías térmicas en aguas costeras e interiores, apoyando el estudio de procesos de estratificación, mezcla y estrés térmico.
- **Contaminación térmica antropogénica:** detección y monitorización de vertidos térmicos industriales y urbanos en entornos acuáticos.
- **Modelización direccional avanzada:** desarrollo y validación de modelos anisotrópicos mediante adquisiciones multiángulo sobre superficies homogéneas y heterogéneas, incluyendo estudios coordina-dos con otras misiones.

En conjunto, SIRIUS combina observación térmica nocturna de alta resolución, muestreo angular y flexibilidad operativa para generar un conjunto de datos único orientado tanto a la investigación fundamental como a aplicaciones en sostenibilidad y resiliencia climática.

3. ESPECIFICACIONES TECNICAS Y TECNOLOGÍA DEL SENSOR

SIRIUS es un microsatélite con una vida operativa prevista de al menos tres años. Tiene unas dimensiones

aproximadas de 658 × 641 × 546 mm en configuración plegada y 2571 × 598 × 508 mm en configuración desplegada, con una masa total de lanzamiento de 128 kg. La plataforma se basa en el modelo MP42 de Kongsberg NanoAvionics, e integra componentes y subsistemas con herencia de vuelo (Figura 1). La misión operará en una órbita heliosíncrona a 561 km de altitud, con un tiempo local de paso descendente nocturno entre las 22:00 y las 24:00 horas.

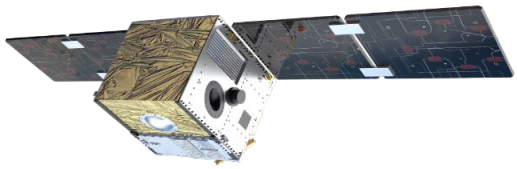


Figura 1. Representación del satélite SIRIUS con el instrumento SMART-TIRI y la plataforma MP42 en configuración desplegada.

La carga útil está compuesta por un único instrumento térmico de alta resolución, Smart-TIRI, diseñado para la observación urbana nocturna en el infrarrojo térmico. Opera en la ventana atmosférica de 8–12 µm y adquiere datos en tres bandas espectrales centradas en 8.85 µm, 10.6 µm y 12.0 µm. Incorpora un detector no refrigerado, optimizado para bajo consumo, estabilidad radiométrica y una arquitectura compacta, adecuada al contexto de una misión SCOUT. El sistema óptico está diseñado para una resolución espacial de aproximadamente 64 m y una anchura de barrido cercana a 64 km (véase la Tabla 1).

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la misión SIRIUS.

Parámetros de la misión	Bandas TIR
Bandas espectrales	8.85 µm | 10.60 µm | 12.00 µm
Incertidumbre LST	< 2 K
Sensibilidad LST (NEdt)	< 0.5 K
Precisión en la co-registración banda a banda	< 0.5 píxeles
Campo de vista (FoV) instantáneo en tierra	64 m x 64 m
Relación Señal-Ruido (SNR)	110 | 180 | 180
Ancho de barrido	64 km
Niveles de productos para los usuarios	L1, L2 (LST/LSE) & L3

Desde el punto de vista científico, Smart-TIRI permitirá la estimación conjunta de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) y de la Emisividad (LSE) mediante algoritmos de Separación Temperatura-Emisividad (TES). La combinación de estabilidad instrumental, coherencia radiométrica y capacidad multiangular hace de SIRIUS un demostrador científico y tecnológico de una nueva generación de misiones térmicas de bajo coste orientadas al estudio de la sostenibilidad urbana.

La validación futura de los productos incluirá campañas específicas, y, cuando proceda, comparaciones con observaciones de otras misiones térmicas, con el fin de evaluar la calidad de los productos LST/LSE y de los productos derivados de Nivel 3.

4. PRODUCTOS

En el Nivel 1, SIRIUS proporcionará radiancias calibradas y corregidas geométricamente, junto con la correspondiente temperatura de brillo. En el Nivel 2 se generarán la temperatura y la emisividad de la Superficie Terrestre (LST/LSE) mediante técnicas de Separación Temperatura–Emisividad (TES), apoyadas en productos intermedios como parámetros atmosféricos y detección de nubes. En el Nivel 3 se derivarán productos orientados al análisis de la Isla de Calor Urbana, incluyendo la Surface Urban Heat Island (SUHI) (Sobrino e Irakulis, 2020), el Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI) (Sobrino e Irakulis, 2020), los Urban Hot Spots (UHS) (Portela *et al*. 2020) y el índice de disconfort térmico (DI) (Thom, 1959) (Tabla 2).

Tabla 2. Productos de Nivel 3 de la misión SIRIUS.

Nombre del producto	Datos de entrada	Fórmula
SUHI	Sintética 100m LST, límite urbano	$LST_{urb} - LST_{rur}$
UTFVI	Sintética 100m LST, máscara urbana	$1 - \frac{LST_{urb-mean}}{LST}$
UHS	Sintética 100m LST, límite urbano	$LST > LST_{mean} + 2 * LST_{stdev}$
DI	Sintética 100m LST, ERA5 humedad relativa	$LST - (0.55 - 0.0055 * RH) * (LST - 14.5)$

Un ejemplo de estos productos puede observarse en las siguientes figuras obtenidas mediante simulación SIRIUS a partir de una imagen ECOSTRESS del 27 de junio de 2025. En la Figura 2 se muestra la imagen de temperatura y las zonas de referencia alrededor de la ciudad de Madrid de acuerdo con Sobrino e Irakulis (2020).

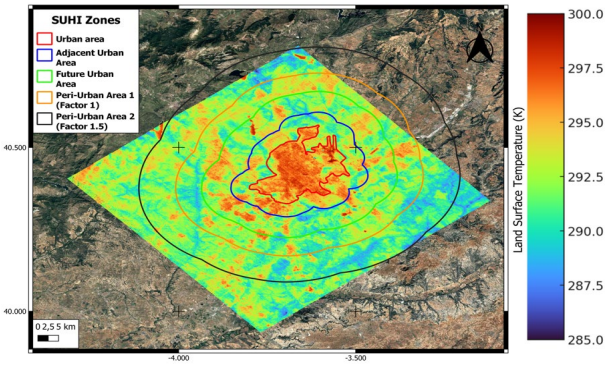


Figura 2. Imagen de temperatura obtenida a partir de una imagen simulada de SIRIUS para la ciudad de Madrid el 27 de junio de 2025 a las 01:42 UTC.

La Figura 3 muestra la intensidad de la SUHI calculada como la diferencia entre la temperatura de cada píxel urbano y la temperatura media de una zona rural

representativa. La referencia rural se selecciona en un área homogénea y representativa del entorno, situada a una altitud similar a la ciudad para minimizar sesgos topográficos. Se alcanzan diferencias de hasta 10 K.

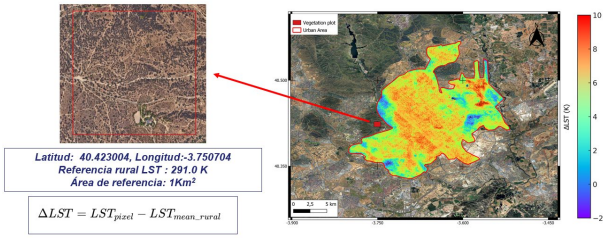


Figura 3. Mapa de diferencias de temperatura (ΔLST) entre cada píxel urbano de Madrid y la referencia rural, correspondiente al 27 de junio de 2025 a las 01:42 UTC.

Por último, en la Figura 4 se muestran los valores del Índice UTFVI para la ciudad de Madrid.

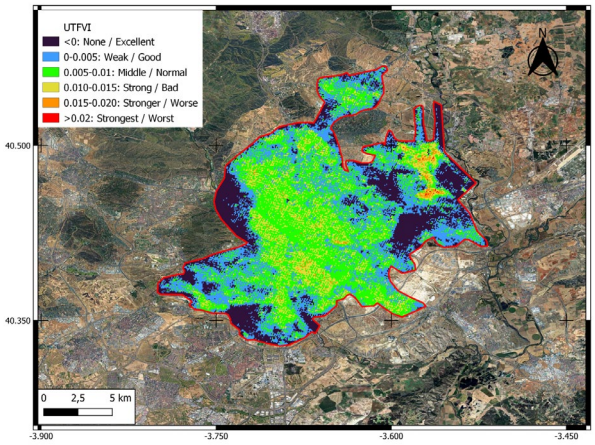


Figura 4. Valores del índice UTFVI obtenidos a partir de la imagen simulada de SIRIUS para Madrid.

5. CONCLUSIONES

SIRIUS se concibe como una misión científica orientada a cubrir una limitación crítica de la teledetección térmica actual: la ausencia de observaciones nocturnas sistemáticas de alta resolución con geometría de visión controlada sobre entornos urbanos. Su combinación de muestreo espacial fino (~64 m), revisita diaria y capacidad de adquisición angular controlada proporciona un marco observacional único para el estudio riguroso de la Isla de Calor Urbana (UHI).

La misión permitirá avanzar en la comprensión física de los procesos térmicos urbanos, reducir sesgos asociados a la geometría de observación en la estimación de LST y LSE, y mejorar la comparabilidad de los productos térmicos.

Los productos de Nivel 3, como SUHI, UTFVI, UHS e Índice de Disconfort, proporcionarán indicadores operativos y científicamente trazables para el análisis espacial del estrés térmico urbano, con aplicaciones directas en modelización climática urbana, planificación territorial y evaluación de estrategias de mitigación.

Además de su objetivo principal en el ámbito urbano, SIRIUS ofrecerá oportunidades científicas adicionales en criósfera, ecosistemas acuáticos y modelización direccional avanzada, ampliando su impacto más allá del contexto estrictamente urbano.

En conjunto, SIRIUS representa un demostrador científico y tecnológico dentro del marco SCOUT, aportando un conjunto de datos térmicos de alta calidad, específicamente diseñado para fortalecer la base observacional para el estudio del clima urbano y la resiliencia frente al calentamiento global.

Como misión Scout de la ESA, SIRIUS seguirá la política de acceso abierto y gratuito a los datos de observación de la Tierra,.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Espacial Europea (ESA), Contrato Nº. 4000148022/25/NL/CT, Second Scout Cycle: System Consolidation Studies.

7. REFERENCIAS

Gillespie, A., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothern, J.S., Hook, S., and Kahle, A., “A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 36* (4), 1113-1126 (1998). https://doi.org/10.1109/36.700995

Portela, KG Massi, T Rodrigues, E Alcántara. “Impact of urban and industrial features on land surface temperature: Evidences from satellite thermal indices”. *Sustainable Cities and Society, 2020, 56*, 102100. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102100

Sobrino, J.A. and Irakulis, I. (2020). A methodology for comparing the surface urban heat island in selected urban agglomerations around the world from sentinel-3 SLSTR Data, *Remote Sensing, 12*(12), p. 2052. https://doi.org/10.3390/rs12122052.

Sobrino, J. A., Fabio Del Frate, Matthias Drusch, Juan C Jiménez-Muñoz, Paolo Manunta, Amanda Regan. 2016. “Review of thermal infrared applications and requirements for future high-resolution sensors”. I*EEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 54* (5), 2963-2972.

Sobrino J.A, Oltra-Carrió R., Sòria G., Bianchi R., Paganini M. (2012). “Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects”. *Rem. Sens. Environ. 117* 50–56. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.042.

Thom, E.C. The Discomfort Index. Weatherwise 1959, 12, 57–61

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.249

Active and passive 3D sensing for forest stem geometry: Comparing MLS, consumer LiDAR, SfM and Gaussian Splatting

Carbonell Rivera, Juan Pedro [1,2] **Torralba, Jesús** [2] **Crespo-Peremarch, Pablo** [2] **McGlade, James** [1] **Simó-Martí, Marina** [2] **Ruiz, Luis Ángel** [2] **Teijido-Murias, Iyán** [3]

[1] Integrated Remote Sensing Studio (IRSS), Department of Forest Resources Management, Forest Science Centre, 2424 Main Mall, University of British Columbia, Vancouver, BC V6T 1Z4, Canadá

[2] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, València, España

[3] SmartForest Research Group, Asturias Raw Materials, Politechnic School of Mieres, University of Oviedo

ORCID: Carbonell Rivera 0000-0002-6724-6780 Torralba 0000-0001-8644-8604 Crespo-Peremarch 0000-0003-2241-4493 McGlade 0000-0001-8830-6626 Simó-Martí 0000-0001-9605-9645 Ruiz 0000-0003-0073-7259 Teijido-Murias 0009-0003-4699-8590

Correspondencia: jp.carbonellrivera@ubc.ca jetorpe@upv.es pabcrepe@cgf.upv.es james.mcglade@ubc.ca msimmar@upv.es laruiz@cgf.upv.es teijidoiyan@uniovi.es

ABSTRACT

Accurate characterization of tree stem geometry is essential for forest inventories, yet conventional field measurements of diameter at breast height (DBH) are limited to a single cross-section and do not capture vertical variability along the trunk. This study compares five approaches for stem characterization in a Mediterranean forest: mobile laser scanning (MLS), consumer-grade iPad-LiDAR, Structure from Motion (SfM) photogrammetry, Gaussian Splatting (GS), and manual field measurements. Data were acquired simultaneously within a 2.5 m radial plot. DBH was estimated through RANSAC-based circular fitting, and stem sections were extracted every 20 cm to assess diameter stability along the trunk. All techniques produced similar mean DBH values closely matching field measurements (23 cm), with MLS achieving the lowest RMSE (1.29 cm), followed by SfM (1.52 cm), GS (1.60 cm), and iPad-LiDAR (2.26 cm). However, marked differences were observed in vertical completeness. MLS captured the full vertical profile of the stems, reaching 14.11 m, whereas SfM and GS from iPhone, and iPad-LiDAR were limited to approximately 6 m or less. The results indicate that although low-cost image-based approaches can provide accurate DBH estimates under controlled conditions, MLS remains the most robust solution for comprehensive vertical stem characterization.

Keywords: *Mobile laser scanning, Structure from Motion, Gaussian Splatting, tree mensuration*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Active and passive 3D sensing for forest stem geometry: Comparing MLS, consumer LiDAR, SfM and Gaussian Splatting

Carbonell Rivera, Juan Pedro [1,2], Torralba, Jesús [2], Crespo-Peremarch, Pablo [2], McGlade, James [1], Simó-Martí, Marina [2], Ruiz, Luis Ángel [2], Teijido-Murias, Iyán [3]

[1] Integrated Remote Sensing Studio (IRSS), Department of Forest Resources Management, Forest Science Centre, University of British Columbia, Canadá.

0000-0002-6724-6780, jp.carbonellrivera@ubc.ca ; 0000-0001-8830-6626, james.mcglade@ubc.ca

[2] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, València, España.

0000-0001-8644-8604, jetorpe@upv.es ; 0000-0003-2241-4493, pabcrepe@cgf.upv.es

0000-0001-9605-9645, msimmar@upv.es ; 0000-0003-0073-7259, laruiz@cgf.upv.es

[3] SmartForest Research Group, Asturias Raw Materials, Politechnic School of Mieres, University of Oviedo.

0009-0003-4699-8590, teijidoiyan@uniovi.es

Abstract: Accurate characterization of tree stem geometry is essential for forest inventories, yet conventional field measurements of diameter at breast height (DBH) are limited to a single cross-section and do not capture vertical variability along the trunk. This study compares five approaches for stem characterization in a Mediterranean forest: mobile laser scanning (MLS), consumer-grade iPad-LiDAR, Structure from Motion (SfM) photogrammetry, Gaussian Splatting (GS), and manual field measurements. Data were acquired simultaneously within a 2.5 m radial plot. DBH was estimated through RANSAC-based circular fitting, and stem sections were extracted every 20 cm to assess diameter stability along the trunk. All techniques produced similar mean DBH values closely matching field measurements (23 cm), with MLS achieving the lowest RMSE (1.29 cm), followed by SfM (1.52 cm), GS (1.60 cm), and iPad-LiDAR (2.26 cm). However, marked differences were observed in vertical completeness. MLS captured the full vertical profile of the stems, reaching 14.11 m, whereas SfM and GS from iPhone, and iPad-LiDAR were limited to approximately 6 m or less. The results indicate that although low-cost image-based approaches can provide accurate DBH estimates under controlled conditions, MLS remains the most robust solution for comprehensive vertical stem characterization.

Keywords: Mobile laser scanning, Structure from Motion, Gaussian Splatting, tree mensuration.

Teledetección 3D activa y pasiva para la caracterización geométrica del fuste forestal: comparación entre MLS, LiDAR de consumo, SfM y Gaussian Splatting

Resumen: *La caracterización precisa de la geometría del fuste de los árboles es esencial para los inventarios forestales; sin embargo, las mediciones de campo convencionales del diámetro a la altura del pecho (DBH) se limitan a una única sección transversal y no capturan la variabilidad vertical a lo largo del tronco. Este estudio compara cinco enfoques para la caracterización del fuste en un bosque mediterráneo: escáner láser móvil (MLS), el LiDAR de un iPad, fotogrametría basada en Structure from Motion (SfM), Gaussian Splatting (GS) y mediciones manuales en campo. Los datos se adquirieron de forma simultánea en una parcela circular de 5 m de diámetro. El DBH se estimó mediante ajuste circular basado en RANSAC, y se extrajeron secciones del fuste cada 20 cm para evaluar la estabilidad del diámetro a lo largo del tronco. Todas las técnicas produjeron valores medios de DBH muy próximos a los medidos en campo (23 cm), siendo MLS la que alcanzó el menor RMSE (1,29 cm), seguida de SfM (1,52 cm), GS (1,60 cm) y LiDAR-iPad (2,26 cm). No obstante, se observaron diferencias significativas en la completitud vertical. MLS capturó el perfil vertical completo de los fustes, alcanzando 14,11 m, mientras que SfM y GS a partir de imágenes adquiridas de un iPhone y el LiDAR-iPad se limitaron aproximadamente a 6 m o menos. Los resultados indican que, aunque los enfoques basados en imágenes y de bajo coste pueden proporcionar estimaciones precisas de DBH bajo condiciones controladas, MLS sigue siendo la solución más robusta para una caracterización vertical integral del fuste.*

***Palabras clave**: Mobile laser scanning, Structure from Motion, Gaussian Splatting, dendometría.*

1. INTRODUCTION

Mediterranean forests are characterized by marked structural heterogeneity, where stem attributes play a central role in determining key dendrometric variables. Diameter at breast height (DBH) remains one of the most widely used parameters in forest inventories, as it directly underpins the estimation of timber volume, biomass, and carbon stocks (Gao & Kan, 2022). However, conventional field-based DBH measurements are restricted to a single cross-sectional observation at 1.3 m above ground, limiting the ability to describe diameter variation along the stem or to quantify trunk inclination and cumulative deviation from verticality.

Recent advances in three-dimensional (3D) reconstruction techniques have enabled detailed geometric characterization of individual tree stems through dense point clouds (Iglhaut *et al*., 2019). Similarly, smartphone devices with integrated LiDAR components have also increased accessibility to 3D data (Gollob *et al*., 2021). Mobile laser scanning (MLS) systems provide high-resolution and repeatable geometric measurements by enabling dynamic data acquisition along continuous trajectories. Compared with static ground-based laser scanning approaches, MLS significantly increases field efficiency, reduces acquisition time, minimizes the need for multiple scan positions, and simplifies post-processing workflows related to scan registration (Iglhaut *et al*., 2019). Despite these operational advantages, MLS systems still represent a considerable economic investment, generally ranging from approximately €5,000 to €60,000 depending on configuration, sensor integration, and positioning capabilities.

At the lower end of the economic spectrum, photogrammetric approaches based on Structure from Motion (SfM) enable 3D reconstruction from overlapping images acquired using any digital camera or smartphone, significantly reducing hardware requirements (Iglhaut *et al*., 2019). More recently, implicit scene representation methods such as Gaussian Splatting (GS) have demonstrated strong performance in generating dense and detailed 3D reconstructions (Fei *et al*., 2025). Conversion of these representations into point clouds enables direct geometric comparison with conventional LiDAR-derived datasets.

Despite the rapid evolution and increasing accessibility of these technologies, few studies have conducted an integrated comparison of MLS, consumer-device LiDAR, SfM photogrammetry, and GS under identical forest conditions. These techniques differ in maximum sensing range, point density, spatial precision, and surface reconstruction characteristics. Differences in acquisition principles (active sensing versus passive image-based reconstruction), point density distribution, occlusion sensitivity, and surface reconstruction strategies may substantially affect stem delineation accuracy and diameter estimation.

The primary objective of this study is to compare the geometric performance of five techniques for stem characterization in a Mediterranean forest environment: MLS, iPad-LiDAR, SfM photogrammetry, GS, and manual field measurements. Specifically, we aim to: (i) analyze differences in point cloud characteristics among the 3D reconstruction techniques; (ii) estimate DBH using each method; and (iii) evaluate the stability and consistency of stem circumference along the trunk by extracting cross-sectional diameters at 20 cm vertical intervals.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Study area

The study area (Fig. 1) is located within the Serra d'Espadà Natural Park, in the southern part of the province of Castellón, eastern Spain. The experimental site consisted of a circular plot with a 5 m diameter, located within a stand composed of five individuals of *P. pinaster*. The plot included mature pine stems with visible trunks, a shrub understory of varying density, and a forest floor covered by pine litter and scattered woody debris.

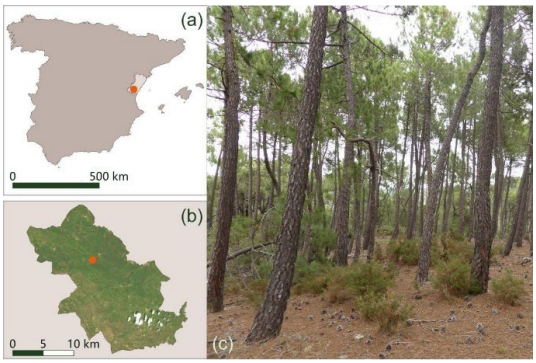


Figure 1. Location of the study area within the province of Castellón, eastern Spain (a). Orthophoto of the Serra d'Espadà Natural Park showing the position of the experimental plot (b). Field photograph of the plot (c).

2.2. Data collection and processing

Data acquisition was conducted concurrently in February 2025. For the iPad-LiDAR and GS datasets, two iPad devices were used: one dedicated to LiDAR scanning and the other for image acquisition intended for GS reconstruction. In contrast, the SfM dataset was generated using an iPhone camera. As shown in Figure 2, the devices were mounted on a rigid handheld photogrammetric base, allowing simultaneous data capture from multiple sensors while maintaining stable relative positioning. This configuration ensured spatial consistency among datasets and minimized temporal discrepancies during acquisition.

To georeference the datasets, polystyrene spheres were distributed within the plot and used as ground control targets. The coordinates of these spheres were measured using GNSS with a Post Processed Kinematic

(PPK) approach. Two Emlid receivers were employed: a Reach RS2+ configured as the base station and a Reach RS3 operating as the rover. Post-processing of GNSS observations enabled centimeter-level positioning of the control targets.



Figure 2. Photogrammetric acquisition base integrating the GS-iPad on the left, SfM-iPhone in the center, and LiDAR-iPad on the right.

2.2.1. MLS

MLS data were acquired using a ZEB-Horizon mobile laser scanner (GeoSLAM Ltd.), which has an acquisiton cost of approximately €35,000. Marker flags were placed around the circular plot to guide the operator in a flower-shape walking trajectory from the plot centre, ensuring complete stem coverage. The system operates at a wavelength of ≈ 905 nm, with a maximum range of about 100 m, a scan rate of up to 300,000 points per second, and a 360° horizontal field of view. According to manufacturer specifications, it provides up to 6 mm relative accuracy under optimal conditions. The capture time was five minutes. Raw MLS data were processed using the manufacturer's SLAM-based software, which performs trajectory estimation, loop closure correction, and point cloud generation through sensor fusion of LiDAR and IMU measurements. Processing time was 10 minutes on a desktop computer.

2.2.2. iPad-LiDAR

An iPad Pro 11″ (2024 model) was used to acquire LiDAR data following a SLAM based approach. The device integrates a solid-state LiDAR sensor operating at ≈ 940 nm, based on a direct time-of-flight principle. The sensor provides a maximum effective range of approximately 4 m under optimal conditions. The 2026 version of the device, which uses the same LiDAR sensor as the 2024 model, is available from €1,099, depending on storage capacity. For data acquisition, the circular plot was divided into four-quadrants, which were scanned independently. This quadrant-based acquisition strategy allowed controlled movement around the stems, improving coverage, reducing occlusion effects, and minimizing SLAM drift. Scanning was performed using the Scaniverse application, which generated three-dimensional point clouds including RGB color information from the integrated camera. The acquisition time per quadrant was approximately 3 minutes (the same as for iPhone-SfM and iPad-GS), with an additional 1 minute of processing on the iPad, allowing real-time visualization of the results during data acquisition. The four-quadrant scans were subsequently merged into a single point cloud using the georeferenced spheres.

2.2.3. iPhone-SfM

The SfM dataset was acquired using an iPhone 15 Pro, recording video at maximum resolution (3840 × 2160 pixels) and 30 frames per second. The iPhone 15 Pro features a 48 MP main wide-angle camera (focal length equivalent to 24 mm, f/1.78 aperture) equipped with a 1/1.28″ CMOS sensor and sensor-shift optical image stabilization. The 2026 version (iPhone 17 pro) of this device, which features the same sensor, is available from €1,319, depending on storage capacity. Individual frames were extracted from the video sequence and processed using Agisoft Metashape. The workflow followed the standard photogrammetric pipeline: feature detection and matching, camera alignment and bundle adjustment, sparse point cloud generation, and subsequent dense point cloud reconstruction through multi-view stereo algorithms. The resulting dense point cloud was scaled and georeferenced using the previously measured polystyrene sphere targets to ensure spatial consistency with the other datasets. Processing time was 20 hours using a PC equipped with an i9-13900KF and an NVIDIA GeForce RTX 4090.

2.2.4. iPad-GS

The GS dataset was acquired using a second iPad Pro 11″ (2024 model) following the same acquisition strategy. Image capture was performed using the Scaniverse application. This iPad integrates a 12 MP wide-angle rear camera (focal length equivalent to 24 mm, f/1.8 aperture) with a backside-illuminated CMOS sensor and Smart HDR processing. GS models the scene as a collection of anisotropic 3D Gaussians, each parameterized by spatial position, orientation, opacity, and radiometric attributes. This representation enables efficient optimization of a continuous volumetric model and high-quality surface reconstruction. For geometric comparison with the other datasets, the optimized Gaussian representation was converted to a discrete 3D point cloud by sampling the spatial distribution of the Gaussian primitives. The resulting point cloud was georeferenced using the polystyrene sphere targets. The processing time was 2 minutes per quadrant on the iPad, allowing real-time visualization of the results during data acquisition.

2.2.5. DBH and stem sections

Once the point clouds were generated and georeferenced, individual tree stems were manually segmented from each dataset (MLS, iPad-LiDAR, SfM, and GS). First, DBH was estimated. A cross-section centered at 1.30 m along the stem axis was extracted using a 5 cm thick slice. Points within this slice were projected onto a plane perpendicular to the estimated axis, and a circular fit was performed using the RANSAC algorithm to obtain the circumference. Second, the stem diameter sections were derived to evaluate diameter stability along the trunk. Cross-sections were extracted every 20 cm along the stem axis, starting at 0.20 m above the base and extending to the minimum common maximum height shared across all datasets to ensure comparability. For each height, the same 5 cm slicing and RANSAC-based circular fitting procedure was applied.

The resulting DBH and stem diameter measurements were compared against field reference data acquired using a caliper. In the field, two perpendicular diameter measurements were taken at breast height. The reference DBH was calculated as the mean of both measurements.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The resulting point clouds exhibited densities of 173,621 points·m^{-2}, 10,605 points·m^{-2}, 10,264 points·m^{-2}, and 10,109,961 points·m^{-2} for the MLS, GS, iPad LiDAR, and SfM techniques, respectively. However, this point density was not evenly distributed throughout the scene. As illustrated in Figure 3, although data acquisition was primarily focused on the stem, the MLS system captured well beyond the intended scanned area. The MLS point cloud extended to the full vertical profile of the trees, reaching a maximum height of 14.11 m and reconstructing the entire tree structure rather than only the targeted stem section. In contrast, Gaussian splatting reconstructed up to 6.17 m, iPad LiDAR up to 5.81 m, and SfM up to 5.24 m, indicating a more restricted vertical field of view for these approaches, largely limited to the SfM and GS sampling approach and the iPad LiDAR's limited acquisition range.

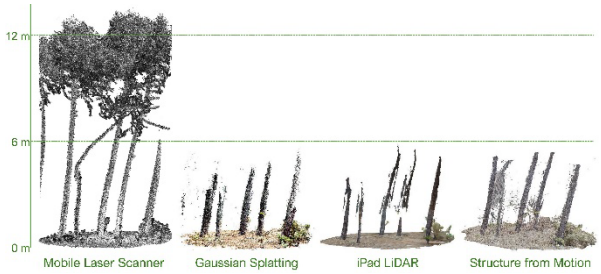


Figure 3. Visualization of the plot for the techniques MLS, GS, iPad-Lidar and SfM.

Table 1 shows that all 3D reconstruction techniques provide mean DBH values highly consistent with field measurements, with negligible differences around the reference value of 23 cm, indicating that breast height diameter can be reliably estimated regardless of acquisition principle. SfM achieved the lowest RMSE relative to field DBH, followed by MLS, GS, and iPad-LiDAR, suggesting that image-based photogrammetry can reach accuracy levels comparable to active laser scanning under controlled conditions. However, clear differences emerge when considering stem section extraction along the trunk. MLS and SfM achieved full section coverage within the common height range, with similar mean section heights and low variability, indicating stable vertical reconstruction. In contrast, GS reconstructed just over half of the potential sections, while iPad-LiDAR showed limited coverage and substantially higher variability, reflecting constraints in vertical completeness and geometric consistency.

Table 1. Summary statistics derived from DBH estimation and stem section analysis up to 5.20 m for each technique.

Method	DBH (mean±SD in m)	RMSE vs Field DBH (cm)	Stem sections (%completeness, mean±SD in m)
Field	0.23±0.08	-	-
GS	0.23±0.08	1.60	52.5%, 0.25±0.08
LiDAR-iPad	0.22±0.07	2.26	25%, 0.39±0.27
MLS	0.23±0.08	1.29	100%, 0.22±0.6
SfM	0.23±0.07	1.52	100%, 0.22±0.7

These results indicate that although DBH estimation alone may suggest comparable performance among techniques, their capacity to characterize stem geometry along the trunk differs considerably, with MLS providing the most complete vertical representation and SfM representing a cost-efficient alternative within a more restricted effective height range.

4. CONCLUSIONS

This study demonstrates that all evaluated 3D reconstruction techniques can reliably estimate DBH, with mean values closely matching field measurements and errors within a few centimeters, and SfM achieves the lowest RMSE under controlled conditions. However, clear differences arise in vertical completeness and stem section consistency: MLS provides the most complete and stable representation of the full trunk profile, while SfM achieves comparable accuracy within a more limited height range. Gaussian Splatting shows intermediate performance, and iPad-LiDAR presents notable constraints in vertical coverage and geometric stability. These results indicate that although low-cost approaches may be suitable for DBH-focused assessments, MLS remains the most robust option for comprehensive stem characterization. Technology selection should therefore consider the trade-off between geometric completeness, operational efficiency, and economic cost. However, it should be noted that the sample size and structural and species diversity of this study were limited. Future studies will include a larger number of plots with greater structural heterogeneity and species diversity.

5. ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Canadian Space Agency [Grant 24AO3UBC13], PID2024-158591OB-I00 funded by MICIU/AEI/10.13039/501100011033 and the European Social Fund Plus (ESF+), and the PAID-06-23 Early Research Projects grant from the Vice-Rectorate for Research of the Universitat Politècnica de València (UPV).

6. REFERENCES

Fei, B., Xu, J., Zhang, R., Zhou, Q., Yang, W., & He, Y. (2025). 3D Gaussian Splatting as a New Era: A Survey. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *31*(8), 4429–4449. https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3397828

Gao, Q., & Kan, J. (2022). Automatic Forest DBH Measurement Based on Structure from Motion Photogrammetry. *Remote Sensing*, *14*(9), 2064. https://doi.org/10.3390/rs14092064

Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A., & Nothdurft, A. (2021). Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology. *Remote Sensing*, *13*(16), 3129. https://doi.org/10.3390/rs13163129

Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: A Review. *Current Forestry Reports*, *5*(3), 155–168. https://doi.org/10.1007/S40725-019-00094-3

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.252

Muñoz, F.; Gutiérrez de la Cámara, Ó.; de Miguel, E.; Jiménez, M.; Carretero, L.; Peón, J.; Muela, J.; Cendrero-Mateo, M.; Moreno, J.; Moncholí-Estornell, A.; Gómez-Giráldez, P.; Cobos, J.; Díaz, R.; Aragonés, D.; Montoro, A.; Belmar, F.; Horsman, D.; Godoy, D.; Tapia, F. Sistema aeroportado CFL + CASI y campaña de adquisición de datos de fluorescencia en el proyecto SpaFLEX

Sistema aeroportado CFL + CASI y campaña de adquisición de datos de fluorescencia en el proyecto SpaFLEX

Muñoz, Félix [1] **Gutiérrez de la Cámara, Óscar** [1] **de Miguel, Eduardo** [1] **Jiménez, Marcos** [1] **Carretero, Laura** [1] **Peón, Juanjo** [1] **Muela, Jimmy A.** [1] **Cendrero-Mateo, Mª Pilar** [2] **Moreno, José** [2] **Moncholí-Estornell, Adrián** [2] **Gómez-Giráldez, Pedro J.** [3] **Cobos, Joaquín** [3] **Díaz, Ricardo** [3] **Aragonés, David** [3] **Montoro, Amelia** [4] **Belmar, Francisco** [5] **Horsman, David** [5] **Godoy, Diego** [5] **Tapia, Felipe** [5]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Madrid

[2] Universidad de Valencia (UV)

[3] Estación Biológica de Doñana (EBD)

[4] Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE)

[5] Heligrafics

ORCID: Muñoz 0000-0002-6421-8725 Gutiérrez de la Cámara 0000-0003-2555-9292 de Miguel 0000-0001-5284-5388 Jiménez 0000-0002-6852-2732 Carretero 0000-0001-5587-4707 Peón 0000-0001-7551-2236 Muela 0009-0002-9524-5483 Cendrero-Mateo 0000-0001-5887-7890 Moreno 0000-0002-5283-3333 Moncholí-Estornell 0000-0002-8832-2594 Gómez-Giráldez 0000-0002-1247-7557 Cobos 0000-0003-0285-7617 Díaz 0000-0002-0460-4616 Aragonés 0000-0003-4989-9005 Montoro 0000-0002-3491-6821

Correspondencia: munozsf@inta.es gutierrezcao@inta.es demiguel@inta.es jimenezmm@inta.es carreteroml@inta.es jpeogar@inta.es jmuepil@inta.es m.pilar.cendrero@uv.es jose.moreno@uv.es adrian.moncholi@uv.es pedro.gomez@ebd.csic.es joaquin.cobos@ebd.csic.es ricardo.diaz@aee.gob.es daragones@ebd.csic.es amelia.montoro@csic.es fbelmar@heligrafics.net dhorsman@heligrafics.net dgodoy@heligrafics.net ftapia@heligrafics.net

RESUMEN

El uso de sistemas aeroportados capaces de proporcionar estimaciones del observable SIF (Solar Induced Chlorophyll Fluorescence) es una herramienta de gran versatilidad para la calibración y validación de FLEX (FLuorescence Explorer). El INTA ha implementado el sensor de fluorescencia Headwall Chlorophyll-Fluorescence Imager (CFL) en un sistema de teledetección diseñado para plataformas aéreas tripuladas, junto con un sensor VNIR (visible e infrarrojo cercano) CASI 1500i y sus sistemas auxiliares INS/GPS (Inercial y GPS). Dentro del proyecto SpaFLEX se establecieron tres zonas en diversos ecosistemas ibéricos: Doñana (Huelva), La Roda (Albacete) y Sarrión (Teruel), aportando variabilidad en la cobertura vegetal y las condiciones ambientales. La adquisición de datos se realizó en coordinación con sensores en tierra (FLOX, Piccolo, ASD) y vehículos aéreos no tripulados, lo que permitió mediciones sincronizadas y coherencia multiplataforma entre las observaciones aerotransportadas e in situ. La campaña generó con éxito un conjunto de datos único, multiescala y multiplataforma, adecuado para un análisis integrado. Estos datos proporcionan una base clave para la validación de los algoritmos FLEX y la mejora de la calidad de los productos de Nivel 2.

Palabras clave: *Fluorescencia, CFL, aeroportado, FLEX, CASI*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Sistema aeroportado CFL + CASI y campaña de adquisición de datos de fluorescencia en el proyecto SpaFLEX

Muñoz, Félix [(1)], Gutiérrez de la Cámara, Óscar [(1)], de Miguel, Eduardo [(1)], Jiménez, Marcos [(4)], Carretero, Laura [(1)], Peón, Juanjo [(1)], Muela, Jimmy A. [(1)], Cendrero-Mateo, Mª Pilar [(8)], Moreno, José [(2)], Moncholí-Estornell, Adrián [(2)], Gómez-Giráldez, Pedro J. [(3)], Cobos, Joaquín [(3)], Díaz, Ricardo [(3)], Aragonés, David [(3)], Montoro, Amelia [(4)], Belmar, Francisco [(5)], Horsman, David [(5)], Godoy, Diego [(5)], Tapia, Felipe [(5)]

[(1)] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

0000-0002-6421-8725, munozsf@inta.es ; 0000-0003-2555-9292, gutierrezcao@inta.es
0000-0001-5284-5388, demiguel@inta.es ; 0000-0002-6852-2732, jimenezmm@inta.es
0000-0001-5587-4707, carreteroml@inta.es ; 0000-0001-7551-2236, jpeogar@inta.es
0009-0002-9524-5483, jmuepil@inta.es

[(2)] Universidad de Valencia (UV).

0000-0001-5887-7890, m.pilar.cendrero@uv.es ; 0000-0002-5283-3333, jose.moreno@uv.es
0000-0002-8832-2594, adrian.moncholi@uv.es

[(3)] Estación Biológica de Doñana (EBD).

0000-0002-1247-7557, pedro.gomez@ebd.csic.es ; 0000-0003-0285-7617, joaquin.cobos@ebd.csic.es
0000-0002-0460-4616, ricardo.diaz@aee.gob.es; 0000-0003-4989-9005, daragones@ebd.csic.es

[(4)] Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE).

0000-0002-3491-6821, amelia.montoro@csic.es

[(5)] Heligrafics.

fbelmar@heligrafics.net ; dhorsman@heligrafics.net ; dgodoy@heligrafics.net ; ftapia@heligrafics.net

Resumen: El uso de sistemas aeroportados capaces de proporcionar estimaciones del observable SIF (*Solar Induced Chlorophyll Fluorescence*) es una herramienta de gran versatilidad para la calibración y validación de FLEX (*FLuorescence Explorer*). El INTA ha implementado el sensor de fluorescencia Headwall *Chlorophyll-Fluorescence Imager* (CFL) en un sistema de teledetección diseñado para plataformas aéreas tripuladas, junto con un sensor VNIR (visible e infrarrojo cercano) CASI 1500i y sus sistemas auxiliares INS/GPS (Inercial y GPS). Dentro del proyecto SpaFLEX se establecieron tres zonas en diversos ecosistemas ibéricos: Doñana (Huelva), La Roda (Albacete) y Sarrión (Teruel), aportando variabilidad en la cobertura vegetal y las condiciones ambientales. La adquisición de datos se realizó en coordinación con sensores en tierra (FLOX, Piccolo, ASD) y vehículos aéreos no tripulados, lo que permitió mediciones sincronizadas y coherencia multiplataforma entre las observaciones aerotransportadas e in situ. La campaña generó con éxito un conjunto de datos único, multiescala y multiplataforma, adecuado para un análisis integrado. Estos datos proporcionan una base clave para la validación de los algoritmos FLEX y la mejora de la calidad de los productos de Nivel 2.

Palabras clave: Fluorescencia, CFL, aeroportado. FLEX, CASI.

Airborne CFL + CASI System and Fluorescence Data Acquisition Campaign within SpaFLEX Project

***Abstract**: The use of airborne systems capable of providing estimates of the Solar-Induced Fluorescence (SIF) observable constitutes a highly versatile tool for the calibration and validation of FLEX (*FLuorescence Explorer*). INTA has implemented the Headwall Chlorophyll Fluorescence Imager (CFL) sensor within a remote sensing system specifically designed for manned airborne platforms, in conjunction with a VNIR (Visible and Near-Infrared) CASI 1500i sensor and its associated INS/GPS auxiliary systems. Within SpaFLEX Project, three study sites were established across diverse Iberian ecosystems: Doñana (Huelva), La Roda (Albacete), and Sarrión (Teruel), thereby encompassing variability in vegetation cover and environmental conditions. Data collection was conducted in coordination with ground-based sensors (FLOX, Piccolo, ASD) and*

unmanned aerial vehicles, enabling synchronized measurements and ensuring multi-platform consistency among airborne, and in situ observations. The campaign successfully generated a unique, multi-scale, multi-platform dataset suitable for integrated analysis. These data provide a fundamental basis for the validation of FLEX algorithms and for improving the quality of Level 2 products.

***Keywords**: Fluorescence, CFL, airborne, FLEX, CASI.*

1. INTRODUCCIÓN

La misión FLEX de la Agencia Espacial Europea (ESA), cuyo lanzamiento está previsto para 2026, tiene como objetivo medir la fluorescencia inducida por el Sol (SIF) en la vegetación, un indicador robusto de la actividad fotosintética y del estrés vegetal. FLEX operará en tándem con Sentinel-3, proporcionando productos con una resolución espacial de 300 m. La calibración y validación de FLEX requieren el uso de sistemas aerotransportados capaces de proporcionar estimaciones del observable SIF. Uno de ellos es el sensor de fluorescencia Headwall *Chlorophyll-Fluorescence Imager* (CFL) del INTA, diseñado para plataformas aéreas tripuladas.

El objetivo general del proyecto SpaFLEX es desarrollar un plan español de Cal/Val para los productos FLEX. Este plan incluye la selección de sitios de ensayo representativos, protocolos de medida y cálculos de incertidumbre para los productos de Nivel 2 (reflectancia y fluorescencia). La estrategia se basa principalmente en dos pilares clave: un énfasis reforzado en las prácticas metrológicas para garantizar la trazabilidad a lo largo de toda la cadena de procesamiento, y la provisión de la incertidumbre de medida para cada mensurando, idealmente a nivel de píxel (Cendrero-Mateo M.P. *et al*, 2025). Las campañas aeroportadas proporcionan datos esenciales a escala media sobre grandes áreas con alta eficiencia, lo que permite mejorar los algoritmos y modelos que estiman la propagación de la fluorescencia y la reflectancia.

2. MATERIALES

2.1. Chlorophyll-Fluorescence Imager (CFL)

El CFL es un sensor hiperespectral que puede registrar hasta 2160 bandas espectrales en el rango 670-780 nm. El sistema electrónico de lectura y control permite la configuración de *binning* espectral y espacial en valores de 1, 2 y 4, y el uso de tiempos de integración variables, típicamente entre 10 y 100 ms (de Miguel *et al*. 2022). Las especificaciones del CFL se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas CFL

Rango espectral (nm)	670-780
Píxeles espectrales	2160
Píxeles espaciales	1600
Muestreo espectral (nm/píxel)	0,051
FWHM (nm)	0,2
FOV (Field Of View) (°)	23,5
iFOV (°)	0,015
Número f	f/2,5
Distancia focal lente (mm)	25
SNR	120:1

2.2. Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI 1500i)

El CASI (Tabla 2) es un espectrómetro de tecnología *pushbroom*, diseñado para aplicaciones de teledetección de alta resolución espectral y espacial. El sensor dispone de una matriz de hasta 1500 píxeles por línea, con una resolución radiométrica de 14 bits. El sistema integra una Unidad de Medida Inercial (IMU) acoplada al módulo detector, que proporciona parámetros precisos de posición y actitud de la plataforma durante la adquisición.

Tabla 2. Especificaciones técnicas CASI 1500

Rango espectral (nm)	380-1050
Píxeles espectrales	Hasta 288
Píxeles espaciales	1440
Anchura de Muestreo (nm)	2,4
FOV (Field Of View) (°)	40
iFOV	0.49mrad

2.3. Plataforma Partenavia P68

La aeronave Partenavia P68 *Observer* (Fig. 1), empleada habitualmente en operaciones aerofotográficas proporciona una plataforma aérea adecuada para misiones de adquisición hiperespectral gracias a su configuración de ala alta, un campo de visión nadir sin obstrucciones y una arquitectura de cabina adaptable.



Figura 1. P68 Observer, en el aeródromo de Requena.

3. MÉTODOS

3.1. Integración de sistema aeroportado

El sistema de adquisición hiperespectral diseñado para SpaFLEX fue especificado por el Área de Sistemas de Teledetección del INTA e integrado en la plataforma aérea por la empresa Heligrafics. Este sistema se basa en la implementación de los sensores CFL y CASI1500i del INTA, junto con sus sistemas de posicionamiento Applanix GPS+INS asociados. Se diseñaron y calcularon las interfaces mecánicas adecuadas para la nueva aeronave (Fig. 2), teniendo en cuenta que no existiese apantallamiento de la señal ni interferencias físicas con el fuselaje u otros elementos de la aeronave.

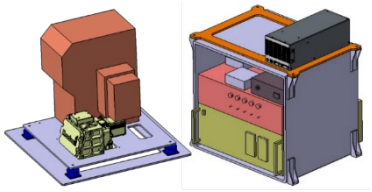


Figura 2. Disposición sensores y módulos de control.

La aeronave cuenta con un sistema de alimentación para instrumentación a 28 VDC (voltios en corriente continua). Se adaptó una unidad distribuidora de potencia, junto con un pequeño conversor adicional, para extraer los voltajes apropiados destinados a cada una de las unidades de los sistemas y se instaló en el rack de 19'.

El módulo de control del CFL cumple con la norma RTCA DO-160 (Condiciones ambientales y procedimientos de prueba para equipos aeroportados). Se adaptó el sensor CFL, inicialmente concebido para la adquisición mediante operador, a un régimen de funcionamiento en autónomo mediante el desarrollo de herramientas creadas ad hoc. Gracias al sistema INS/GNSS, embebido en el propio sensor y al software Hyperspec® III, la adquisición de datos tiene la posibilidad de activarse cuando la plataforma entra en un polígono predefinido durante el diseño de la campaña. La corrección geométrica de los datos, así como su georreferenciación hace imprescindible contar con un sistema INS/GNSS. En el caso del CFL se cuenta con el Applanix APX-15. La aeronave cuenta con una trampilla estándar de 63 x 46 cm en la parte inferior del fuselaje, diseñada para la instalación de equipos de observación terrestre (Fig. 3). La escotilla está situada en el centro derecha y se acciona con una manivela manual durante el vuelo.



Figura 3. Montaje sistema (izq.) y trampilla (dcha.).

3.2. Campaña adquisición de datos

Se establecieron tres sitios de Cal/Val en diversos ecosistemas ibéricos: Doñana (Huelva), La Roda (Albacete) y Sarrión (Teruel), aportando variabilidad en la cobertura vegetal, la geometría y las condiciones ambientales. La planificación reservó dos semanas para la realización de la campaña aeroportada SpaFLEX 2025. La primera semana se dedicó a la instalación de los sistemas en la plataforma aérea, la verificación de su funcionamiento en tierra, la realización del vuelo de prueba y a la evaluación final necesaria de los datos para declarar el sistema como apto para la adquisición.

Durante la segunda semana se coordinó la campaña entre todos los grupos participantes, lo que incluyó la organización detallada de las operaciones aéreas y su integración con las actividades de campo. Las operaciones de vuelo se llevaron a cabo durante dos días consecutivos, 7–8 de octubre de 2025, para garantizar la cobertura completa de las tres zonas de interés. Esta planificación se seleccionó para maximizar la adquisición de datos bajo condiciones atmosféricas favorables. El área de estudio se subdividió en siete polígonos, delimitados en función de la distribución espacial de la instrumentación in situ, la cobertura vegetal y las torres *Eddy Covariance*, abarcando una superficie total de aproximadamente 700 hectáreas. La adquisición de datos se realizó de forma coordinada con sensores en tierra (FLOX, Piccolo, ASD) y vehículos aéreos no tripulados instrumentados, lo que permitió mediciones sincronizadas y coherencia multiplataforma entre las observaciones satelitales, aeroportadas e in situ. Las pasadas de adquisición se planificaron en configuración Norte-Sur y con una velocidad de 120 KTS (62 ms-1).

3.2.1. Zonas Sarrión y La Roda: Vuelo 7 Oct

El 7 de octubre de 2025, la presencia de niebla densa retrasó el inicio de la adquisición en la primera zona de interés, Sarrión, hasta las 12:26 UTC. El registro de datos CASI falló inicialmente, pero durante el trayecto a La Roda pudieron realizarse acciones correctivas y el sistema volvió a operar de manera nominal. Durante la adquisición se desarrolló de manera simultánea una campaña de campo con la siguiente instrumentación: ASD, FLOX. Para maximizar la señal del CASI y basándonos en los datos del vuelo de prueba y de ensayos en tierra se ajustó la configuración espectral a una suma de 6 canales espectrales (*Row Sumation* 6), lo que da un ancho espectral de 14,4 nm. En la Tabla 3 se muestra el tamaño de pixel de los datos CASI teniendo en consideración que la altura de vuelo fue de 2160 m sobre el terreno. El mínimo tiempo de integración para esta configuración es de 32 ms.

Tabla 3. Tamaño de pixel CASI 1500

Tamaño del píxel en el nadir – GSD	
Across track	1.06m @ AGL 2164m Z01 Sarrión 1.07m @ AGL 2184m Z02 Manzanera
Along track	1.98m @IT32ms y 62 ms-1 (GS120KTS)

3.2.2. Zona Doñana: Vuelo 8 Oct

El vuelo se diseñó con 9 pasadas de 2 kilómetros de longitud, repartidas en tres zonas: Monte Blanco, Sabinar y Monte Negro. Cada uno de estos polígonos se encuentra centrado en una torre *Eddy Covariance*. A las 10:55 UTC se alcanzó la zona de estudio (Fig. 4), comenzando por Monte Negro. La altura de vuelo fue de 1791 m sobre el terreno y el tamaño de pixel CFL en el nadir es de 1,82 m *across track* x 2,04 m *along track* (tiempo de integración de 33 ms). En la dimensión espacial se realizó un *binning* x4 lo que proporciona 320 pixel/línea. Al finalizar la adquisición, se registró un archivo *dark frames* con la trampilla del avión cerrada.

4. RESULTADOS

Las imágenes adquiridas en la campaña se han integrado en el sistema de proceso de datos hiperespectrales del INTA. Como resultado se han generado ya los productos L1b (radiancias calibradas) e

IGM (ficheros de coordenadas cartográficas por píxel), así como parámetros de calidad de los datos. La Tabla 4 resume las escenas disponibles.



Figura 4. Trayectoria de vuelo sobre Doñana.

Tabla 4. Escenas datos CASI y CFL disponibles

Zona test	CASI 1500i	CFL
I Sarrión	0	3
II Manzanera	0	3
III La Roda	6 (12) *	6
IV Doñana (MN)	3	3
V Doñana (SB)	3	3
VI Doñana (MB)	3	3

**Nota: una de las escenas se adquirió 2 veces y otra 6*

En el caso de La Roda, el solape entre escenas es muy alto, lo que posibilita analizar la dependencia temporal de las variables en estudio. En las imágenes CASI se dispone además de repeticiones adicionales de algunas pasadas, que permitirán un análisis particularmente detallado de este aspecto. La simultaneidad en la adquisición de ambos sensores también permite comparar los resultados entre ellos.

La Tabla 5 muestra el valor de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) estimado para diferentes bandas de cada sensor en la zona de La Roda. En el CASI, el SNR se obtiene analizando los datos obtenidos al observar la superficie a través de un filtro difusor (al inicio y final de cada imagen), es decir para una señal equivalente a la media del terreno. En el CFL no existe un dispositivo equivalente, y el SNR se aproxima considerando como señal la radiancia media de la escena y como ruido la desviación típica mínima de todos los subconjuntos posibles de 32 pixels dentro de una misma columna imagen. El menor valor del CFL es esperable dada su muy alta resolución espectral.

Tabla 5. SNR para diferentes longitudes de onda, estimado a partir de los datos obtenidos en La Roda

Longitud de onda (λ)	CASI 1500i	CFL
545	310	-
675	239	49
688	229	47
730	225	63
760	192	28
775	225	59
903	89	-

La Figura 5 muestra la radiancia espectral registrada por el CFL sobre un cultivo en regadío en la zona test de La Roda, mostrando el patrón de absorción típico en la región O2-A, que permite la detección de la fluorescencia de la vegetación.

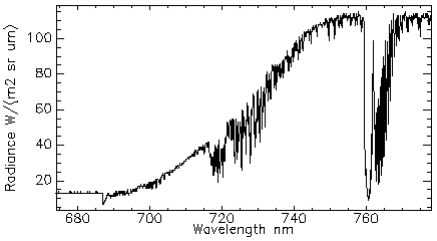


Figura 5. Radiancia espectral registrada por el CFL

La Figura 6 muestra ejemplos de las escenas adquiridas en la Roda y Doñana; la imagen CFL se ha superpuesto a la imagen CASI, de mayor cobertura lateral.

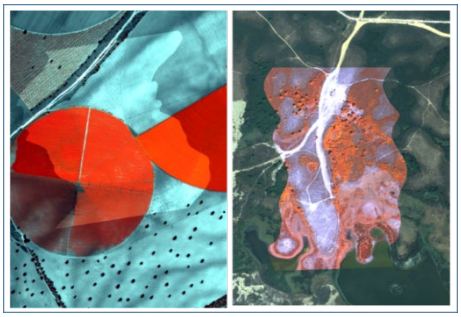


Figura 6. Imagen RGB a partir de datos CFL sobre las zonas test de La Roda (izquierda) y Doñana - Monte Negro (derecha), superpuesta a una imagen CASI (respectivamente infrarrojo color y color natural).

5. CONCLUSIONES Y FUTURO

La campaña generó con éxito un conjunto de datos único, multiescala y multiplataforma, adecuado para un análisis integrado. Estos datos proporcionan una base fundamental para la validación de los algoritmos FLEX y la mejora de la calidad de los productos de Nivel 2.

El desarrollo del sistema operacional e integrado de teledetección aeroportada implementado en esta campaña es exportable a diversas plataformas debido a su versatilidad, autonomía de operación y capacidades. La instalación en pods subalares o aeronaves no tripuladas tipo MALE (*Medium Altitude Long Endurance*) es posible realizando los ajustes necesarios.

6. REFERENCIAS

De Miguel, E., Carretero, L., Gutiérrez-de la Cámara, O., Jiménez, M., Muñoz-Sánchez, *et al*. 2022. Caracterización del sensor aeroportado CFL del INTA. Actas del XIX Congreso de la Asociación Española de Teledetección, pp. 429-432. 2022, Pamplona.

Cendrero-Mateo M.P., Jiménez M., Díaz-Delgado R., Peón J., *et al*. SpaFLEX: A Comprehensive Approach to Calibrating and Validating FLEX Level-2 Products. European Space Agency Living Planet Symposium. DOI: 10.13140/RG.2.2.33764.23684. 23-27 June 2025, Vienna, Austria.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.261

NB-IoT sobre 5G NTN como habilitador de comunicaciones CNPC resilientes para UAVs en operaciones BVLOS

Kassimi Farhaoui, Mouhsine [1] **Pariente Migoya, Alejandro** [1] **Pérez Grau, Francisco Javier** [1] **Viguria Jiménez, Antidio** [1] **Cruces Pérez, Joaquín** [2] **Guirado Luna, Adrián** [2] **Aguilar Romero, Sergio** [2]

[1] CATEC, España

[2] SATELIOT, España

ORCID:

Correspondencia: mkassimi@catec.aero apariente@catec.aero fjperez@catec.aero aviguria@catec.aero joaquin.cruces@sateliot.com adrian.guirado@sateliot.com sergio.aguilar@sateliot.com

RESUMEN

Este trabajo presenta un sistema de comunicaciones embarcado, basado en NB-IoT sobre 5G Non-Terrestrial Networks (NTN), y diseñado para soportar comunicaciones CNPC (Command and Non-Payload Communications) de baja tasa en operaciones BVLOS (Beyond Visual Line Of Sight) para UAVs (Unmanned Aerial Vehicles). Dicho sistema opera como un módulo híbrido terrestre–satelital independiente, desacoplado de la aviónica y la carga útil. La solución fue validada experimentalmente mediante vuelos reales en entorno rural con cobertura terrestre limitada. Se evaluaron latencia de extremo a extremo, tasa de entrega de paquetes, estabilidad del enlace y consumo energético. Los resultados muestran latencias de segundos, tasas de entrega superiores al 90–95 % y consumos en el rango de cientos de mW, demostrando que NB-IoT sobre 5G NTN constituye una solución viable y energéticamente eficiente para supervisión BVLOS y comunicaciones de contingencia.

Palabras clave: *5G NTN, NB-IoT, UAV BVLOS, CNPC, arquitectura híbrida terrestre–satelital*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

NB-IoT sobre 5G NTN como habilitador de comunicaciones CNPC resilientes para UAVs en operaciones BVLOS

Kassimi Farhaoui, Mouhsine [(1)], Pariente Migoya, Alejandro [(1)], Pérez Grau, Francisco Javier [(1)], Viguria Jiménez, Antidio [(1)], Cruces Pérez, Joaquín [(2)], Guirado Luna, Adrián [(2)], Aguilar Romero, Sergio [(2)]

[(1)] CATEC, España.

mkassimi@catec.aero ; apariente@catec.aero ; fjperez@catec.aero ; aviguria@catec.aero

[(2)] SATELIOT, España.

joaquin.cruces@sateliot.com ; adrian.guirado@sateliot.com ; sergio.aguilar@sateliot.com

Resumen: Este trabajo presenta un sistema de comunicaciones embarcado, basado en NB-IoT sobre 5G Non-Terrestrial Networks (NTN), y diseñado para soportar comunicaciones CNPC (*Command and Non-Payload Communications*) de baja tasa en operaciones BVLOS (*Beyond Visual Line Of Sight*) para UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*). Dicho sistema opera como un módulo híbrido terrestre–satelital independiente, desacoplado de la aviónica y la carga útil. La solución fue validada experimentalmente mediante vuelos reales en entorno rural con cobertura terrestre limitada. Se evaluaron latencia de extremo a extremo, tasa de entrega de paquetes, estabilidad del enlace y consumo energético. Los resultados muestran latencias de segundos, tasas de entrega superiores al 90–95 % y consumos en el rango de cientos de mW, demostrando que NB-IoT sobre 5G NTN constituye una solución viable y energéticamente eficiente para supervisión BVLOS y comunicaciones de contingencia.

Palabras clave: 5G NTN, NB-IoT, UAV BVLOS, CNPC, arquitectura híbrida terrestre–satelital.

NB-IoT over 5G NTN as an Enabler of Resilient CNPC Communications for UAVs in BVLOS Operations

Abstract: *This paper presents an onboard communications system based on NB-IoT over 5G Non-Terrestrial Networks (NTN), designed to support low-rate Command and Non-Payload Communications (CNPC) in Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) operations for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). The system operates as a standalone hybrid terrestrial–satellite module, fully decoupled from the avionics and payload. The solution was experimentally validated through real flight tests in a rural environment with limited terrestrial coverage. End-to-end latency, packet delivery rate, link stability, and energy consumption were evaluated. Results show latencies in the order of seconds, packet delivery rates above 90–95%, and power consumption in the range of hundreds of milliwatts, demonstrating that NB-IoT over 5G NTN constitutes a viable and energy-efficient solution for BVLOS supervision and contingency communications.*

Keywords**:** *5G NTN, NB-IoT, UAV BVLOS, CNPC, hybrid terrestrial–satellite architecture.*

1. INTRODUCCIÓN

Las operaciones *Beyond Visual Line Of Sight* (BVLOS) con vehículos aéreos no tripulados o *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs) requieren enlaces de comunicaciones fiables que garanticen la supervisión continua, el cumplimiento normativo y la seguridad operacional. En particular, las comunicaciones de mando y control no asociadas a la carga útil, o *Command and Non-Payload Communications* (CNPC), constituyen un elemento crítico para mantener conocimiento de situación y capacidad de intervención ante contingencias.

Las soluciones convencionales, basadas en enlaces radio en línea de vista o en redes celulares terrestres, presentan limitaciones significativas en entornos rurales, marítimos o con infraestructura limitada. Estas restricciones comprometen la disponibilidad y continuidad del enlace en misiones BVLOS de largo alcance.

En este contexto, las Redes No Terrestres o *Non-Terrestrial Networks* (NTN) integradas en el ecosistema 5G permiten extender la conectividad más allá de la cobertura terrestre tradicional. La combinación de 5G NTN con NB-IoT ofrece enlaces de baja tasa, bajo consumo energético y tolerantes a latencias variables, adecuados para telemetría y tráfico CNPC supervisor.

La **Figura 1** ilustra el concepto de UAV equipado con un subsistema de comunicaciones independiente tipo “caja negra”, orientado a proporcionar conectividad de contingencia y supervisión BVLOS mediante un modelo híbrido terrestre–satelital.



Figura 1. Dron volando con sistema de contingencia BlackBox

2. REQUISITOS DE COMUNICACIONES PARA OPERACIONES BVLOS CON UAV

Las comunicaciones BVLOS para UAV deben satisfacer requisitos directamente vinculados a la seguridad operacional y las comunicaciones CNPC, priorizando continuidad, robustez y previsibilidad frente a capacidad bruta, con compatibilidad con restricciones estrictas de tamaño, peso y potencia (SWaP).

En términos de calidad de servicio, los enlaces CNPC toleran latencias del orden de segundos y bajo *throughput* (kbps), pero requieren estabilidad temporal, pérdidas no sostenidas y recuperación automática tras interrupciones temporales.

Todo esto anterior se resume en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Requisitos de calidad de servicio.

Requisito	Descripción	Impacto	Requisito
Retardo acotado y consistente	Tolerancia a latencias del orden de segundos; no requiere tiempo real estricto	Permite supervisión estable sin necesidad de ultra-baja latencia	Retardo acotado y consistente
Baja tasa de transferencia efectiva requerida	Desde pocos kbps hasta cientos de kbps según frecuencia y estructura de mensajes	Hace viables tecnologías de banda estrecha (NB-IoT, NTN, etc.)	Baja tasa de transferencia efectiva requerida
Alta, pero no estrictamente perfecta	PLR < ~10 %; pérdidas puntuales tolerables, sostenidas no aceptables	Mantiene conocimiento de situación y control supervisor	Alta, pero no estrictamente perfecta

La naturaleza de estos parámetros hace que tecnologías de banda estrecha como NB-IoT sobre 5G NTN resulten adecuadas para soportar comunicaciones en entornos con cobertura terrestre limitada.

3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES

La arquitectura propuesta se basa en un subsistema embarcado, diseñado explícitamente para operar de forma independiente del sistema de control de vuelo del UAV y de los enlaces de datos de la carga útil. Este desacoplamiento está orientado a incrementar la robustez del sistema, simplificar la integración en distintas plataformas UAV y garantizar la continuidad de las comunicaciones CNPC tanto en condiciones de operación nominales como degradadas. La **Figura 2** muestra la arquitectura de la comunicación.

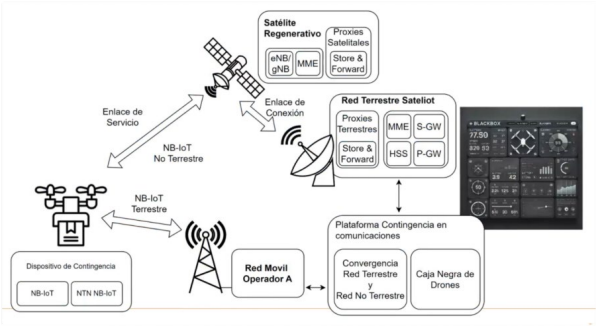


Figura 2. Arquitectura de comunicaciones NB-IoT/5G NTN para UAV, con operación híbrida terrestre–satelital.

3.1. Caja negra de a bordo

El subsistema de comunicaciones se implementa como una caja negra embarcada, basada en un Nordic Thingy91x de IoT que cumple con la release 17 de la 3GPP, integrada físicamente en el UAV como un subsistema independiente. Esta integra:

- Módulo de comunicaciones 5G NTN NB-IoT.
- GNSS para generación periódica de posición.
- Procesamiento local para la toma y almacenamiento temporal de mensajes.
- Interfaz serie con el sistema de vuelo.

3.2. Modelos de conectividad

Este soporta dos modos principales de operación:

- **Modo híbrido**, con monitorización continua de QoS de enlace y conmutación automática entre NB-IoT terrestre y NTN.
- **Modo exclusivamente satelital**.

La **Figura 3** ilustra este concepto de conectividad.

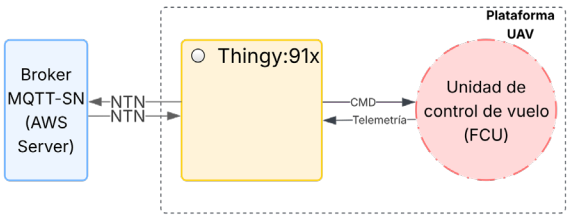


Figura 3. Arquitectura general del sistema de comunicaciones UAV sobre NTN/NB-IoT.

3.3. Mecanismos de gestión de latencia y pérdidas

Dado el carácter intermitente de la visibilidad satelital, el sistema implementa mecanismos de store-and-forward y retransmisión automática. Los mensajes CNPC se almacenan localmente cuando la transmisión inmediata no es posible y se reenvían una vez restablecida la conectividad, preservando la secuencia temporal.

Este enfoque prioriza integridad y continuidad del servicio frente a requisitos estrictos de tiempo real, coherentemente con las necesidades de tráfico CNPC en operaciones BVLOS.

4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Se realizaron ensayos experimentales para evaluar el comportamiento del subsistema de comunicaciones bajo condiciones operativas BVLOS. La arquitectura software implementada en la unidad embarcada se muestra en la **Figura 4**, donde se observa la separación entre lógica de aplicación, gestión de red e interfaz con el sistema de vuelo mediante MAVLink. Esta modularidad garantiza que el procesamiento de comunicaciones no interfiera con funciones críticas de vuelo.

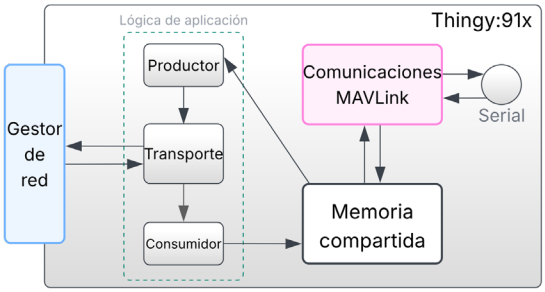


Figura 4. Arquitectura de software y comunicaciones de la caja negra embarcada.

4.1. Configuración experimental

La plataforma de ensayo consistió en un UAV equipado con la caja negra 5G NTN NB-IoT descrita previamente, integrada como subsistema independiente y alimentada mediante batería propia. La interconexión con el controlador de vuelo se realizó a través de interfaz serie, asegurando acoplamiento mínimo con la aviónica.

Las fuentes de datos embarcadas incluyeron posición GNSS, estado del sistema y mensajes de *heartbeat*. Todos los datos fueron marcados temporalmente en origen y transmitidos a intervalos predefinidos para permitir una evaluación consistente del rendimiento del enlace.

Se realizaron 21 vuelos de aproximadamente 11 minutos de duración cada uno, en un entorno rural con cobertura terrestre limitada y condiciones de visibilidad satelital LEO variables, como se ve en la **Figura 5**. Los vuelos se ejecutaron a baja altitud siguiendo trayectorias predefinidas que garantizaron la exposición del sistema a distintas geometrías de visibilidad satelital.

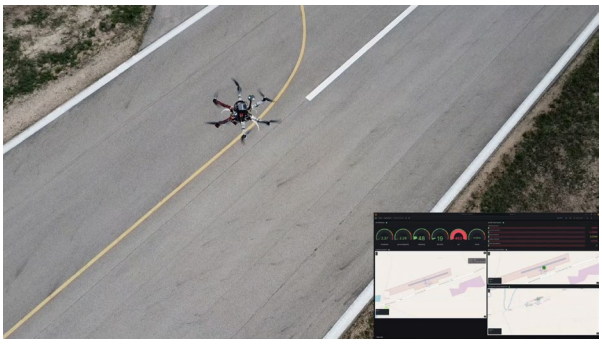


Figura 5. Imagen aérea de las pruebas de vuelo experimental en campo de vuelo

4.2. Validación NTN y configuración de red

El sistema NTN emplea un modelo extremo a extremo basado en store-and-forward, en el que el terminal NB-IoT embarcado transmite telemetría a la constelación LEO durante ventanas de visibilidad, actuando el satélite como nodo intermedio hasta la descarga en estación terrestre.

La integración del dispositivo IoT 5G NB-IoT en la red requiere un proceso de autenticación distribuido en dos pases satelitales: registro inicial del terminal y posterior asignación de dirección IP tras validación en el Core Network en tierra. Este mecanismo garantiza continuidad del protocolo celular en ausencia de infraestructura terrestre.

La validación inicial se realizó en laboratorio mediante una configuración representativa de la red NTN, utilizando un eNB NB-IoT equivalente al satelital y un terminal comercial validado para la red, como se ilustra en la **Figura 6**.

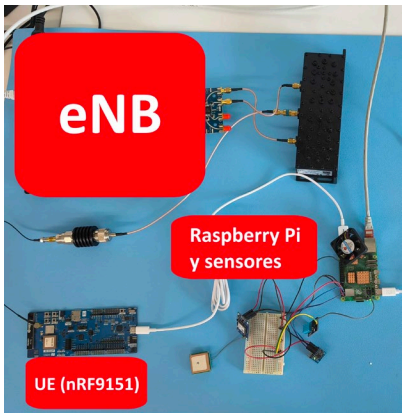


Figura 6. Sistema de validación NTN

4.3. Métricas de rendimiento y parámetros de evaluación

Para caracterizar el sistema se definieron las siguientes métricas:

- Latencia extremo a extremo.
- Tasa de entrega de paquetes.
- Estabilidad del enlace durante vuelo.
- Comportamiento ante pérdidas temporales de conectividad.
- Consumo energético del subsistema.

Estas métricas permiten evaluar el rendimiento, la robustez y la adecuación del sistema para tráfico CNPC en escenarios BVLOS reales.

4.4. Resultados experimentales

La campaña experimental confirmó la viabilidad de NB-IoT sobre 5G NTN como canal CNPC para operaciones BVLOS en condiciones reales de vuelo.

Las latencias extremo a extremo observadas se situaron en el rango de segundos, compatibles con tráfico supervisor. La tasa de entrega de paquetes superó el 95% en condiciones nominales, y se mantuvo por encima del 90% en escenarios degradados. Las interrupciones temporales de conectividad, de duración variable según visibilidad satelital, fueron mitigadas mediante los mecanismos de store-and-forward implementados en el subsistema. Los principales indicadores cuantitativos se resumen en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Indicadores clave de rendimiento del sistema.

Métrica	Resultado	Observaciones	Métrica
Latencia PtP	~1 s (5 SNR) – 15 s (-5 SNR)	Compatible con tráfico CNPC	Latencia PtP
Packets /Rate	>95 % nominal, >90 % degradado	Pérdidas aisladas, sin ráfagas prolongadas	Packets/Rate
Interrupciones de conectividad	Segundos a decenas de segundos	Mitigadas mediante store-and-forward	Interrupciones de conectividad
Tasa de datos	Pocos kbps (telemetría y estado)	Alineada con el diseño de NB-IoT	Tasa de datos

5. DISCUSIÓN

Los resultados experimentales confirman que NB-IoT sobre 5G NTN es técnicamente viable para soportar comunicaciones CNPC en operaciones BVLOS, ofreciendo latencias del orden de segundos, altas tasas de entrega y bajo consumo energético compatibles con los requisitos supervisorios.

La arquitectura basada en una caja negra desacoplada mejora la robustez e integración en plataformas heterogéneas, al tiempo que el uso de tecnologías estandarizadas 3GPP facilita escalabilidad e interoperabilidad frente a soluciones satelitales propietarias. Frente a alternativas como Iridium SBD o soluciones SATCOM propietarias, NB-IoT sobre 5G NTN ofrece mayor alineación con estándares 3GPP, menor coste de integración y mejor perspectiva de escalabilidad en el ecosistema UTM/U-space.

No obstante, la consolidación operativa a gran escala dependerá de la evolución de los servicios NTN, sus garantías de cobertura y su integración con futuros sistemas UTM/U-space.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado y validado experimentalmente una caja negra de comunicaciones embarcada basada en NB-IoT sobre 5G NTN para operaciones UAV BVLOS. El sistema, concebido como un módulo CNPC independiente y desacoplado de la aviónica, fue evaluado mediante vuelos reales en entorno rural con cobertura terrestre limitada.

Los resultados demostraron latencias compatibles con tráfico supervisor, altas tasas de entrega de paquetes y bajo consumo energético, confirmando la viabilidad de NB-IoT sobre 5G NTN como solución resiliente para comunicaciones BVLOS.

Estos hallazgos respaldan el uso de arquitecturas híbridas terrestre–satelital basadas en estándares 3GPP como habilitadores prácticos para operaciones UAV más seguras, escalables y reguladas.

7. REFERENCIAS

3GPP. (2017). Study on Narrow-Band Internet of Things (NB-IoT) / enhanced Machine Type Communication (eMTC) support for Non-Terrestrial Networks (NTN) (TR 36.763). 3rd Generation Partnership Project. https://www.3gpp.org/dynareport/36763.html

3GPP. (2022). Release 17. 3rd Generation Partnership Project. https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-17

Guidotti, A., Vanelli-Coralli, A., Conti, M., Andrenacci, S., Chatzinotas, S., Maturo, N., Tropeano, A., Cioni, S., & Kodheli, O. (2019). Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68*(3), 2624–2639. https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2894172

Kodheli, O., Maturo, N., Chatzinotas, S., Andrenacci, S., & Zimmer, F. (2021). On the random access procedure of NB-IoT non-terrestrial networks. *IEEE Access, 9*, 109130–109143. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3102670

Mishra, D., & Natalizio, E. (2020). A survey on cellular-connected UAVs: Design challenges, enabling 5G/B5G innovations, and experimental advancements. *Computer Networks, 182*, 107451. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107451

Shayea, I., El-Saleh, A. A., Ergen, M., Saoud, B., Hartani, R., Turan, D., & Kabbani, A. (2024). Integration of 5G, 6G and IoT with Low Earth Orbit (LEO) networks: Opportunity, challenges and future trends. *Results in Engineering, 23*, 102409. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102409

ICAO. (2018). Manual on remotely piloted aircraft systems (RPAS) (Doc 10019). International Civil Aviation Organization.

Kellermann, T., Centelles, R. P., Camps-Mur, D., Ferrús, R., Guadalupi, M., & Augé, A. C. (2022). Novel architecture for cellular IoT in future non-terrestrial networks: Store and forward adaptations for enabling discontinuous feeder link operation. *IEEE Access, 10*, 68922–68936. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3184720

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.272

Reconstrucción de la Geometría de Adquisición en Nubes de Puntos de Láser Terrestre Multi-Escaneo mediante Indexación Angular Adaptativa

Baissero García, Adrián Enrico [1] **García, Mariano** [1] **Oliva, Patricia** [1]

[1] Universidad de Alcalá (UAH), Colegios 2, Madrid, España.

ORCID: Baissero García 0009-0004-9431-1869 García 0000-0001-6260-5791 Oliva 0000-0001-5051-3662

Correspondencia: adrian.baissero@uah.es mariano.garcia@uah.es patricia.oliva@uah.es

RESUMEN

El Escaneo Láser Terrestre (TLS) permite estimar la distribución en el dosel de variables estructurales forestales como LAI y LAD. Sin embargo, la fusión de múltiples escaneos puede eliminar la perspectiva original de adquisición, limitando modelos basados en ángulos. Este trabajo propone un enfoque geométrico que reconstruye las posiciones de escaneo mediante el cono ciego del trípode, combinado con indexación angular adaptativa (AIX) y trazado angular con propagación kNN 3D. El método posicionó el escaneo con un RMSE medio de 2 cm y redujo el espacio de búsqueda al 0,055 ± 0,01% de la nube, acelerando las consultas de búsqueda angular hasta 1157 veces.

Palabras clave: *Escaneo Láser Terrestre (TLS); Estructura forestal; Procesamiento de nubes de puntos; Indexado angular.*

Fecha de recepción: 19 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Reconstrucción de la Geometría de Adquisición en Nubes de Puntos de Láser Terrestre Multi-Escaneo mediante Indexación Angular Adaptativa

Baissero García, Adrián Enrico [(1)], García, Mariano [(1)], Oliva, Patricia [(1)]
[(1)] Universidad de Alcalá (UAH), Colegios 2, España.
0009-0004-9431-1869, adrian.baissero@uah.es ; 0000-0001-6260-5791, mariano.garcia@uah.es.
0000-0001-5051-3662, patricia.oliva@uah.es.

Resumen: El Escaneo Láser Terrestre (TLS) permite estimar la distribución en el dosel de variables estructurales forestales como LAI y LAD. Sin embargo, la fusión de múltiples escaneos puede eliminar la perspectiva original de adquisición, limitando modelos basados en ángulos. Este trabajo propone un enfoque geométrico que reconstruye las posiciones de escaneo mediante el cono ciego del trípode, combinado con indexación angular adaptativa (AIX) y trazado angular con propagación kNN 3D. El método posicionó el escaneo con un RMSE medio de 2 cm y redujo el espacio de búsqueda al 0,055 ± 0,01% de la nube, acelerando las consultas de búsqueda angular hasta 1157 veces.

Palabras clave: Escaneo Láser Terrestre (TLS); Estructura forestal; Procesamiento de nubes de puntos; Indexado angular

Reconstructing acquisition geometry in multi-scan terrestrial laser scanning point clouds through Adaptive Angular Indexing

***Abstract**: Terrestrial Laser Scanning (TLS) enables the estimation of canopy structural distribution of forest variables such as LAI and LAD. However, merging multiple scans may remove the original acquisition perspective, limiting angle-based models. This study proposes a geometric framework that reconstructs scan positions using tripod shadow detection, combined with Adaptive Angular Indexing (AIX) and angular tracing with 3D kNN propagation. The method positioned the scan stations with a mean RMSE of 2 cm and reduced the search space to 0.055 ± 0.01% of the point cloud, accelerating angular search queries by up to 1157×.*

***Keywords**: Terrestrial Laser Scanning (TLS); Forest structure; Point cloud processing; Angular indexing*

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques desempeñan un papel esencial en el ciclo global del carbono, y la estimación precisa de su biomasa y estructura es fundamental para cuantificar el balance de carbono (Da Conceiçao Bispo *et al*., 2016). Entre las variables estructurales más relevantes se encuentran el índice de área foliar (LAI) y la distribución vertical de área foliar (LAD), cuya estimación requiere una descripción geométrica detallada del dosel. En este contexto, el Escaneo Láser Terrestre (TLS) ha transformado la ecología forestal al proporcionar reconstrucciones tridimensionales de alta resolución de la arquitectura arbórea, permitiendo derivar métricas de inventariado tradicional (Calders *et al*., 2020; Newnham *et al*., 2015).

Sin embargo, el TLS se enfrenta al problema crítico de la oclusión. Los elementos vegetales más cercanos interceptan el haz láser, reduciendo la visibilidad de capas internas o superiores del dosel (Béland & Kobayashi, 2021; Zhao *et al*., 2015). Para mitigar este efecto, es habitual realizar múltiples escaneos desde distintas posiciones y fusionarlos posteriormente mediante procesos de registro (Calders *et al*., 2020). El proceso de registro puede implicar una pérdida parcial o total de metadatos asociados a cada punto, como el identificador de estación o la posición original del escáner (Eickeler & Borrmann, 2020).

Esta pérdida supone una limitación crítica para los métodos basados en el dominio angular como aquellos fundamentados en la probabilidad de huecos (gap probability) y en la reconstrucción del camino óptico del pulso requieren conocer la geometría relativa entre sensor y objeto (Béland *et al*., 2011; Hosoi & Omasa, 2006). Sin esta relación vectorial, las estimaciones de LAD y otras funciones estructurales dependientes del ángulo pueden presentar sesgos sistemáticos (Eickeler & Borrmann, 2020).

Adicionalmente, las nubes de puntos TLS forestales suelen alcanzar tamaños de cientos de millones de puntos por parcela, lo que plantea un desafío computacional significativo.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un enfoque geométrico que permita recuperar la perspectiva de adquisición a partir de nubes fusionadas sin información de origen.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en dos áreas forestales de la Península Ibérica con condiciones climáticas y estructurales diferentes. Ambas zonas fueron muestreadas tras incendios severos, sin embargo, en el marco de este estudio solo se considerarán las parcelas fuera del perímetro incendiado.

Los mapas (Figs. 1 y 2) muestran la clasificación estructural obtenida mediante K-means a partir de datos LiDAR aerotransportado PNOA, en tres clases — masas dispersas (Hmedia < 4 m), masas abiertas (Hmedia ≈ 5 m) y masas cerradas (Hmedia ≈ 10 m) —; los tonos más oscuros corresponden a clases de mayor desarrollo estructural.

Sierra de la Culebra (Fig. 1) presenta un clima mediterráneo templado (Csb). La cobertura arbórea está dominada por *Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinea* L., con presencia dispersa de *Quercus* (MITECO, 2008).

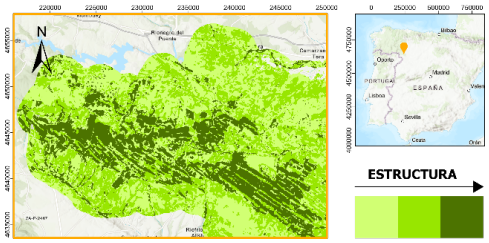


Figura 1. Clasificación estructural de la biomasa en la S. de la Culebra, Zamora, a partir de datos PNOA LiDAR (2015-2021).

Sierra de Gata (Fig. 2) presenta un clima mediterráneo cálido (Csa). La vegetación dominante incluye *Quercus ilex* L., *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. y *Pinus pinaster* Ait., con un sotobosque caracterizado por especies del género *Cistus* y *Erica* (MITECO, 2008).

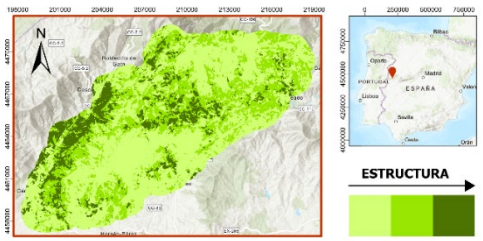


Figura 2. Clasificación estructural de la biomasa en la S. de Gata, Cáceres, a partir de datos PNOA LiDAR (2015-2021).

2.2. Datos

Las parcelas fueron adquiridas mediante TLS Leica RTC360 en modo de alta resolución, empleando cinco posiciones de escaneo por parcela con el fin de reducir efectos de oclusión. Se utilizaron un total de 7 parcelas para la reconstrucción de la geometría de adquisición (5 en Sierra de la Culebra y 2 en Sierra de Gata). Las posiciones fueron registradas en el programa Leica Cyclone.Inferencia geométrica de las posiciones de escaneo TLS

La localización de las posiciones originales del escáner se estimó a partir de los puntos clasificados como suelo en la nube de puntos registrada, explotando dos rasgos geométricos característicos en TLS: (i) un incremento local de la densidad de retornos en el entorno inmediato del instrumento y (ii) el "anillo" circular asociada a la sombra derivada del cono ciego bajo el trípode.

Para reducir el coste computacional, se colapsó la coordenada Z de los puntos, reduciendo una dimensión en los datos. Se calculó una medida local de densidad mediante distancia al k vecino más cercano, d_k. Se seleccionó el subconjunto más denso, conservando los puntos con d_k inferior al cuantil 5%.

La detección del anillo se realiza mediante una implementación de RANSAC, incorporando un término de penalización por ocupación interior. Para cada hipótesis de circunferencia (c_x, c_y, r) se computó un conjunto de *inliers* en el anillo y un recuento de puntos dentro del círculo, generados por otras posiciones de escaneo. Se maximizó la puntuación:

$$S(c_x, c_y, r) = N_{inlier} - \lambda N_{int} \quad (1)$$

Donde N_{inlier} es el número de puntos compatibles con el anillo y N_{int}, siendo λ el peso de penalización. Cada detección inicial se refinó estimando el borde interno del anillo: a partir del centroide estimado, se seleccionó el punto más cercano al centro en ángulos azimutales discretos de 1º, ejecutando un segundo RANSAC para obtener (c_x, c_y, r) refinados. Los puntos involucrados en la detección se retiran para permitir la detección iterativa de múltiples estaciones.

Para estimar la altura efectiva del sensor, se utiliza el semiángulo del cono ciego del instrumento (β), aproximándose a partir del radio del anillo (r):

$$h \sim \frac{r}{\tan(\beta)} \quad (2)$$

Este modelo asume terreno plano; en zonas con pendiente, la proyección del cono sobre el suelo se deforma, y el ajuste circular constituye una aproximación.

2.3. Indexación Angular Adaptativa (AIX)

Para reasignar puntos a estaciones TLS reconstruidas es necesario recuperar, de forma eficiente, la estructura angular implícita del escaneo a partir de nubes XYZ. Con este objetivo se desarrolló AIX (Adaptive Angular Index), un índice híbrido que combina: (i) una partición espacial jerárquica del espacio de puntos (hojas) y (ii) una discretización angular por estación que permite resolver consultas y filtrados angulares sin recorrer la nube completa. El índice se genera como un archivo auxiliar con extensión AIX, generado junto a un archivo original LAS o LAZ.

La nube se divide recursivamente en subconjuntos (hojas) mediante particiones conceptualmente derivadas de estructuras jerárquicas Octree (Meagher, D.,1982) y particiones por eje tipo k-d tree (Bentley, 1975). En cada hoja l se almacena su caja envolvente "axis-aligned

bounding box" (AABB), b_l^{min} y b_l^{max}, calculada a partir de los puntos contenidos en la hoja.

Posteriormente, se genera una proyección angular para cada estación s (posición $c_s = (c_x, c_y, c_z)$), se define el vector relativo a un punto p como $v = p - c_s$. Los ángulos esféricos se obtienen como:

$$\alpha(p,s) = atan2(v_y, v_x) \quad (3)$$

$$\varepsilon(p,s) = atan2(v_z, \sqrt{v_x^2 + v_y^2}) \quad (4)$$

Dónde α es el azimut y ε la elevación. AIX no necesita almacenar (α, ε) por punto: en su lugar, calcula para cada hoja l un rango angular conservador $[\alpha_{l,s}^{min}, \alpha_{l,s}^{max}]$, $[\varepsilon_{l,s}^{min}, \varepsilon_{l,s}^{max}]$ a partir de la AABB de la hoja, garantizando que cualquier punto de la hoja proyecta dentro de dicho rango.

Para cada estación se define una rejilla angular gruesa $(N_\alpha, N_\varepsilon)$ y se asigna cada hoja a la rejilla (i,j), que interseca su rango angular:

$$i = \left[N_\alpha \frac{a \bmod 2\pi}{2\,\pi}\right], j = \left[N_\varepsilon \frac{\epsilon + \pi/2}{\pi}\right] \quad (5)$$

El archivo AIX genera una función inversa por estación:

$$L_s(i,j) \rightarrow \{l\} \quad (6)$$

Dónde $L_s(i,j)$ representa el conjunto de hojas espaciales potencialmente visibles desde la estación s en la rejilla angular (i,j).

Este diseño reduce drásticamente el número de puntos evaluados, generando una consulta angular más eficiente. Dada una ventana angular $W = [\alpha_0, \alpha_1]x[\varepsilon_0, \varepsilon_1]$ para una estación s, AIX obtiene primero las hojas candidatas uniendo las rejillas angulares que cubren W, y luego aplica un filtrado punto a punto sobre esas hojas.

Finalmente, la nube se reorganiza mediante un proceso denominado *repacking*, en el que los puntos se reordenan en disco, agrupados por hoja espacial, reduciendo el coste de acceso secuencial durante las consultas.

2.4. Asignación de puntos a estaciones reconstruidas

La asignación se fundamenta en reconstruir, para cada estación s, una representación lo más fiel posible de la adquisición original del TLS en el dominio angular. En lugar de tratar la nube fusionada como un conjunto discreto de puntos, el método define una rejilla esférica de direcciones (α, ε) que cubre el campo de visión completo del escáner y cuya densidad está determinada por la resolución angular instrumental. Esta rejilla se modela como continua para absorber tanto el ruido geométrico de la nube, evitando que pequeñas desviaciones angulares excluyan retornos que son compatibles con la dirección del pulso.

Por cada dirección en la rejilla, se busca el retorno más cercano a la estación, replicando el "primer retorno". Los retornos observados se identifican con el escáner de origen.

Tras esta fase, pueden persistir puntos sin asignación o zonas de conflicto entre la estación de origen. Sobre estos puntos, se aplica una propagación iterativa basada en kNN tridimensional.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La inferencia geométrica permitió identificar de forma consistente las posiciones de las estaciones. En todos los casos analizados se obtuvo una solución estable con un RMSE promedio de 2 centímetros, con una desviación estándar de 0,5 centímetros. La detección es robusta ante oclusiones parciales del anillo; no obstante, una oclusión severa por vegetación densa en el entorno inmediato del instrumento puede impedir una detección fiable.

La Fig. 3 muestra un ejemplo representativo de parcela, donde pueden observarse los anillos detectados. Los puntos de color azul oscuro representan los puntos conservados tras filtrar mediante la densidad de k vecinos más cercanos.

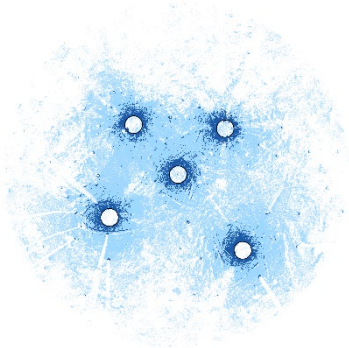


Figura 3. Inferencia geométrica de las posiciones originales de las estaciones.

Para evaluar el rendimiento del archivo AIX se tomaron nubes desde 300 millones de puntos hasta tamaños inferiores a 20 millones de puntos. El índice introduce un coste fijo aproximado de 2 MB, más un término proporcional de 0,01% (±0,004%) del tamaño del archivo LAS/LAZ correspondiente.

El mecanismo de indexado angular limitó de forma consistente el número de candidatos que debían analizarse en cada consulta a 0,055 ± 0,01% del total de puntos en la nube, independientemente del tamaño, lo que supone una reducción de tres órdenes de magnitud.

Generar el archivo AIX supone un tiempo de construcción, que muestra un comportamiento lineal al normalizar según el número de puntos. En el rango analizado, el tiempo medio de construcción fue de 2,916 segundos por cada millón de puntos, con una desviación estándar de 0,344 segundos. En la fase de *repacking*, el tiempo promedio fue de 1,093 segundos, con una desviación estándar de 0,040 segundos.

En cuanto al rendimiento por consulta, excluyendo los costes de construcción y *repacking*, AIX superó de

manera consistente la búsqueda exhaustiva. Para 200.000 consultas por instancia, la aceleración observada osciló entre 833x y 1157x, sin variaciones sistemáticas del tamaño de la nube. La Tabla 1 resume los tiempos medios por consulta con y sin AIX, junto al tiempo total de construcción para distintos tamaños de nube.

Tabla 1. Tiempo promedio por consulta con y sin el índice AIX para distintos tamaños de nube de puntos.

Puntos (Millón)	Tiempo de construcción total AIX (s)	Tiempo por consulta sin AIX (s)	Tiempo por consulta con AIX (s)
300	1182,1	13,7	0,015
150	609,1	8,1	0,007
75	299,8	4,4	0,005
37,5	167,3	2,5	0,003
18,7	67,3	1,3	0,0014

Al considerar los costes de construcción y consulta, el punto de equilibrio (Q*), definido como el número de consultas necesarias para que el tiempo acumulado de AIX iguale al de la búsqueda exhaustiva, mostró una dependencia lineal con el tamaño de la nube. Normalizado por tamaño, el umbral se sitúa entre 3,4 y 4,4 consultas por millón de puntos.

La asignación de puntos se realizó mediante trazado angular continuo replicando la resolución original del escáner (62''). La asignación inicial requirió aproximadamente 182 millones de consultas por posición de escáner y permitió asignar el 91,3% ± 4,1% de los puntos. De los puntos asignados, menos del 7,8% presentaron conflicto, los cuales, junto con los puntos no asignados, fueron completados mediante propagación kNN tridimensional.

Si tratamos de reducir el número de consultas angulares, aumentando la dependencia de la reconstrucción por kNN, la plausibilidad visual se degrada muy rápidamente. La Figura 4 muestra la comparación de un árbol en la parcela, entre a) la reconstrucción con muestreo completo para una sola posición de escaneo (37,8% de los puntos totales del árbol) y b) la reconstrucción con paso angular reducido (calculando 1 de cada 3 pulsos). Los resultados visuales indican que el método parece estable cuando la rejilla angular reproduce la resolución del sensor, pero se degrada rápidamente al depender en mayor medida en la reconstrucción mediante kNN.

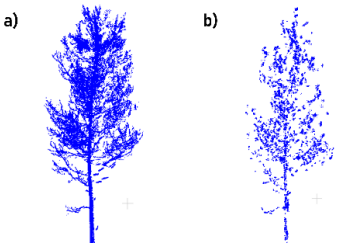


Figura 4. Inspección visual de la reconstrucción con a) paso angular completo y b) paso angular reducido.

4. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la beca FPU de la Universidad de Alcalá (FPU-UAH/23, Adrián Baissero) y el contrato Beatriz Galindo (BG20/00084, Patricia Oliva).

5. REFERENCIAS

Béland, M., Widlowski, J. L., Fournier, R. A., Côté, J. F., & Verstraete, M. M. (2011). *Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements*. *151*(9), 1252–1266. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.05.004

Béland, M., & Kobayashi, H. (2021). *Mapping forest leaf area density from multiview terrestrial lidar. Methods in Ecology and Evolution*. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13550

Bentley, J. L. (1975). *Multidimensional Binary Search Trees Used for Associative Searching*.

Calders, K., Adams, J., Armston, J., Bartholomeus, H., Bauwens, S., Bentley, L. P., Chave, J., Danson, F. M., Demol, M., Disney, M., Gaulton, R., Krishna Moorthy, S. M., Levick, S. R., Saarinen, N., Schaaf, C., Stovall, A., Terryn, L., Wilkes, P., & Verbeeck, H. (2020). *Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon*. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102

Da Conceiçao Bispo, P., Dos Santos, J. R., De Morisson Valeriano, M., De Alencastro Graça, P. M. L., Balzter, H., França, H., & Da Conceiçao Bispo, P. (2016). *Predictive models of primary tropical forest structure from geomorphometric variables based on SRTM in the Tapajo's region, Brazilian Amazon. PLoS ONE*, *11*(4). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152009

Eickeler, F., & Borrmann, A. (2020). *Retracing Positions of Terrestrial Laser Scanners to Reinstate Legacy Point Clouds*. Technical University of Munich.

Hosoi, F., & Omasa, K. (2006). *Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *44*(12), 3610–3618. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.881743

Meagher, D. (1982). *Geometric Modeling Using Octree Encoding*. In *COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING* (Vol. 19).

MITECO (2008). *Cuarto Inventario Forestal Nacional*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Newnham, G. J., Armston, J. D., Calders, K., Disney, M. I., Lovell, J. L., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., & Mark Danson, F. (2015). *Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. Current Forestry Reports*, *1*(4), 239–251. https://doi.org/10.1007/s40725-015-0025-5

Zhao, K., García, M., Liu, S., Guo, Q., Chen, G., Zhang, X., Zhou, Y., & Meng, X. (2015). *Terrestrial lidar remote sensing of forests: Maximum likelihood estimates of canopy profile, leaf area index, and leaf angle distribution.* https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.008

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.283

Cambios en la estructura vegetal y el régimen hídrico de lagunas temporales del Espacio Natural de Doñana

García Díaz, Diego [1] **Marín Salcedo, José** [2] **Rodríguez Ramírez, Antonio** [3] **Bustamante Díaz, Javier** [1]

[1] Estacion Biologica de Doñana, España

[2] Tragsatec

[3] Universidad de Huelva

ORCID: García Díaz 0000-0002-2757-7112 Marín Salcedo 0000-0001-7888-2355 Rodríguez Ramírez 0000-0001-8437-6811 Bustamante Díaz 0000-0001-7515-0677

Correspondencia: diegogarcia@ebd.csic.es josesingla@gmail.com arodri@uhu.es jbustamante@ebd.csic.es

RESUMEN

Las lagunas temporales de Doñana están experimentando una transformación ecológica profunda y acelerada, evidenciada tanto por cambios en la estructura vegetal como por la reducción drástica de sus períodos de inundación. El análisis mediante datos LiDAR (2014, 2020 y 2024) sobre 591 lagunas revela una inversión completa del paisaje lagunar en apenas una década. El suelo desnudo se redujo un 44,6%, mientras que la vegetación herbácea baja aumentó un 918,7% y el matorral consolidado un 36%. En 2014, 121 lagunas presentaban menos del 10% de cobertura vegetal; en 2024, ese grupo se ha reducido a solo 20, mientras que 103 lagunas tienen ya más del 90% de su superficie cubierta por vegetación. El recubrimiento vegetal medio pasó del 35,3% al 64%, indicando que la mayoría de las lagunas han perdido su carácter de lechos inundables. Este proceso es coherente con la reducción del hidroperiodo documentada mediante imágenes Landsat desde 1984. El análisis por décadas muestra anomalías positivas hasta 2004 (+8,3 y +9,7 días), seguidas de un deterioro progresivo que alcanza -15,2 días en el período 2014-2024, equivalente a una reducción del 44% respecto a las condiciones de los años 80-90. Las lagunas principales muestran el deterioro más alarmante: Santa Olalla perdió 98,5 días de hidroperiodo en la última década (-7,9 días/año), y el Acebuche ha quedado prácticamente seco, con una pérdida del 99,8% de su hidroperiodo. En total, el 53,1% de las lagunas presentan tendencias negativas en 2014-2024, y el 28,4% ha perdido más del 40% de su hidroperiodo original. Estos resultados evidencian una crisis hídrica y ecológica sistémica que compromete gravemente la biodiversidad y funcionalidad de uno de los humedales más importantes de Europa.

Palabras clave: *lagunas temporales, hidroperiodo, matorralización, Doñana, LiDAR*

Fecha de recepción: 22 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 22 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Cambios en la estructura vegetal y el régimen hídrico de lagunas temporales del Espacio Natural de Doñana

García Díaz, Diego [(1)], Marín Salcedo, José [(2)], Rodríguez Ramírez, Antonio [(3),] Bustamante Díaz, Javier [(1)]

[(1)] Estación Biológica de Doñana.

0000-0002-2757-7112, diegogarcia@ebd.csic.es ; 0000-0001-7515-0677, jbustamante@ebd.csic.es

[(2)] Tragsatec.

0000-0001-7888-2355, josesingla@gmail.com

[(3)] Universidad de Huelva.

0000-0001-8437-6811, arodri@uhu.es

Resumen: Las lagunas temporales de Doñana están experimentando una transformación ecológica profunda y acelerada, evidenciada tanto por cambios en la estructura vegetal como por la reducción drástica de sus períodos de inundación. El análisis mediante datos LiDAR (2014, 2020 y 2024) sobre 591 lagunas revela una inversión completa del paisaje lagunar en apenas una década. El suelo desnudo se redujo un 44,6%, mientras que la vegetación herbácea baja aumentó un 918,7% y el matorral consolidado un 36%. En 2014, 121 lagunas presentaban menos del 10% de cobertura vegetal; en 2024, ese grupo se ha reducido a solo 20, mientras que 103 lagunas tienen ya más del 90% de su superficie cubierta por vegetación. El recubrimiento vegetal medio pasó del 35,3% al 64%, indicando que la mayoría de las lagunas han perdido su carácter de lechos inundables. Este proceso es coherente con la reducción del hidroperiodo documentada mediante imágenes Landsat desde 1984. El análisis por décadas muestra anomalías positivas hasta 2004 (+8,3 y +9,7 días), seguidas de un deterioro progresivo que alcanza -15,2 días en el período 2014-2024, equivalente a una reducción del 44% respecto a las condiciones de los años 80-90. Las lagunas principales muestran el deterioro más alarmante: Santa Olalla perdió 98,5 días de hidroperiodo en la última década (-7,9 días/año), y el Acebuche ha quedado prácticamente seco, con una pérdida del 99,8% de su hidroperiodo. En total, el 53,1% de las lagunas presentan tendencias negativas en 2014-2024, y el 28,4% ha perdido más del 40% de su hidroperiodo original. Estos resultados evidencian una crisis hídrica y ecológica sistémica que compromete gravemente la biodiversidad y funcionalidad de uno de los humedales más importantes de Europa.

Palabras clave: lagunas temporales, hidroperiodo, matorralización, Doñana, LiDAR

Vegetation structure and hydrological regime changes in temporary ponds of Doñana Natural Area

***Abstract**: The temporary ponds of Doñana are undergoing a profound and accelerating ecological transformation, driven by changes in vegetation structure and a dramatic reduction in their flooding periods. Analysis of LiDAR data (2014, 2020 and 2024) across 591 ponds reveals a complete reversal of the pond landscape within just one decade. Bare soil cover decreased by 44.6%, while low herbaceous vegetation increased by 918.7% and consolidated scrubland by 36%. In 2014, 121 ponds had less than 10% vegetation cover; by 2024, that group had shrunk to just 20, while 103 ponds now have more than 90% of their surface covered by vegetation. Mean vegetation cover rose from 35.3% to 64%, indicating that the majority of ponds have lost their character as floodable basins. This process is consistent with the hydroperiod reduction documented using Landsat imagery since 1984. Decadal analysis shows positive anomalies up to 2004 (+8.3 and +9.7 days), followed by a progressive deterioration reaching -15.2 days in the 2014–2024 period, equivalent to a 44% reduction compared to conditions recorded in the 1980s–90s. Key ponds show the most alarming decline: Santa Olalla lost 98.5 hydroperiod days over the last decade (-7.9 days/year), and Acebuche has become almost entirely dry, with a 99.8% loss of its hydroperiod. Overall, 53.1% of ponds show negative trends in 2014–2024, and 28.4% have lost more than 40% of their original hydroperiod. These results provide evidence of a systemic hydrological and ecological crisis that seriously threatens the biodiversity and functioning of one*

of Europe's most important wetlands.

***Keywords**: temporary ponds, hydroperiod, scrubland encroachment, Doñana, LiDAR*

1. INTRODUCCIÓN

El Espacio Natural de Doñana (END) alberga uno de los sistemas de lagunas temporales más importantes del Mediterráneo occidental. Estos humedales, caracterizados por su régimen hídrico estacional y su conexión con el acuífero subyacente, constituyen hábitats prioritarios para la conservación de la biodiversidad europea (Green *et al*., 2016). El sistema lagunar de Doñana comprende más de 3000 cuerpos de agua temporales que varían enormemente en tamaño, profundidad y duración del hidroperiodo (Serrano *et al*., 2006).

Sin embargo, diversos estudios han alertado sobre el progresivo deterioro de estos ecosistemas. Díaz-Paniagua y Aragonés (2015) documentaron que las lagunas permanentes y temporales de Doñana están amenazadas por la desecación, evidenciando una reducción significativa de sus hidroperiodos. El 24 de junio de 2021, el Tribunal de Justicia Europeo dictó sentencia condenatoria contra España por no haber evitado la alteración de los hábitats protegidos de Doñana, vinculada a las extracciones de agua subterránea.

La teledetección ofrece herramientas objetivas para cuantificar estos cambios a escala espacial y temporal. Los datos LiDAR permiten caracterizar la estructura vertical de la vegetación, mientras que las series temporales de imágenes Landsat posibilitan el cálculo del hidroperiodo desde 1984 (Díaz-Delgado *et al*., 2016).

El objetivo de este trabajo es cuantificar: (1) el proceso de matorralización de las lagunas temporales entre 2014 y 2024 usando datos LiDAR, y (2) la evolución del hidroperiodo desde 1984, estableciendo la relación entre ambos procesos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Se analizaron 591 lagunas temporales del END, delimitadas según la cartografía de Labourdette (Ruiz-Labourdette *et al*., 2005), con una superficie total de 804 ha. El sistema incluye lagunas epigénicas (alimentadas por precipitación directa), mesogénicas (con influencia mixta) e hipogénicas (dependientes del nivel freático), siendo estas últimas las más sensibles a las extracciones del acuífero.

2.2. Análisis de matorralización (LiDAR)

Se utilizaron los Modelos Digitales de Superficies Vegetación (MDSnV, resolución 2,5 m, densidad 0,5 puntos/m²) de la primera y segunda cobertura LiDAR del PNOA (2014 y 2020), y las nubes de puntos de la tercera cobertura PNOA 2024, a partir de las cuales se generó el correspondiente Modelo de Altura de la Cubierta Vegetal (CHM, del inglés Canopy Height Model) a resolución 1 m (densidad ≥5 puntos/m²). Tanto el MDSnV como el CHM representan la altura de los elementos vegetales sobre el terreno, de modo que los valores de cada píxel reflejan directamente la altura de la vegetación. A partir de estos valores se reclasificó la superficie en cuatro categorías: suelo desnudo (≤0,1 m), vegetación baja (0,1–0,3 m), matorral (0,3–2 m) y arbolado (>2 m). Mediante estadísticas zonales sobre los perímetros de las 591 lagunas se calculó el porcentaje de cobertura de cada categoría para cada fecha.

2.3. Análisis de hidroperiodo (Landsat)

Se empleó el producto de hidroperiodo del Protocolo de Normalización v2 del LAST-EBD (García Díaz, D. & Bustamante, J. 2024), generado a partir de máscaras de agua extraídas de cada escena Landsat disponible desde 1984/85 hasta 2024/25. El hidroperiodo se define como el número de días de inundación por píxel a lo largo de cada ciclo hidrológico. Para su cálculo, la interpolación temporal se basa en el punto medio entre escenas consecutivas: a cada píxel se le asignan días de inundación, sequedad o NoData en función de su estado (agua/seco/nodata) en las escenas que delimitan cada intervalo, lo que permite aprovechar el máximo número de imágenes disponibles por ciclo.

Esta metodología está implementada en la librería de Python Phydroperiod (García Díaz, D. & Bustamante, J. 2026; https://pypi.org/project/phydroperiod/). Se calculó el hidroperiodo medio de toda la serie como referencia y se obtuvieron las anomalías anuales con respecto a la media, así como las tendencias temporales y correlaciones con datos de precipitación se estimaron mediante regresión lineal.

Los datos de precipitación utilizados proceden de la estación meteorológica manual del Palacio de Doñana (ICTS-RBD / EBD-CSIC, 2026).

3. RESULTADOS

3.1. Matorralización de lagunas (2014-2024)

El análisis LiDAR revela una transformación profunda del paisaje lagunar en una década (Tabla 1, Figuras 1-2). El suelo desnudo se redujo un 44,6% (de 507 a 284 ha), mientras que la vegetación baja aumentó un 918,7% (de 14,6 a 148,4 ha) y el matorral consolidado un 36% (de 274,5 a 372,9 ha).

La Figura 1 muestra la inversión del paisaje: en 2014, 521,6 ha correspondían a suelo/vegetación baja frente a 274,5 ha de matorral; en 2024 la relación se invirtió (372,9 ha frente a 432,2 ha). La Figura 2 evidencia el desplazamiento dramático de la distribución: en 2014 el pico se situaba en 0-10% de vegetación (121 lagunas), mientras que en 2024 se desplazó a 90-100% (103 lagunas).

Tabla 1. Cambios en la distribución de lagunas según cobertura vegetal en el vaso lagunar.

Parámetro	2014	2024	Cambio
Lagunas 0-10% veg.	121	20	-83%
Lagunas 10-90% veg	458	468	2,2%
Lagunas 90-100% veg.	12	103	758%
Recubrimiento medio	35,3%	64%	81%

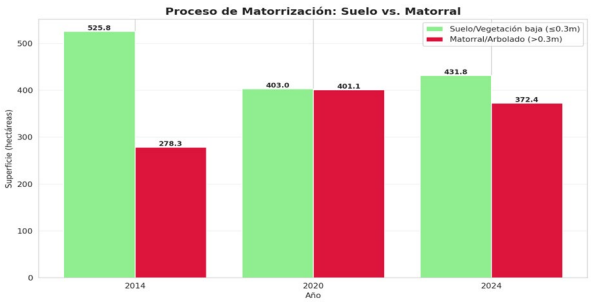


Figura 1. Evolución de la superficie ocupada por suelo/vegetación baja (≤0,3m) frente a matorral/arbolado (>0,3m) en las 591 lagunas (2014-2024).

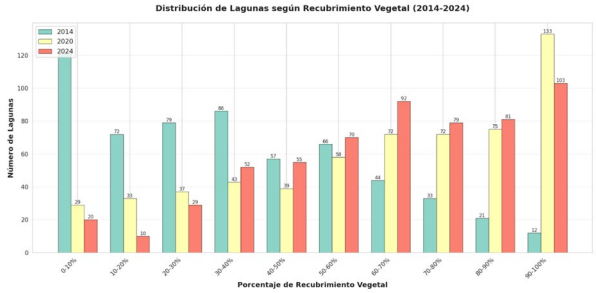


Figura 2. Distribución del número de lagunas según porcentaje de recubrimiento vegetal en 2014, 2020 y 2024.

3.2. Evolución del hidroperiodo (1984-2024)

El análisis por décadas evidencia un cambio de régimen hídrico (Figuras 3 y 4). Las anomalías pasaron de positivas (+8,3 días en 1984-1994; +9,7 días en 1994-2004) a negativas (-2,5 días en 2004-2014; -15,2 días en 2014-2024). Esta última anomalía representa una reducción del 44% del hidroperiodo respecto a las décadas de 1980-90. Para las 87 lagunas principales, la tendencia es de -1,17 días/año, con el 54,1% (320 lagunas) presentando hidroperiodos medios inferiores a 5 días.

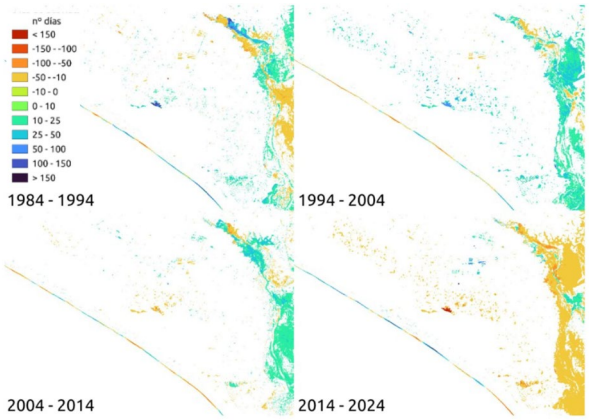


Figura 3. Distribución espacial de la anomalía media del hidroperiodo por década en las lagunas temporales de Doñana (1984-2024).

3.3. Deterioro de lagunas emblemáticas

Las lagunas principales muestran el deterioro más alarmante: **Santa Olalla** perdió 98,5 días en 2014-2024 (-39,5%), pasando de 249 a 150 días de hidroperiodo, con tendencia de -7,9 días/año; **Acebuche** perdió 84,5 días (-99,8%), quedando prácticamente seca desde 2015 con un déficit acumulado de -587 días en 2020-2024 (suma de anomalías anuales respecto al hidroperiodo histórico medio, a razón de ~ -147 días/ciclo); **Laguna Dulce** perdió 40,1 días (-20,9%), con aceleración del deterioro en los últimos 4 años. Para el conjunto de las 87 lagunas principales (hidroperiodo medio ≥20 días), el hidroperiodo medio se ha reducido un 63,7% entre los años 80 (93,9 días) y los 2020 (34,1 días), con una tendencia de -1,17 días/año (p=0,011).

En total, el 53,1% de las 591 lagunas (314) presentan tendencias negativas en 2014-2024, y el 28,4% (168 lagunas) ha perdido más del 40% de su hidroperiodo original.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La correlación temporal entre reducción del hidroperiodo y matorralización es inequívoca: el hidroperiodo medio descendió de 52,2 días (2010-2014) a 34,1 días (2020-2024), coincidiendo con el incremento de cobertura vegetal detectado por LiDAR. Este patrón confirma las alertas previas sobre la desecación progresiva del sistema lagunar (Díaz-Paniagua y Aragonés, 2015).

El análisis de correlación hidroperiodo-precipitación ($r=0,895$, $R^2=0,80$) indica que el 80% de la varianza se explica por factores climáticos. Sin embargo, la tendencia negativa en los residuos (-0,15 días/año, $p=0,013$) evidencia un factor adicional no climático: la ratio hidroperiodo/precipitación descendió un 59% desde los años 1980 (3,53 días/100mm) hasta los 2020 (1,44 días/100mm), indicando que cada milímetro de lluvia produce menos de la mitad del hidroperiodo que producía hace cuatro décadas.

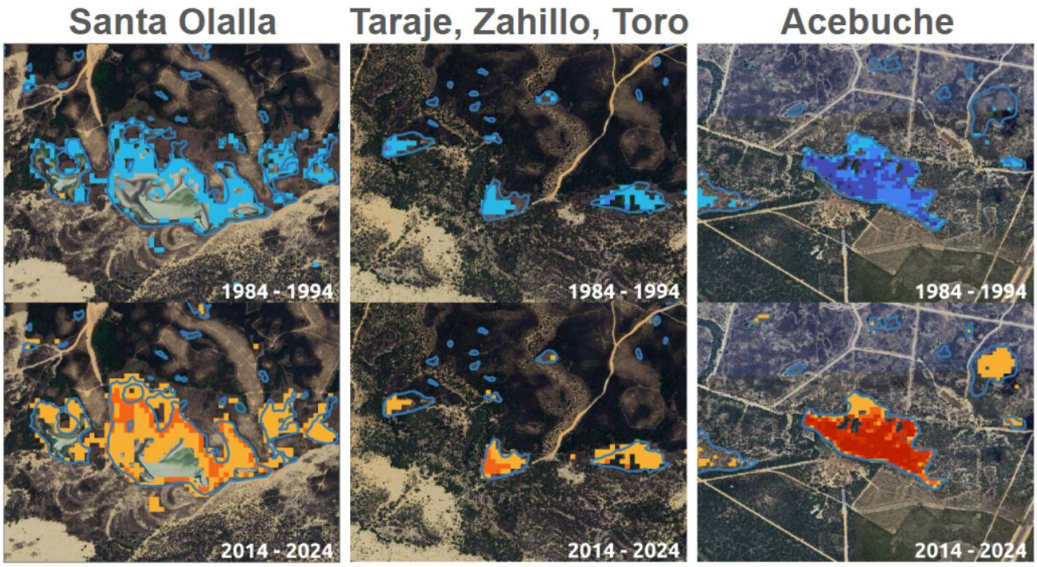


Figura 4. Evolución de la distribución del hidroperiodo por décadas en las 591 lagunas de Doñana (1984-2024).

Estos resultados documentan una crisis hídrica y ecológica sistémica vinculada tanto al cambio climático como a la sobreexplotación del acuífero, consistente con la sentencia del TJUE de 2021. Las lagunas temporales de Doñana están perdiendo su carácter de lechos inundables, comprometiendo la funcionalidad ecológica de uno de los humedales más importantes de Europa (Green *et al*., 2016). Se requieren actuaciones urgentes de gestión hídrica para revertir esta tendencia antes de que las transformaciones sean irreversibles.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el Servicio Técnico para el estudio del comportamiento de las masas de agua subterráneas y sus implicaciones en los Hábitats de Interés Comunitario presentes en el Espacio Natural de Doñana (Exp.: 2023/020).

6. REFERENCIAS

ICTS-RBD / EBD-CSIC (2026). Datos meteorológicos de la Estación Manual del Palacio de Doñana. Meteo Palacio. Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC). Reserva Biológica de Doñana (ICTS-RBD). Fecha de descarga: 2025-09-24. https://meteopalacio.icts-donana.es/

García Díaz, D. & Bustamante, J. (2026). phydroperiod [Software]. Python Package Index. https://pypi.org/project/phydroperiod/

García Díaz, D. & Bustamante, J. (2024). ProtocoloV2: Protocolo de Normalización de imágenes Landsat (V2) del LAST-EBD [Software]. GitHub. https://github.com/Digdgeo/ProtocoloV2

Green, A. J., Bustamante, J., Janss, G. F., Fernández-Zamudio, R., & Díaz-Paniagua, C. (2016). Doñana wetlands (Spain). In *The Wetland Book* (pp. 1-14). Springer.

Díaz-Delgado, R., Aragonés, D., Afán, I. & Bustamante, J. (2016). Long-Term Monitoring of the Flooding Regime and Hydroperiod of Doñana Marshes with Landsat Time Series (1974–2014). *Remote Sensing, 8*(9), 775. https://doi.org/10.3390/rs8090775

Díaz-Paniagua, C., & Aragonés, D. (2015). Permanent and temporary ponds in Doñana National Park (SW Spain) are threatened by desiccation. *Limnetica*, 34(2), 407-424.

Serrano, L., Reina, M., Martín, G., Reyes, I., Arechederra, A., León, D., & Toja, J. (2006). The aquatic systems of Doñana (SW Spain): watersheds and frontiers. *Limnetica*, 25(1-2), 11-32.

Ruiz-Labourdette, D., Coleto, C., Bravo, M.A., Borja, F., Borja, C. & Montes, C. (2005). Mapa del complejo palustre de los arenales de Doñana. Departamento Interuniversitario de Ecología, Universidad Autónoma de Madrid.

SESIÓN 03

Impactos del Clima y la Meteorología

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.104

Implementación de una estación de calibración, de datos de satélite, de gases de efecto invernadero y aerosoles

Calle Montes, Abel [1,2] **González, Ramiro** [1,2] **García, Omaira** [3] **Carracedo, Rogelio** [1] **Mateos, David** [1,2] **Román, Roberto** [1,2] **Toledano, Carlos** [1,2] **Cachorro, Victoria** [1,2] **de Frutos, Angel** [1,2] **Ramos, Ramón** [3] **Torres, Carlos** [3]

[1] Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid (GOA-UVa)

[2] Laboratory of Disruptive Interdisciplinary Science (LADIS)

[3] Observatorio de Izaña, AEMET

ORCID: Calle Montes 0000-0003-4161-7798 González 0000-0003-0017-5591 García 0000-0002-8395-6440 Carracedo 0000-0001-6966-8867 Mateos 0000-0001-5540-4721 Román 0000-0003-4889-1781 Toledano 0000-0002-6890-6648 Cachorro 0000-0002-4627-9444 de Frutos 0000-0001-5748-5078

Correspondencia: abel.calle@uva.es ramiro@goa.uva.es ogarciar@aemet.es rogelio.carracedo@uva.es mateos@goa.uva.es roberto.roman@uva.es toledano@goa.uva.es chiqui@goa.uva.es angel@goa.uva.es rramosl@aemet.es ctorresg@aemet.es

RESUMEN

El Centro de Investigación de la Baja Atmósfera de la Universidad de Valladolid (CIBA-UVa) se ha integrado en las redes internacionales de medida de gases de efecto invernadero ICOS (Integrated Carbon Observation System) y COCCON (COllaborative Carbon Column Observing Network); dotada de instrumentación adicional para medida de aerosoles y nubes, fusiona los dos factores más importantes señalados por el IPCC para el estudio del cambio climático: gases de efecto invernadero y aerosoles. El CIBA-UVa, además, se presenta como un punto de validación de productos de satélite, relacionados con CO2, CH4, CO, aerosoles y nubes.

Palabras clave: *Gases de efecto invernadero, aerosoles, ICOS, COCCON, Validación*

Fecha de recepción: 24 enero 2026 · **Fecha de aceptación:** 24 enero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Implementación de una estación de calibración, de datos de satélite, de gases de efecto invernadero y aerosoles

Calle Montes, Abel [1,2], González, Ramiro [1,2], García, Omaira [3], Carracedo, Rogelio [1], Mateos, David [1,2], Román, Roberto [1,2], Toledano, Carlos [1,2], Cachorro, Victoria [1,2], de Frutos, Angel [1,2], Ramos, Ramón [3], Torres, Carlos [3]

[1] Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid (GOA-UVa)
[2] Laboratory of Disruptive Interdisciplinary Science (LADIS).
0000-0003-4161-7798, abel.calle@uva.es ; 0000-0003-0017-5591, ramiro@goa.uva.es.
0000-0001-6966-8867, rogelio.carracedo@uva.es ; 0000-0001-5540-4721, mateos@goa.uva.es.
0000-0003-4889-1781, roberto.roman@uva.es ; 0000-0002-6890-6648, toledano@goa.uva.es.
0000-0002-4627-9444, chiqui@goa.uva.es ; 0000-0001-5748-5078, angel@goa.uva.es.

[3] Observatorio de Izaña, AEMET
0000-0002-8395-6440, ogarciar@aemet.es ; 0000-0000-0000-0001, rramosl@aemet.es.
0000-0000-0000-0001, ctorresg@aemet.es.

Resumen: El Centro de Investigación de la Baja Atmósfera de la Universidad de Valladolid (CIBA-UVa) se ha integrado en las redes internacionales de medida de gases de efecto invernadero ICOS (*Integrated Carbon Observation System*) y COCCON (*COllaborative Carbon Column Observing Network*); dotada de instrumentación adicional para medida de aerosoles y nubes, fusiona los dos factores más importantes señalados por el IPCC para el estudio del cambio climático: gases de efecto invernadero y aerosoles. El objetivo del CIBA-UVa es presentar un punto de validación de productos de satélite, relacionados con CO2, CH_4, CO, aerosoles y nubes.

Palabras clave: Gases de efecto invernadero, Aerosoles, ICOS, COCCON, Validación

Deployment of a calibration station for satellite-based observations of greenhouse gases and aerosols

***Abstract**: The Lower Atmosphere Research Center of the University of Valladolid (CIBA-UVa) has been integrated into the international greenhouse gases measurement networks ICOS (Integrated Carbon Observation System) and COCCON (COllaborative Carbon Column Observing Network). Equipped with additional instrumentation for aerosol and cloud measurements, it combines the two most important factors identified by the IPCC for climate change studies: greenhouse gases and aerosols. Furthermore, the objective of CIBA-UVa is to propose a validation site for satellite products related to CO_2, CH_4, CO, aerosols, and clouds.*

***Keywords**: Greenhouse gases, Aerosols, ICOS, COCCON, Validation*

1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVO

El pasado mes de noviembre-2025 se desarrolló la cumbre del clima COP-30 (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) en Brasil (WMO 2025, *State of the Climate Update for COP30*) para diseñar estrategias de mitigación del cambio climático; aunque se mantienen los compromisos adquiridos en la COP-21 de Paris (2015) cuyo objetivo central fue limitar el calentamiento global a muy por debajo de 2 °C, con esfuerzos para 1,5°C (UNFCC, 2015), para lo que se requiere lograr un equilibrio entre emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero en la segunda mitad del siglo. La temperatura media global se sitúa aproximadamente 1,42 °C ± 0,12 °C por encima de los niveles preindustriales (1850-1900); en los años recientes la Organización Meteorológica Mundial (WMO) ha pronosticado el valor de 1,5 °C (WMO, 2025). No obstante, el aumento es muy diverso y condicionado a la distribución de tierras y océanos; así, en el hemisferio norte continental (Europa, Norteamérica, Asia) ronda entre 1,3 °C y 2,0 °C y en el hemisferio sur (Argentina, Chile, Sudáfrica, Australia) estaría situado entre 0,8 °C y 1,2 °C; esta diferencia se debe al menor calentamiento de los océanos que dominan el sur (WMO, 2025). En todo caso, la situación crítica se encuentra en las zonas árticas donde el calentamiento es mucho más acelerado (entre el triple y cuádruple) debido a la amplificación ártica por el efecto de realimentación que provoca el derretimiento del hielo -principalmente-, aumentando las superficies que absorben la radiación solar; si bien existen otras causas entrelazadas, como el cambio en los patrones de distribución de nubes y vapor de agua, principal gas de efecto invernadero, así como

el transporte de calor atmosférico y oceánico desde latitudes medias (Previdi *et al.,* 2021).

El clima se estudia como un sistema complejo con propiedades emergentes (Lenton *et al*., 2019; IPCC, 2021) en el que confluyen muchos factores y no pueden ser estudiados como la suma de las partes; tanto es así, que el Premio Nobel de Física 2021 le fue otorgado 50% a Syukuro Manabe y Klaus Hasselmann por el modelado físico del clima terrestre, la cuantificación de su variabilidad y la predicción confiable del calentamiento global, validando la influencia de los gases de efecto invernadero en la temperatura global (*Nobel Prize*, 2021: https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/summary/). Con este reconocimiento quedó probado que el aumento de gases de efecto invernadero (GEI) provoca un aumento global de la temperatura, por lo que su control y conocimiento preciso, a nivel planetario, es esencial para mitigar sus efectos adversos.

El objetivo de este trabajo es presentar una estación de medida de GEI para validar y calibrar productos atmosféricos obtenidos por sensores satelitales.

2. SENSORES SATELITALES PARA MEDIDA DE GEI Y AEROSOLES

La actual estrategia internacional de mitigación de efectos del cambio climático exige un conocimiento preciso de las concentraciones de GEI, hacia el que tiende el desarrollo de sensores satelitales. Y éstos, a su vez, requieren de datos robustos *in situ* para validar sus productos. Hacemos un repaso de las misiones más importantes en esta temática.

IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*), espectrómetro de transformada de Fourier en el infrarrojo térmico que cubre 3 rangos espectrales desde 3.3 a 15.5 μm, con una resolución de 0.5 cm^{-1} y que se encuentra instalado en los satélites MetOp A, B y C operados por EUMETSAT. Presenta una resolución de 12 km (nadir) con un swath de 2200 km y tiene productos de CO_2, CH_4, CO entre otros.

TropoMI (*TROPOspheric Monitoring Instrument*), espectrómetro de imagen que cubre 4 rangos espectrales desde 0.270 a 2.385 μm en los rangos de UV, VIS, NIR y SWIR, con resolución espectral de 0.25 a 0.65 nm y una resolución espacial de 5.5x3.5 km^2, a bordo del satélite Sentinel-5P y cuyos productos son CO y CH_4, entre otros, así como el índice de aerosoles (UVAI) y propiedades de nubes. Tropomi es, actualmente, el instrumento de referencia para la química atmosférica.

OCO-II y -III (*Orbiting Carbon Observatory*) espectrómetro de alta resolución en 3 rangos espectrales centrados en 0.76, 1.61 y 2.06 μm para la medida de la fracción de CO_2 (XCO_2) con una precisión 0.5-1 ppm.

GOSAT (*Greenhouse gases Observing SATellite)*, espectrómetro de transformada de Fourier que cubre 4 rangos espectrales para la medida de fracciones de CO_2 (XCO_2) y CH_4 (XCH_4)

Respecto a los productos de aerosoles que pueden ser validados, son más variados, aunque queremos destacar: i) MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) que mide el espesor óptico de aerosoles a 550 nm, aplicando 2 algoritmos diferentes (DT, Dark Target y DB, Deep Blue) y en 2 niveles de procesado diferentes, Level-2 y Level-3 y ii) VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) que es una continuación y mejora de MODIS en sus 2 algoritmos AERDB y AERDT (análogos a DB y DT, respectivamente) y con los mismos niveles de procesado. Jackson *et al.*, 2013, presenta una comparación de ambos sensores.

3. REDES INTERNACIONALES DE GEI

Los datos de GEI son adquiridos a través de varias redes internacionales destacando tres de ellas por la importancia de los organismos científicos que las gestionan y porque realizan observaciones atmosféricas de los principales GEI, concentraciones puntuales, isótopos y flujos turbulentos: i) Programa de Vigilancia Atmosférica Global (GAW) de la Organización Meteorológica Mundial (WMO), ii) el Sistema de Laboratorios de Investigación de la Tierra (ESRL) de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA), de la NASA y iii) el Sistema Integrado de Observación del Carbono (ICOS) del Consorcio de Infraestructuras de Investigación Europeas (ERIC) financiado por la Unión Europea y países socios.

Queremos resaltar que la red ICOS, por su relevancia en este artículo, tiene por objetivos la observación estandarizada de alta precisión y a largo plazo, facilitar la investigación para comprender el ciclo del carbono y proporcionar información necesaria sobre los GEI para la toma de decisiones. Para ello, dispone de estaciones de 3 tipos: i) Ecosistema (especializadas en determinación de flujos tierra-atmósfera), ii) Oceánicas (balance de carbono atmósfera-océano) y iii) Atmosféricas. Cada uno de los 3 dominios se gestiona con un TC (*Thematic Center*) que se encarga de proporcionar servicios de datos como procesamiento y control de calidad, capacitación y asistencia técnica para la gestión de las instalaciones, desarrollo y prueba de nuevos sensores de medición, configuración y métodos de instrumentos y desarrollo de nuevos métodos de procesamiento de datos. El *Atmosphere Data Center* (ATC) de ICOS está gestionado desde París (https://www.icos-cp.eu/observations/atmosphere/atc) Además, ICOS se estructura con un centro analítico central de calibración (CAL) ubicado en Alemania. Los números de ICOS se resumen en estar integrada por 16 países, 180 estaciones de medición de GEI, 540 investigadores y gestionada por 150 universidades y organismos de investigación de reconocido prestigio.

En España, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) es la representante ministerial ante la red europea ICOS, la cual dispone de 3 estaciones atmosféricas: el observatorio de Izaña, en Tenerife, operada por AEMET, la estación del El Arenosillo, en Huelva, operada por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y el CIBA, del que hablamos en el siguiente epígrafe.

Por otra parte, mencionamos las redes que miden cantidades totales, de GEI, en la columna atmosférica: i) TCCON (*Total Carbon Column Observing Network*), red

basada en espectrómetros de transformada de Fourier, en estaciones terrestres, que analizan las regiones visible e infrarrojo cercano del espectro solar, ii) NDACC: (*Network for the Detection of Atmospheric Composition Change*) y iii) COCCON (*COllaborative Carbon Column Observing Network*), desarrollada y gestionada por el Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT) y soportada por la Agencia Espacial Europea (ESA). El objetivo que persiguen algunas de estas redes es monitorizar los valores de fondo de los GEI recabados en todo el planeta, para su síntesis y homogeneización y puestos a disposición del IPCC); sin embargo, esto no es suficiente para cumplir los requerimientos de la calibración de los sensores satelitales. Dichos requerimientos se encuentran recogidos en el informe de la Comisión Europea para el programa Copernicus (Pinty *et al.,* 2019) dentro del sistema *Monitoring&Verification Support* (MVS) para la monitorización de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO_2), con el acrónimo fusionado de CO2MVS y establecen la necesidad de observaciones en áreas urbanas e industriales y otras fuentes importantes de emisión siendo, además, la variable más importante y prioritaria la columna de CO_2 y otros gases traza que servirán para calibrar las observaciones a nivel europeo; en lo que será el componente espacial de Copernicus (*Copernicus Sentinels CO_2 Monitoring Constellation*).

4. LA ESTACION CIBA-UVA

Actualmente el Centro de Investigación de la Baja Atmósfera de la Universidad de Valladolid (CIBA-UVa) se encuentra gestionado por el Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid (GOA-UVa), referencia internacional en ciencia de aerosoles, al ser uno de los nodos de calibración de instrumentos de la red AERONET de la NASA, participando también en la Central Facility de ACTRIS (Aerosols, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure) como "Central Facility for Aerosols Remote Sensing" y por el bagaje científico de sus campañas continentales, árticas y antárticas. Ahora proponemos esta estación para validar y calibrar productos de GEI medidos por satélite.

El CIBA fue aprobado por la red ICOS en abril de 2024, para iniciar el proceso de *labelling* (etiquetado) conforme a los requerimientos establecidos por el ATC de ICOS. Por otra parte, el CIBA también forma parte de la red COCCON (García *et al.*, 2024) para la medida del valor en columna de los GEI y de la red AERONET (AErosol RObotic NETwork de la NASA) (Holben *et al*., 1998) para el estudio de los aerosoles atmosféricos.

4.1. Ubicación

El CIBA se encuentra situado a una distancia radial de 28 km de la ciudad de Valladolid (centro urbano más próximo). Área rural, continental, con vegetación escasa cuyo paisaje dominante son campos de cereales. Se ubica en las coordenadas (lat,lon) = (41.82 N, 4.93 W) a una altura sobre el nivel del mar de 850 metros. Abarca una extensión de 4 ha y se encuentra perfectamente dotado de infraestructura de comunicación para monitoreo remoto de la instrumentación allí instalada. En resumen: características idóneas para la medida de valores de fondo de GEI, objetivo de la red ICOS.

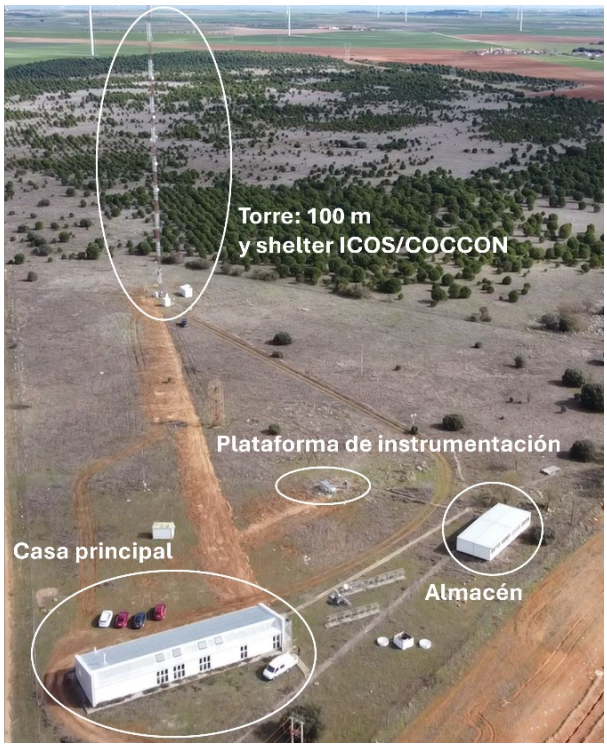


Figura 1. Panorámica de la estación CIBA-UVa integrada en las redes ICOS y COCCON.

Hasta el año 2024 España disponía de 2 estaciones atmosféricas de clase 2: Izaña y El Arenosillo, ambas estaciones ubicadas en un entorno de influencia oceánica. Por ello, disponer de una estación atmosférica en un entorno rural continental aislado de núcleos urbanos aporta un valioso complemento a la red, sobre todo en lo que respecta a la medida de valores de fondo de los GEI. La Figura 1 muestra una panorámica de la estación CIBA-UVa.

4.2. Instrumentación

Parte de la infraestructura instrumental científica del CIBA se compone de una torre de 100 metros que permite la toma de muestras en 3 niveles de altura: 10, 50 y 100 metros de valores de fondo de CO_2, metano, CO y H_2O; para ello utiliza un analizador de gases que cumple los estándares de ICOS modelo Picarro G2401 que utiliza, como sistema de medida, la espectroscopia de cavidad de anillo descendente (O'Keefe & Deacon, 1988). Además, se registran las magnitudes meteorológicas en los 3 niveles: temperatura, humedad relativa, vectores de viento (para lo que cuenta con anemómetros sónicos 2D) y presión atmosférica. Esta aportación es la parte que cumple con los requerimientos de estación atmosférica Clase 2 de ICOS.

Como ya se ha mencionado, el CIBA forma parte de la red COCCON-España, cuyo objetivo principal es la medida de valores en columna de los GEI, lo cual es muy relevante para la calibración de datos de satélite. Para ello, se dispone de una plataforma de instrumentos, situada a 200 m de la torre principal, que incluye: i) ceilómetro, modelo LUFT-CHM15K con un láser de 1064 nm para la medida de altura de aerosoles y nubes, con

un rango de 15 km, ii) espectrómetro FTIR (de Transformada de Fourier) tipo EM-27 con rango espectral en el NIR (*Near Infrared*) para la medición de columna total de CO_2, CH_4, CO, O_2 y H_2O atmosféricos, y especialmente idóneo para calibración/validación de medidas de satélite, iii) cámara de todo cielo Omea 3c, se trata de un sensor hemisférico que toma imágenes RGB cada 5 minutos para el estudio de nubes.

El CIBA está integrado dentro de la red AERONET con un fotómetro triple (Solar, Lunar y de cielo) CIMEL CE318-T, con canales espectrales entre 340 y 1640 nm para el estudio de aerosoles atmosféricos y vapor de agua.

5. CONCLUSIONES

En el año 2001, el IPCC publicó su tercer informe científico incluyendo una clasificación de los componentes atmosféricos, de su importancia en el forzamiento radiativo atmosférico relacionado con el calentamiento climático, en función de su grado de conocimiento científico (*Climate Change 2001: The Scientific Basis*). Este informe mostraba que los mecanismos de calentamiento de los GEI son muy bien conocidos y su papel en el forzamiento radiativo atmosférico es predominante; por otra parte, los aerosoles atmosféricos fueron presentados en el informe como el principal reto científico. La presentación del CIBA-UVa unifica los dos aspectos más relevantes del cambio climático: GEI y aerosoles, por lo que pasa a convertirse en un referente científico en el contexto del cambio climático.

6. AGRADECIMIENTOS

La implementación de la red COCCON-España y la instrumentación ICOS instalada en el CIBA-UVa ha sido financiada por la Unión Europea–Next Generation EU/Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de España (PRTR), a través de las actuaciones P02.C05.I03.P05.S000.42.E001 y P02.C05.I03.P05.S000.43.E001.

7. REFERENCIAS

Francis, J. A. and Vavrus, S. J. 2015. Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. *Environ. Res. Lett. 10* 014005. DOI 10.1088/1748-9326/10/1/014005

García, O.E., Taquet, N., Sepúlveda, E., Ramos, R., Hase, F., … Torres, C. (2024). COCCON-España: Hacia un Sistema Integrado de Gases de Efecto Invernadero en España. *Actas del XX Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, pp. 145-148. 2024, Cádiz

Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., and Smirnov, A.: AERONET – a federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sens. Environ., 66*, 1–16, 1998.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Jackson, J., Liu, H., Laszlo, I., Kondragunta, S., Remer, L. A., Huang, J., & Huang, H.-C. (2013). Suomi-NPP VIIRS Aerosol Algorithms and Data Products. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118*(22), 12673–12689. Doi: 10.1002/2013JD020449

Lenton TM, Rockström J, Gaffney O, Rahmstorf S, Richardson K, Steffen W, Schellnhuber HJ. Climate tipping points - too risky to bet against. *Nature. 2019 Nov;575*(7784):592-595. doi: 10.1038/d41586-019-03595-0.

O'Keefe, A., & Deacon, D. A. G. (1988). Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources. *Review of Scientific Instruments, 59*(12), 2544–2551. https://doi.org/10.1063/1.1139895

Pinty, B., Ciais, P., Dee, D., Dolman, H., Dowell, M., Engelen, R., Holmlund, K. … and Zunker, H. (2019). An Operational Anthropogenic CO2 Emissions Monitoring & Verification Support Capacity – Needs and high level requirements for in situ measurements, *European Commission Joint Research Centre*, EUR. 29817 EN. https://doi.org/10.2760/182790.

Previdi, M, Smith, K. L. and Polvani, L. M. (2021). Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms. *Environ. Res. Lett. 16 093003*. Doi: 10.1088/1748-9326/ac1c29

UNFCC, 2015 https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement

World Meteorological Organization. (2025). State of the Climate Update for COP30. WMO. https://public.wmo.int/publication-series/state-of-climate-update-cop30

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.113

Corrección de sesgos en los vientos de ERA5 mediante aprendizaje automático

Makarova, Evgeniia [1] **Portabella, Marcos** [1] **Stoffelen, Ad** [2]

[1] Barcelona Expert Center, ICM - CSIC, España

[2] KNMI

ORCID: Makarova 0000-0003-1418-8385 Portabella 0000-0002-9972-9090 Stoffelen 0000-0002-4018-4073

Correspondencia: makarova@icm.csic.es portabella@icm.csic.es ad.stoffelen@knmi.nl

RESUMEN

Los vientos oceánicos superficiales precisos son fundamentales para la modelización oceánica; sin embargo, reanálisis ampliamente utilizadas, como el Reanálisis v5 del ECMWF (ERA5), presentan sesgos locales y persistentes. Este estudio evalúa métodos de aprendizaje automático (ML) para corregir dichos sesgos mediante redes neuronales totalmente conectadas (FCNNs), entrenadas con cinco años de variables atmosféricas y oceánicas de ERA5, junto con datos de corrientes superficiales del Servicio de Vigilancia Marina Copernicus (CMEMS). Los resultados muestran que las correcciones basadas en ML reducen significativamente los sesgos de viento en ERA5: a escala global, la reducción de varianza del error alcanza aproximadamente el 13% frente a ASCAT y el 9% frente a HSCAT, con las mayores mejoras (hasta un 16%) observadas en las regiones extratropicales. Los modelos mensuales superan a los modelos anuales, especialmente en los trópicos, donde la variabilidad estacional influye de manera notable en los patrones de sesgo. Aunque persisten algunas discrepancias al validarse con dispersómetros en banda Ku, los campos corregidos reducen sustancialmente las estructuras de sesgo a gran escala.

Palabras clave: *redes neuronales, dispersómetros, vientos equivalentes a estrés, sesgos de NWP*

Fecha de recepción: 3 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Corrección de sesgos en los vientos de ERA5 mediante aprendizaje automático

Makarova, Evgeniia [1], Portabella, Marcos [1], Stoffelen, Ad [2]

[1] Barcelona Expert Center, ICM - CSIC, España.

0000-0003-1418-8385, makarova@icm.csic.es ; 0000-0002-9972-9090, portabella@icm.csic.es.

[3] KNMI

0000-0002-4018-4073, ad.stoffelen@knmi.nl.

Resumen: Los vientos oceánicos superficiales precisos son fundamentales para la modelización oceánica; sin embargo, reanálisis ampliamente utilizadas, como el Reanálisis v5 (ERA5) del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), presentan sesgos locales y persistentes. Este estudio evalúa métodos de aprendizaje automático (ML) para corregir dichos sesgos mediante redes neuronales totalmente conectadas (FCNNs), entrenadas con cinco años de variables atmosféricas y oceánicas de ERA5, junto con datos de corrientes superficiales del Servicio de Vigilancia Marina Copernicus (CMEMS).

Los resultados muestran que las correcciones basadas en ML reducen significativamente los sesgos de viento en ERA5: a escala global, la reducción de varianza del error alcanza aproximadamente el 13% frente a ASCAT y el 9% frente a HSCAT, con las mayores mejoras (hasta un 16%) observadas en las regiones extra-tropicales. Los modelos mensuales superan a los modelos anuales, especialmente en los trópicos, donde la variabilidad estacional influye de manera notable en los patrones de sesgo. Aunque persisten algunas discrepancias al validarse con dispersómetros en banda Ku, los campos corregidos reducen sustancialmente las estructuras de sesgo a gran escala.

Palabras clave: redes neuronales, dispersómetros, vientos equivalentes a estrés, sesgos de NWP

Bias correction of ERA5 winds with Machine Learning

***Abstract**: Accurate ocean surface winds are essential for ocean modeling, yet widely used reanalyses such as ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) exhibit local and persistent biases. This study assesses machine-learning (ML) methods to correct these biases using fully connected neural networks (FCNNs) trained on five years of ERA5 atmospheric and oceanic variables, combined with surface current data from Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS).*

Results demonstrate that ML-based corrections significantly reduce ERA5 wind biases: on a global scale, error variance reductions reached approximately 13% against ASCAT and 9% against HSCAT, with the highest improvements (up to 16%) observed in extra-tropical regions. Monthly models outperformed all-year models, particularly in the tropics, where seasonal variability strongly influences bias patterns. Although residual discrepancies remain when validated against Ku-band scatterometers, the corrected outputs substantially mitigate large-scale bias structures.

***Keywords**: neural networks, scatterometers, stress-equivalent winds, NWP biases*

1. INTRODUCCIÓN

La predicción precisa de los campos de viento oceánico en superficie es un elemento esencial para la modelización de la circulación oceánica, de oleaje y para las numerosas aplicaciones climáticas. Sin embargo, los sistemas de predicción numérica del tiempo (NWP), como el Integrated Forecasting System (IFS) del ECMWF, presentan sesgos recurrentes y espacialmente estructurados cuando se comparan con medidas de dispersómetros satelitales.

Estos sesgos afectan tanto a la dirección como a la intensidad del viento y están asociados a procesos de interacción océano-atmósfera que no están completamente representados en el modelo, como los efectos de los gradientes de temperatura superficial del mar (SST) y de las corrientes oceánicas, así como la representación de la convección húmeda (Sandu *et al*., 2020).

Estudios previos han documentado rotaciones sistemáticas de los vientos superficiales y patrones

persistentes de los sesgos en el reanálisis ERA5, entre ellos un exceso de vientos del oeste en latitudes medias y una convergencia insuficiente hacia la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Belmonte Rivas & Stoffelen, 2019). Además, estos errores reaparecen rápidamente después de la asimilación de vientos de dispersómetro, lo que indica que las causas dinámicas subyacentes permanecen sin corregir.

Diversos productos corregidos, como ERA* o los campos WIND TAC del CMEMS, reducen los sesgos persistentes aplicando correcciones derivadas de diferencias entre modelos y dispersómetros (Trindade *et al*., 2020; CMEMS, 2023). Sin embargo, su rendimiento depende fuertemente de la disponibilidad espacial y temporal de observaciones de dispersómetro, lo que limita su aplicabilidad en predicciones operacionales, especialmente en regiones o periodos con poca cobertura satelital.

Para superar estas limitaciones, trabajos recientes han analizado enfoques de aprendizaje automático capaces de aprender relaciones sistemáticas entre variables atmosféricas y oceánicas y los errores de viento en ERA5 (Makarova *et al*., 2025). Siguiendo esta línea, el presente estudio investiga el uso de redes neuronales totalmente conectadas (FCNNs) entrenadas con cinco años de datos para generar correcciones de los sesgos que pueden aplicarse incluso cuando no se dispone de observaciones de dispersómetros.

2. MATERIAL Y METODOS

2.1. Conjuntos de datos

Los modelos de aprendizaje automático se entrenaron utilizando cinco años de datos atmosféricos y oceánicos (2019–2022, 2024), reservando el año 2018 para la validación y 2023 para las pruebas independientes. Los objetivos de entrenamiento consisten en las diferencias entre los vientos del dispersómetro Advanced scatterometer (ASCAT) en banda C y los vientos equivalentes a estrés a 10 metros de ERA5 (U10S). Los vientos ASCAT de la serie MetOp proporcionan vectores de viento superficiales de alta calidad en todas las condiciones meteorológicas. En este trabajo se usan los productos de nivel 2 (L2) en malla regular con una resolución espacial de 12,5 km.

Las variables de entrada se extrajeron de la reanálisis ERA5 (Hersbach *et al*., 2020), incluyendo los componentes de U10S, la presión a nivel del mar, la temperatura de la superficie, la humedad específica, la temperatura superficial del mar (SST) y campos derivados como vorticidad, divergencia y los gradientes de SST. Para tener en cuenta los efectos de las corrientes en la superficie oceánica, se añadieron corrientes superficiales medias diarias procedentes del conjunto de datos CMEMS Global Total, Ekman and Geostrophic currents at the Surface and 15 m (GLOBCURRENT) (CMEMS, 2023). Todos los conjuntos de datos se colocalizaron espacial y temporalmente y se normalizaron para garantizar la coherencia entre las entradas atmosféricas, oceánicas y del dispersómetro.

Para la validación independiente, los vientos corregidos también se compararon con vientos de los dispersómetros HSCAT en banda Ku (productos L2 de 25 km) procedentes de los satélites Haiyang HY-2B y HY-2C, que proporcionan mediciones de viento en superficie con horarios locales de paso diferentes a los de las misiones ASCAT.

2.2. Metodología

Primero los conjuntos de datos de ERA5 y GLOBCURRENT se colocalizaron en el espacio y en el tiempo para ajustarlos a la malla L2 de ASCAT. Las derivadas, como la vorticidad, la divergencia y los gradientes de la SST se calcularon para coincidir con la misma malla de L2. Todas las variables de entrada se normalizaron y se hizo un submuestreo de los datos al 15 % con el fin de reducir el tiempo de entrenamiento.

La arquitectura de aprendizaje automático seleccionada para este estudio es una red neuronal *feed-forward* totalmente conectada, que en los trabajos previos ha mostrado resultados robustos (Makarova *et al*., 2025). Tras evaluar varias configuraciones, la arquitectura elegida consiste en una red de cinco capas ocultas con el número de neuronas decrecientes progresivamente (1024–512–256–128–64), que ofrece un equilibrio óptimo entre precisión y capacidad de generalización sin un crecimiento excesivo del número de parámetros. Todas las redes se entrenaron utilizando el optimizador Adam y una función de pérdida basada en el error cuadrático medio (RMSE).

Se evaluaron dos estrategias de modelado. El modelo anual se entrenó con el conjunto completo de datos de cinco años, incorporando una codificación cíclica del día del año para representar la variabilidad estacional. Adicionalmente, los modelos mensuales se entrenaron con datos de una ventana temporal de cada mes especifico (±15 días alrededor de cada mes) para capturar mejor las estructuras de sesgo dependientes de la estación, especialmente en los trópicos, donde los errores del viento presentan una fuerte variabilidad estacional.

El rendimiento de los modelos se evaluó colocalizando los vientos corregidos con observaciones de ASCAT y HSCAT y calculando la diferencia vectorial cuadrática media (VRMS) (Ecuación 1), así como la reducción de la varianza del error asociada en relación con ERA5 (Ecuación 2).

$$VRMS = \frac{1}{N}\sum(u_{scat} - u_{model})^2 + (v_{scat} - v_{model}^2) \quad (1)$$

$$Err.var.red. = \frac{VRMS_{ERA5}^2 - VRMS_{NN}^2}{VRMS_{ERA5}^2} \quad (2)$$

Tabla 1. VRMS (m/s) medio anual de ERA5 frente a los dispersómetros ASCAT-B y -C y HSCAT-B y -C.

ERA5 VRMS	Global	Trópicos	Extra-Trópicos	Latitudes Altas
ASCAT-B	2.036	1.999	2.026	2.143
ASCAT-C	2.030	1.996	2.020	2.130
HSCAT-B	1.602	1.550	1.593	1.756
HSCAT-C	1.682	1.615	1.687	1.804

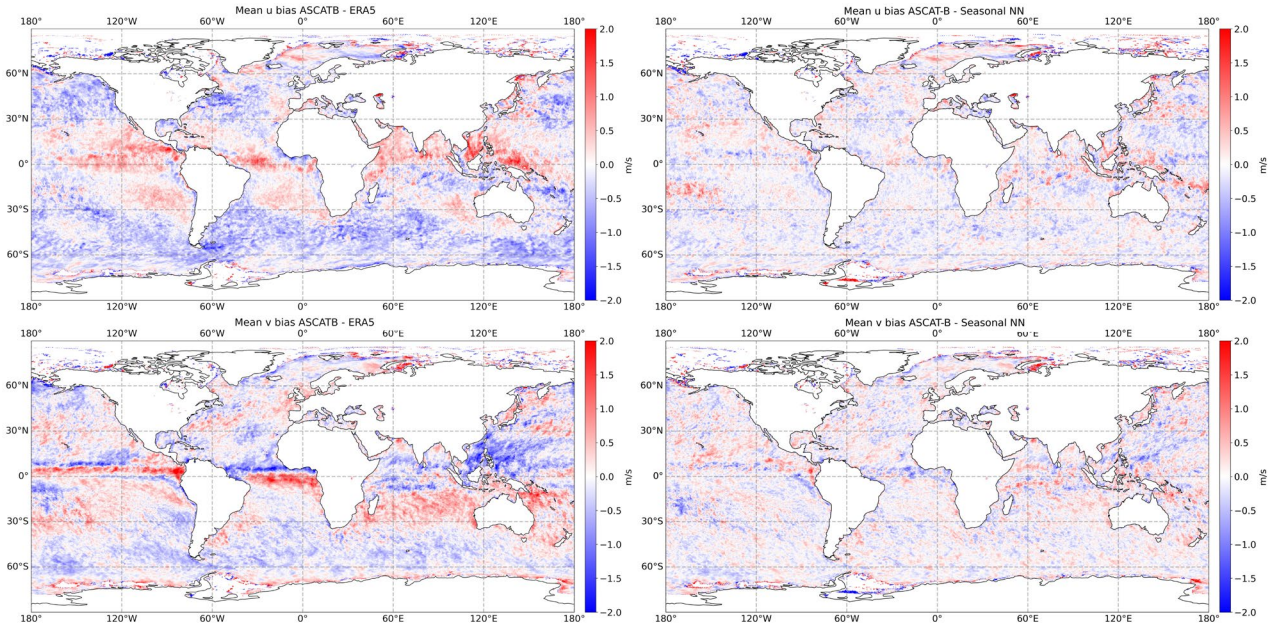


Figura 1. Sesgo medio (m/s) de ERA5 (izquierda) y de la salida corregida con red neuronal (derecha) frente a ASCAT-B para enero de 2023, tanto para la componente zonal (arriba) como para la componente meridional (abajo) de U10S.

3. RESULTADOS Y DISCUSSION

La evaluación de ERA5 frente a distintos dispersómetros revela que la magnitud y la estructura de los sesgos locales del viento dependen del instrumento utilizado para la validación. La Tabla 1 muestra que ERA5 presenta diferencias en VRMS globales más elevadas cuando se compara con los dispersómetros en banda C ASCAT-B y ASCAT-C (≈2.0 m s^{-1}), mientras que los dispersómetros en banda Ku HSCAT-B y HSCAT-C presentan valores de VRMS más bajos (≈1.6–1.7 m s^{-1}). Esta diferencia refleja la distinta resolución espacial, los procedimientos de control de calidad y las características de muestreo de ambos tipos de instrumentos, así como las diferentes condiciones meteorológicas retenidas tras aplicar el control de calidad, dado que los dispersómetros en banda Ku se ven sustancialmente más afectados por la contaminación debida a la precipitación que los dispersómetros en banda C.

En la Figura 1 (panel izquierdo), el sesgo medio de ERA5 frente a ASCAT-B muestra estructuras bien definidas a gran escala, incluyendo asimetrías zonales pronunciadas y un patrón de sesgo meridional asociado a la ZCIT. Los paneles derechos muestran los sesgos resultantes despues de aplicar las correcciones del modelo mensual, donde las estructuras de sesgo recurrentes desaparecen en gran medida, dejando un sesgo residual de carácter más granular.

La Tabla 2 resume el rendimiento de los modelos anuales y mensuales. Los modelos mensuales superan de forma sistemática al modelo anual, alcanzando reducciones globales de la varianza del error de aproximadamente el 13 % frente a ASCAT y el 9 % frente a HSCAT, en comparación con ~12 % y ~8 %, respectivamente, para el modelo anual. Las mayores mejoras se observan en las regiones extra-tropicales (latitudes entre 30° y 55° N/S), donde las reducciones alcanzan aproximadamente el 16 % frente a ASCAT y entre el 11 % y el 12 % frente a HSCAT, lo que refleja estructuras de sesgo más predecibles en estas regiones. En los trópicos (latitudes <30°), los modelos mensuales muestran una reducción de la varianza del error de alrededor del 10 % validando con ASCAT, aunque las mejoras son más modestas al evaluarse frente a HSCAT-B. En altas latitudes (>55° N/S), el rendimiento es similar para ambos tipos de dispersómetro, con reducciones de la varianza del error en torno al 10–11 %.

La Figura 2 muestra la distribución espacial de la reducción/incremento del VRMS de la red neuronal mensual en comparación con ERA5, cuando se validan

Tabla 2. Reducción de la varianza del error (%) para los modelos anuales y mensuales durante el período de prueba de 2023.

	Global		Trópicos		Extra-Trópicos		Latitudes Altas	
Red. var. error	Anual	Mensual	Anual	Mensual	Anual	Mensual	Anual	Mensual
ASCATB	12.19	12.97	10.24	11.49	15.44	15.83	10.39	10.88
ASCATC	12.44	13.22	10.48	11.82	15.77	16.07	10.51	10.95
HSCATB	7.88	8.60	3.81	4.90	11.71	12.03	9.35	10.00
HSCATC	8.77	9.05	5.10	6.09	11.29	11.22	10.60	10.29

frente a ASCAT-B y HSCAT-B. Las áreas amarillas indican un impacto neutro, mientras que las regiones verdes (rojas) señalan zonas donde el rendimiento mejora (empeora) con respecto a ERA5. La validación frente a dispersómetros en banda C revela mejoras notables en torno a la ZCIT. En las regiones extra-tropicales, las mejoras más significativas se observan en las partes occidentales de las cuencas oceánicas del hemisferio norte, correspondientes a regiones con fuertes corrientes superficiales zonales. En el hemisferio sur, la mejora es espacialmente más homogénea. La validación frente a HSCAT-B, sin embargo, muestra mejoras más modestas y cierta degradación en los trópicos, principalmente en la región de la ZCIT.

Estas diferencias se deben principalmente a los distintos tiempos locales de muestreo de los instrumentos: ASCAT observa en torno a las 09:30 hora solar local, mientras que HSCAT-B muestrea alrededor de las 06:00. Dado que ERA5 presenta errores asociados al ciclo diurno, la red neuronal entrenada exclusivamente en los horarios de ASCAT captura y corrige mejor las estructuras de sesgo presentes en estas horas. Otras diferencias se derivan de la menor resolución espacial y la mayor sensibilidad a la precipitación de los sistemas en banda Ku, que modifican el muestreo meteorológico efectivo tras la aplicación del control de calidad.

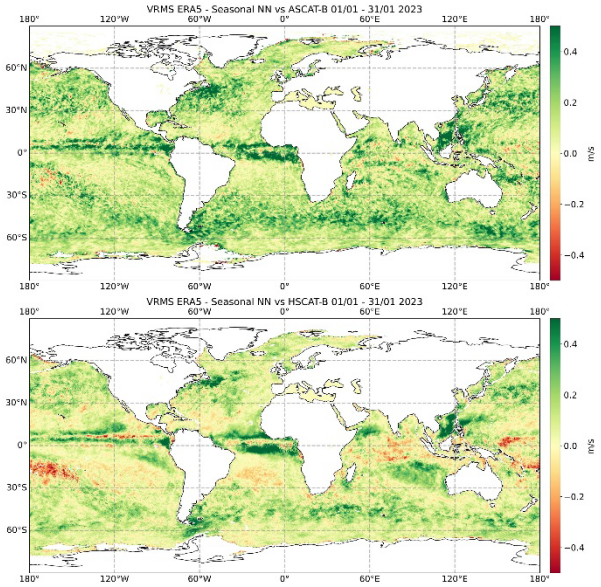


Figura 2. Reducción media (verde) o incremento (rojo) del VRMS de la salida de la red neuronal mensual (en comparación con ERA5), verificada frente a ASCAT-B (arriba) y HSCAT-B (abajo).

4. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que los modelos de aprendizaje automático pueden reducir eficazmente los sesgos persistentes de los vientos equivalentes al esfuerzo en ERA5 sin requerir observaciones de dispersómetros durante la inferencia. Al entrenar las FCNN con cinco años de datos atmosféricos y oceánicos, los modelos capturaron relaciones sistemáticas entre las variables de NWP y los patrones de sesgo del viento con mejoras significativas respecto al caso de referencia ERA5.

Los modelos mensuales proporcionan las mejoras consistentes, reflejando la variabilidad estacional de los patrones de lo sesgo. Las diferencias en la validación frente a ASCAT-B y HSCAT-B indican la influencia de las características de muestreo de cada instrumento, incluyendo sus distintos tiempos locales de observación y geometrías de visión, que explican parcialmente las mejoras más modestas obtenidas con los sistemas en banda Ku.

En trabajos futuros se explorarán arquitecturas más avanzadas, como las redes neuronales de grafos (GNN) (Lam *et al*., 2023), funciones de pérdida mejoradas y la adaptación de los modelos de red neuronal a los datos del modelo operacional del ECMWF para la corrección de sesgos en los pronósticos futuros.

5. AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) Ocean Sea and Ice (OSI) Satellite Application Facility (SAF) Visiting Scientist Activity (OSI_VSA24_01).

6. REFERENCIAS

Belmonte Rivas, M., & Stoffelen, A. (2019). Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT. Ocean *Science, 15*(3), 831–852. https://doi.org/10.5194/os-15-831-2019

CMEMS. (2023). Global Ocean Hourly Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model. https://doi.org/10.48670/moi-00305

CMEMS. (2023). Global Total (COPERNICUS-GLOBCURRENT), Ekman and Geostrophic currents at the Surface and 15m., https://doi.org/10.48670/mds-00327.

Hersbach, H., *et al*. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146*, 1999–2049, https://doi.org/10.1002/qj.3803

Lam, L., et al. (2023), Learning skillful medium-range global weather forecasting. *Science, vol. 382*, no. 6677, pp. 1416–1421, https://doi.org/10.1126/science.adi2336.

Makarova, E., Portabella, M., & Stoffelen, A. (2025). Reduction of persistent stress-equivalent wind biases with machine learning and scatterometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 63*, 1–11. https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3586375

Sandu, I., *et. al*. (2020). On the causes of systematic forecast biases in near-surface wind direction over the oceans. ECMWF Technical Memorandum, 866.

Trindade, A., Portabella, M., Stoffelen, A., Lin, W., & Verhoef, A. (2020). ERAstar: A High-Resolution Ocean Forcing Product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 58*(2), 1337–1347. https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2946019

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.140

Eficiencia del uso del agua de los ecosistemas a nivel global a partir de datos de satélite

Vallés Iborra, M. [1] **Campos Taberner, M.** [1] **Gilabert, M.A** [1]

[1] UV-ERS, Facultat de Física, Universitat de València

ORCID: Campos Taberner 0000-0001-5929-3942 Gilabert 0000-0002-3548-1524

Correspondencia: vaima@alumni.uv.es manuel.campos@uv.es m.amparo.gilabert@uv.es

RESUMEN

La eficiencia del uso del agua de los ecosistemas (WUE), definida como el cociente entre la productividad primaria bruta (GPP) y la evapotranspiración (ET), constituye un indicador clave del acoplamiento entre los ciclos del carbono y del agua a escala global. En este trabajo se analiza la distribución espacial y la variabilidad temporal de la WUE durante el periodo 2000–2020 a partir del producto Penman–Monteith–Leuning versión 2 (PML_V2). Se calculó la WUE a nivel de píxel para todo el periodo de estudio y se generó una climatología media global, que reveló una WUE media de 2,01 g kg^{-1}. donde los valores máximos se concentran en bosques templados y zonas agrícolas del hemisferio norte, mientras que los mínimos corresponden a desiertos y tundra. Adicionalmente, se analizó la evolución temporal de la WUE en tres regiones representativas: Almería (España), el norte de la Amazonia (Venezuela) y la Meseta de Loess (China). Los resultados muestran tendencias diferentes, con un descenso significativo de la WUE en la región mediterránea semiárida, una respuesta interanual marcada por eventos extremos en Amazonia, y un incremento sostenido en la Meseta de Loess asociado a restauración ecológica. Estos resultados ponen de manifiesto la utilidad de la WUE para monitorizar la respuesta de los ecosistemas frente a la variabilidad climática y a gestiones de usos del suelo.

Palabras clave: *Eficiencia del uso del agua (WUE), evapotranspiración (ET), productividad primaria bruta (GPP)*

Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Eficiencia del uso del agua de los ecosistemas a nivel global a partir de datos de satélite

Vallés Iborra, Maria [(1)], Campos-Taberner, Manuel [(1)], Gilabert, María Amparo [(1)]

[(1)] UV-ERS, Facultat de Física, Universitat de València, España,

vaima@alumni.uv.es

0000-0001-5929-3942, manuel.campos@uv.es.

0000-0002-3548-1524, m.amparo.gilabert@uv.es.

Resumen: La eficiencia del uso del agua de los ecosistemas (WUE), definida como el cociente entre la productividad primaria bruta (GPP) y la evapotranspiración (ET), constituye un indicador clave del acoplamiento entre los ciclos del carbono y del agua a escala global. En este trabajo se analiza la distribución espacial y la variabilidad temporal de la WUE durante el periodo 2000–2020 a partir del producto Penman–Monteith–Leuning versión 2 (PML_V2). Se calculó la WUE a nivel de píxel para todo el periodo de estudio y se generó una climatología media global, que reveló una WUE media de 2,01 g kg^{-1}. donde los valores máximos se concentran en bosques templados y zonas agrícolas del hemisferio norte, mientras que los mínimos corresponden a desiertos y tundra. Adicionalmente, se analizó la evolución temporal de la WUE en tres regiones representativas: Almería (España), el norte de la Amazonia (Venezuela) y la Meseta de Loess (China). Los resultados muestran tendencias diferentes, con un descenso significativo de la WUE en la región mediterránea semiárida, una respuesta interanual marcada por eventos extremos en Amazonia, y un incremento sostenido en la Meseta de Loess asociado a restauración ecológica. Estos resultados ponen de manifiesto la utilidad de la WUE para monitorizar la respuesta de los ecosistemas frente a la variabilidad climática y a gestiones de usos del suelo.

Palabras clave: Evapotranspiración (ET), productividad primaria bruta (GPP), Penman–Monteith–Leuning versión 2 (PML_V2), Google Earth Engine (GEE)

English Title

***Abstract**: Ecosystem Water Use Efficiency (WUE), defined as the ratio between Gross Primary Production (GPP) and Evapotranspiration (ET), constitutes a key indicator of the coupling between carbon and water cycles at a global scale. This work analyzes the spatial distribution and temporal variability of WUE during the period 2000–2020 based on the Penman–Monteith–Leuning version 2 (PML_V2) product. WUE was calculated at the pixel level for the entire study period, and a global mean climatology was generated, revealing a mean WUE of 2.01 g kg^{-1}, where maximum values are concentrated in temperate forests and agricultural zones of the Northern Hemisphere, while minimums correspond to deserts and tundra. Additionally, the temporal evolution of WUE was analyzed in three representative regions: Almería (Spain), Northern Amazonia (Venezuela), and the Loess Plateau (China). Results show contrasting trends, with a significant decrease in WUE in the semi-arid Mediterranean region, an interannual response marked by extreme events in Amazonia, and a sustained increase in the Loess Plateau associated with land use changes. These results highlight the utility of WUE for monitoring ecosystem response to climate variability and land use management.*

***Keywords**: Evapotranspiration (ET), Gross Primary Production (GPP), Penman–Monteith–Leuning version 2 (PML_V2), Google Earth Engine (GEE)*

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres juegan un papel fundamental en la regulación de los ciclos globales del carbono y del agua. Caracterizar y comprender el acoplamiento entre estos ciclos es clave para una mejor adaptación en el actual contexto de cambio climático (Wang *et al*., 2026). La eficiencia del uso del agua de los ecosistemas (WUE, por sus siglas en inglés), definida comúnmente en ecología como el cociente entre la productividad primaria bruta (GPP, por sus siglas en inglés) y la evapotranspiración (ET), es un indicador útil para

describir este acoplamiento biológico y físico (Tang *et al*., 2014; Yang *et al*., 2016). Este indicador no solo refleja la capacidad de la vegetación para asimilar carbono por unidad de agua perdida, sino que también es esencial para evaluar la respuesta de los ecosistemas ante fenómenos climáticos extremos, como las sequías, y para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

A escala global, la WUE presenta una alta variabilidad espacial y temporal influenciada por factores bióticos y abióticos. Investigaciones previas han demostrado respuestas contrastadas de la WUE frente a la sequía dependiendo de la zona climática; por ejemplo, se ha observado que tiende a aumentar en ecosistemas áridos debido a limitaciones físicas, mientras que disminuye en regiones semiáridas y subhúmedas donde dominan los procesos biológicos (Yang *et al*., 2016). Asimismo, la dinámica temporal de la WUE está fuertemente condicionada por variables como el déficit de presión de vapor (VPD, por sus siglas en inglés) y el índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés), los cuales modulan tanto la fotosíntesis como la transpiración (Lu & Zhuang, 2010). Tradicionalmente, la estimación de la WUE se ha basado en mediciones in situ mediante torres *eddy covariance*. Sin embargo, aunque estas mediciones son precisas, su cobertura espacial es limitada y discontinua, lo que dificulta la caracterización de patrones a escala global (Tang *et al*., 2014). En este sentido, la teledetección se presenta como una herramienta indispensable, permitiendo la observación continua y consistente de la superficie terrestre. El uso de productos satelitales, como los derivados de sensores MODIS, ha permitido escalar las estimaciones de GPP y ET para monitorear la WUE a nivel regional y planetario (Lu & Zhuang, 2010). No obstante, la precisión de estas estimaciones depende intrínsecamente de la calidad de los productos de GPP y ET utilizados, siendo necesaria la validación y el uso de modelos avanzados que integren mejor la conductancia estomática y la evaporación del suelo.

El objetivo de este trabajo es caracterizar la distribución espacio-temporal de la eficiencia del uso del agua a escala global durante las últimas dos décadas (2000-2020). Para ello, se ha utilizado el producto Penman-Monteith-Leuning versión 2 (PML_V2) (Zhang *et al*., 2019), disponible en la plataforma de procesamiento en la nube Google Earth Engine (GEE) (Gorelick *et al*., 2017).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos de satélite

Se utiliza el producto de teledetección PML_V2 (colección CAS/IGSNRR/PML/V2_v018), accesible en el catálogo de datos de GEE. Este producto proporciona estimaciones globales de ET y GPP con una resolución espacial de 500 m y una frecuencia temporal de 8 días. El algoritmo que utiliza el producto PML_V2 se basa en un modelo de conductancia de la cubierta vegetal que explota los productos de LAI, albedo y emisividad de la superficie de MODIS. Estos datos de teledetección se combinan con forzamientos meteorológicos del sistema de asimilación GLDAS (radiación solar, temperatura, humedad y velocidad del viento) para resolver la ecuación de Penman-Monteith.

2.2. Procesado y análisis

El procesado de datos para el cálculo de la WUE se lleva a cabo íntegramente en la plataforma GEE, en la nube. Las imágenes obtenidas a partir del producto PMLV2 se corresponden con observaciones globales donde la WUE se calcula como *WUE=GPP/ET* expresada en gramos de carbono fijado por kilogramo de agua transpirada (g kg^{-1}). La WUE se calcula a nivel de píxel para cada imagen disponible comprendida entre el 26 de febrero del 2000 (primera fecha disponible) hasta el 31 de diciembre de 2020, abarcando así dos décadas de datos a escala global.

Posteriormente, se realiza una agregación temporal para obtener la climatología media del periodo 2000-2020. Se calcula la media de la WUE para cada píxel considerando las observaciones válidas disponibles en la serie, generando un mapa global que representa la WUE media a largo plazo de los ecosistemas terrestres (Fig. 1). Finalmente, se realiza un estudio preliminar de la evolución temporal de la WUE. En concreto se seleccionaron tres zonas de estudio potencialmente vulnerables a eventos que alteren el estado de los ecosistemas: Almería (estrés hídrico en clima mediterráneo), Amazonia (sensibilidad a eventos climáticos extremos como El Niño) y la Meseta de Loess (afectada por políticas de restauración ecológica). Para cada zona, se extrajo el valor medio de 3 × 3 píxeles para asegurar representatividad espacial de los resultados.

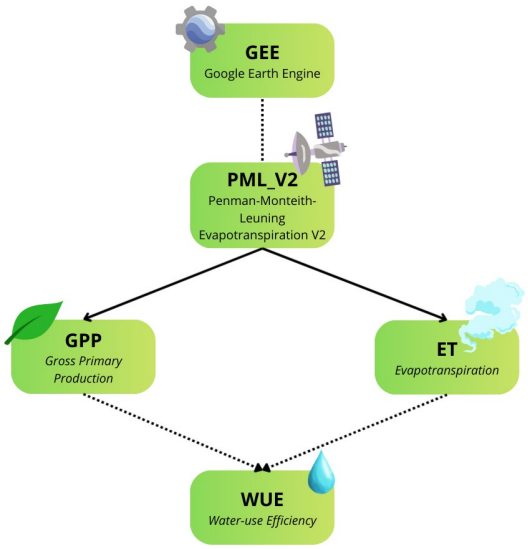


Figura 1. Esquema del flujo de trabajo realizado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra estimaciones de la WUE media a nivel de pixel durante el período 2000-2020. Se puede observar que los valores medios de WUE oscilan globalmente mostrando una heterogeneidad espacial influenciada latitudinalmente por los regímenes climáticos y también por la distribución de los biomas terrestres. Estas distribuciones vienen caracterizadas por la disponibilidad hídrica y la productividad primaria bruta en cada zona. En concreto, los valores más

elevados de WUE se concentran predominantemente en las latitudes medias del hemisferio norte. Estas zonas, dominadas por bosques templados caducifolios y mixtos, así como por áreas de agricultura intensiva, muestran una alta capacidad de asimilación de carbono en relación con la transpiración.

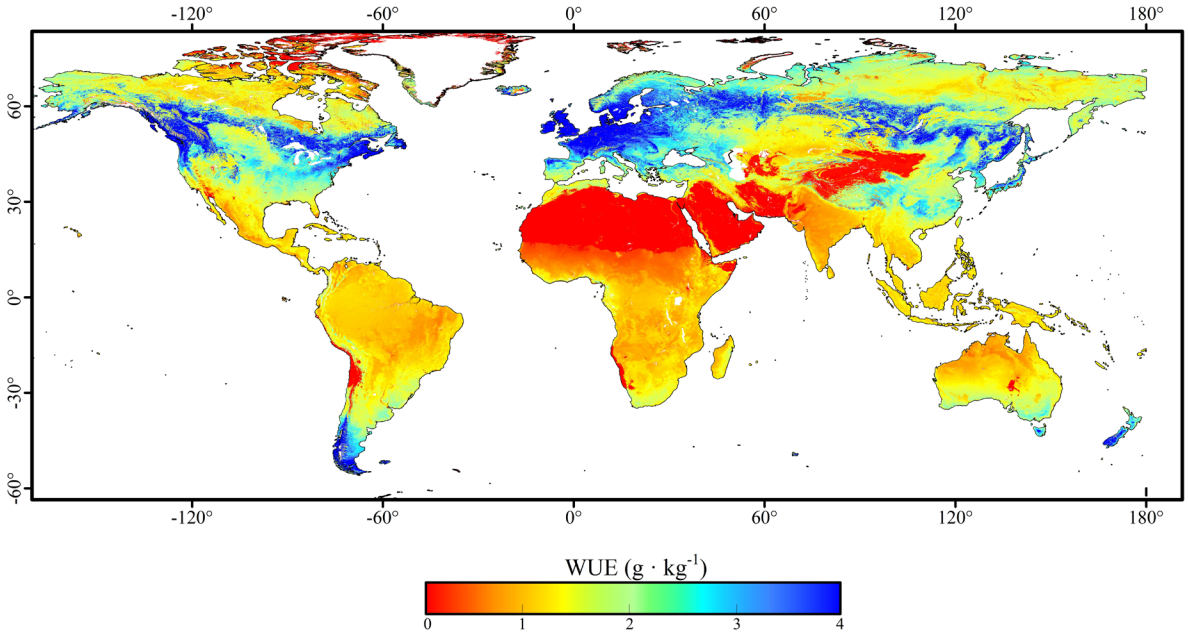


Figura 2. WUE media global durante el período 2000-2020.

Además, también se reportan valores elevados de WUE en zonas de Rusia y Canadá. En estas zonas, aunque la ET es moderada debido bajas temperaturas, la GPP es lo suficientemente alta para proporcionar un valor elevado del cociente GPP/ET. Por su parte, las regiones tropicales húmedas, como la cuenca del Amazonas y el Congo, presentan valores de WUE intermedios a moderados. Aunque la GPP en estos biomas es de las más elevadas del planeta (Campos-Taberner *et al*., 2024), la ET también lo es (Zhang *et al*., 2019), resultando en una eficiencia moderada por unidad de agua transpirada. Finalmente, los valores más bajos de WUE se reportan sobre desiertos (productividad nula), y sobre biomas de Tundra en latitudes extremas donde las bajas temperaturas reducen mucho más la GPP en comparación con la ET, resultando en una baja eficiencia. Agregando todos los valores, se obtuvo un valor de 2.01 g kg^{-1} para la WUE global media durante el periodo 2000-2020. Este valor es ligeramente superior al obtenido por otros estudios como Xue *et al*. (2015), que reportó 1.70 g kg^{-1} en el período 2000-2013.

La Figura 3 muestra la evolución temporal de la WUE para las tres zonas seleccionadas en este trabajo. En la región semiárida de Almería se obtuvo una tendencia decreciente sostenida de la WUE con una pendiente de p= (-0.019 ± 0.002) g kg^{-1} a^{-1}. Una de las posibles causas en esta tendencia en la zona mediterránea es la aridificación progresiva, caracterizada por una reducción gradual de la relación entre GPP y ET. Este patrón es coherente con la diferencia de respuestas de ecosistemas a sequías interanuales, donde bajo condiciones semiáridas la WUE tiende a disminuir cuando la productividad neta responde con mayor sensibilidad a la escasez hídrica que la ET residual (Yang *et al*., 2016). En la región amazónica, la WUE presentó un incremento muy bajo, con una pendiente de *p*= (0.5 ± 1.1) × 10^{-3} g kg^{-1} a^{-1}, y una marcada disminución alrededor de 2009–2010. Esta disminución coincide con un episodio intenso de El Niño que estuvo asociado a una reducción significativa de la precipitación durante la estación seca en Amazonia y a condiciones de sequía extrema más severas que eventos anteriores (Lewis *et al*., 2011). Dichas condiciones promovieron un estrés hídrico sustancial, induciendo una disminución de la asimilación de carbono, pero no de evapotranspiración, lo que resultó en el descenso observado de la WUE. La sequía de 2010 redujo el verdor de la vegetación y retrasó la recuperación de la productividad fotosintética incluso después de normalizadas las precipitaciones (Xu *et al*., 2011). La posterior recuperación de WUE se asocia con el retorno de condiciones más húmedas. Por su parte, la región de la Meseta de Loess en China mostró un incremento sostenido de la WUE durante todo el periodo analizado con una pendiente de *p*= (0.026 ± 0.004) g kg^{-1} a^{-1}. Este incremento se atribuye principalmente a la implementación del programa '*Grain for Green*' (Deng *et al*., 2019), que ha propiciado el cambio del uso del suelo en la zona mediante la aplicación de técnicas de agricultura regenerativa. La restauración de la vegetación ha generado un desacoplamiento entre la ganancia de carbono y la pérdida de agua: mientras que la GPP ha aumentado debido al aumento de vegetación, la ET se ha incrementado a una tasa menor, mitigada por la reducción de la evaporación del suelo gracias al cierre de la cubierta vegetal.

Las estimaciones de WUE reportadas en este estudio están sujetas a incertidumbres de los productos de GPP y ET. La precisión del modelo PML_V2 depende de la calidad de los datos de entrada. Limitaciones como la

saturación del LAI en biomas de alta densidad foliar, pueden introducir sesgos en la cuantificación de la GPP. Por último, aunque el algoritmo de PML_V2 avanza en la integración de la conductancia estomática, la distinción entre la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación sigue siendo un reto en ecosistemas áridos.

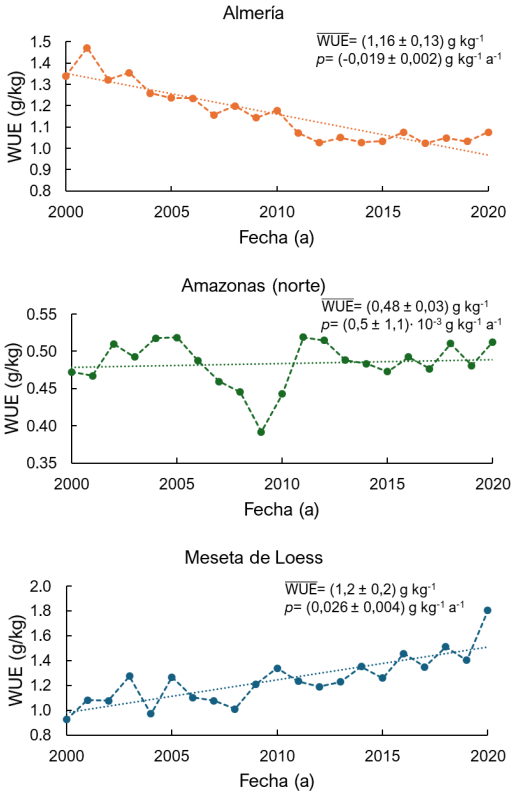


Figura 3. Evolución de la WUE en Almería, en el Amazonas y en la Meseta de Loess (de arriba abajo).

El análisis temporal evidencia que la WUE actúa como un indicador sensible a las distintas presiones que sufren los ecosistemas, mostrando tendencias divergentes según el factor dominante: un decrecimiento sostenido en zonas semiáridas como Almería debido a la aridificación; fluctuaciones abruptas en el Amazonas asociadas a eventos de sequía extrema; y un incremento constante en la meseta de Loess, en China, derivado de la intervención humana modificando usos del suelo. Estos resultados destacan la capacidad de la WUE estimada a partir de teledetección para identificar efectos climáticos y antrópicos en los ciclos de carbono y agua, proporcionando información esencial para la gestión sostenible de los ecosistemas.

4. AGRADECIMIENTOS

Ayuda PID2020-118036RB-I00 financiada por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por “FEDER Una manera de hacer Europa”.

5. REFERENCIAS

Campos-Taberner, M., Gilabert, M. A., Sánchez-Ruiz, S., Martínez, B., Jiménez-Guisado, A., García-Haro, F. J., & Guanter, L. (2024). Global carbon fluxes using multioutput Gaussian processes regression and MODIS products. I*EEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 17*, 11310-11321.

https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3413184

Deng, L., Kim, D. G., Li, M., Huang, C., Liu, Q., Cheng, M., ... & Peng, C. (2019). Land-use changes driven by ‘Grain for Green’program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China. *Global and Planetary Change, 177*, 101-115. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.03.017

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment, 202,* 18-27.

https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Lewis, S. L., Brando, P. M., Phillips, O. L., Van Der Heijden, G. M., & Nepstad, D. (2011). The 2010 amazon drought. *Science, 331*(6017), 554-554.

https://doi.org/10.1126/science.1200807

Lu, X., & Zhuang, Q. (2010). Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. *Remote Sensing of Environment, 114*(9), 1924–1939. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.001

Tang, X., Li, H., Desai, A. R., Nagy, Z., Luo, J., Kolb, T. E., Olioso, A., Xu, X., Yao, L., Kutsch, W., Pilegaard, K., Köstner, B., & Ammann, C. (2014). How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? *Scientific Reports, 4*(1), 7483. https://doi.org/10.1038/srep07483

Wang, X., Fu, Z., Ciais, P., Peñuelas, J., Xiao, J., Li, X., Luo, X., Chen, C., Xia, H., Zhou, T., Stoy, P. C., Green, J. K., & Zhang, F. (2026). Multi-satellite derived data reveals spatiotemporal dynamics of carbon-water coupling and its drivers in tropical ecosystems. *Remote Sensing of Environment, 334*, 115242. https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115242

Xu, L., Samanta, A., Costa, M. H., Ganguly, S., Nemani, R. R., & Myneni, R. B. (2011). Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. *Geophysical Research Letters, 38*(7). https://doi.org/10.1029/2011GL046824

Xue, B. L., Guo, Q., Otto, A., Xiao, J., Tao, S., & Li, L. (2015). Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013. *Ecosphere, 6*(10), 1-18. https://doi.org/10.1890/ES14-00416.1

Yang, Y., Guan, H., Batelaan, O., McVicar, T. R., Long, D., Piao, S., Liang, W., Liu, B., Jin, Z., & Simmons, C. T. (2016). Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. *Scientific Reports, 6*(1), 23284. https://doi.org/10.1038/srep23284

Zhang, Y., Kong, D., Gan, R., Chiew, F. H., McVicar, T. R., Zhang, Q., & Yang, Y. (2019). Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017. *Remote sensing of environment, 222,* 165-182. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.031

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.165

Eficiencia en el uso del carbono de los ecosistemas

Campos-Taberner, Manuel [1] **Gilabert, María Amparo** [1] **Sánchez-Ruiz, Sergio** [1]
Martínez, Beatriz [1] **Jiménez-Guisado, Adrián** [1] **García-Haro, F. Javier** [1]

[1] Universitat de València, España

ORCID: Campos-Taberner 0000-0001-5929-3942 Gilabert 0000-0002-3548-1524 Sánchez-Ruiz 0000-0002-4849-9918 Martínez 0000-0002-6354-9899 Jiménez-Guisado 0009-0005-9691-5567 García-Haro 0000-0001-5888-0061

Correspondencia: manuel.campos@uv.es m.amparo.gilabert@uv.es sergio.sanchez@uv.es beatriz.martinez@uv.es adrian.jimenez@uv.es j.garcia.haro@uv.es

RESUMEN

La eficiencia en el uso del carbono (CUE) es un importante indicador ecológico que cuantifica la capacidad de los ecosistemas terrestres para actuar como sumideros del carbono transferido desde la atmósfera. En este trabajo se presenta una metodología para obtener imágenes de CUE a escala global, a una resolución de 1 km, mediante la espacialización de las medidas in situ utilizando machine learning y productos MODIS. Como caso de estudio se analiza la CUE de los ecosistemas de la península ibérica, así como su tendencia a lo largo del periodo 2001–2023. La tendencia negativa de la CUE, asociada a la pérdida de la capacidad del ecosistema de almacenar carbono, se detecta en amplias zonas de la mitad oeste, mientras que la mitad este –con una anomalía positiva de la precipitación en las últimas dos décadas– presenta una tendencia positiva.

Palabras clave: *CUE, machine learning, eddy covariance, MODIS*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Eficiencia en el uso del carbono de los ecosistemas

Campos-Taberner, Manuel [(1)], Gilabert, María Amparo [(1)], Sánchez-Ruiz, Sergio [(1)], Martínez, Beatriz [(1)], Jiménez-Guisado, Adrián [(1)], García-Haro, F. Javier [(1)]

[(1)] Universitat de València, España.

0000-0001-5929-3942, manuel.campos@uv.es ; 0000-0002-3548-1524, m.amparo.gilabert@uv.es

0000-0002-4849-9918, sergio.sanchez@uv.es ; 0000-0002-6354-9899, beatriz.martinez@uv.es

0009-0005-9691-5567, adrian.jimenez@uv.es ; 0000-0001-5888-0061, j.garcia.haro@uv.es

Resumen: La eficiencia en el uso del carbono (CUE) es un importante indicador ecológico que cuantifica la capacidad de los ecosistemas terrestres para actuar como sumideros del carbono transferido desde la atmósfera. En este trabajo se presenta una metodología para obtener imágenes de CUE a escala global, a una resolución de 1 km, mediante la espacialización de las medidas *in situ* utilizando *machine learning* y productos MODIS. Como caso de estudio se analiza la CUE de los ecosistemas de la península ibérica, así como su tendencia a lo largo del periodo 2001–2023. La tendencia negativa de la CUE, asociada a la pérdida de la capacidad del ecosistema de almacenar carbono, se detecta en amplias zonas de la mitad oeste, mientras que la mitad este –con una anomalía positiva de la precipitación en las últimas dos décadas– presenta una tendencia positiva.

Palabras clave: CUE, machine learning, eddy covariance, MODIS

Ecosystem carbon use efficiency

***Abstract**: Carbon use efficiency (CUE) is an important ecological indicator that quantifies the capacity of terrestrial ecosystems to act as sinks for carbon transferred from the atmosphere. This paper presents a methodology for obtaining global CUE images at a 1 km resolution by spatializing in situ measurements using machine learning and MODIS products. As a case study, the CUE of ecosystems in the Iberian Peninsula is analyzed, along with its trend over the period 2001–2023. The negative trend of the CUE, associated with the loss of the ecosystem's capacity to store carbon, is detected in large areas of the western part, while the eastern –with a positive precipitation anomaly in the last two decades– shows a positive trend.*

***Keywords**: CUE, machine learning, eddy covariance, MODIS*

1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia en el uso del carbono de las plantas es un indicador del carbono fijado por fotosíntesis que se queda en la planta en lugar de ser respirado (respiración autótrofa, R_a). Se define como el cociente entre el carbono que se incorpora en forma de biomasa (producción primaria neta, NPP) y el carbono total que consume la planta en el proceso de fotosíntesis (producción primaria bruta, GPP). Para un ecosistema, sin embargo, se define la eficiencia en el uso de carbono como (Campos-Taberner *et al*., 2025):

$$\mathrm{CUE} = \mathrm{NEP}/\mathrm{GPP} = 1 - \left(\frac{R_a + R_h}{\mathrm{GPP}}\right) \qquad (1)$$

siendo NEP la producción neta, que tiene en cuenta el carbono que se retiene como fitomasa y el carbono orgánico del suelo. Cuando se considera un ecosistema, el flujo de carbono que se devuelve a la atmósfera por el proceso de respiración comprende tanto la contribución autótrofa R_a (plantas) como la heterótrofa o microbiana (R_h). El valor de CUE del ecosistema es inferior al de las plantas. La CUE del ecosistema representa la capacidad potencial del ecosistema como sumidero de carbono, y aporta información relevante del funcionamiento del ecosistema y de la dinámica del ciclo de carbono.

Todas las variables en la Ec. (1) hacen referencia a flujos de carbono, es decir, a la masa de carbono que se intercambia (entre el ecosistema y la atmósfera) por unidad de tiempo y de superficie.

Los flujos de carbono involucrados en la CUE presentan variaciones espaciotemporales (dependen del tipo de ecosistema, de la fenología de la vegetación, de factores medioambientales, etc.). Consiguientemente, también la CUE presenta una variabilidad en función del espacio y del tiempo que es necesario cuantificar. En este trabajo: (i) Se presenta una metodología, recientemente desarrollada (Campos-Taberner *et al*., 2025), que permite obtener, mediante *machine learning* e imágenes MODIS, mapas globales de CUE a 1 km (a lo largo de 23 años) a partir de valores de CUE *in situ*. (ii) Se evalúa dicho producto de CUE en la península Ibérica y se analiza la tendencia de la CUE anual a lo largo de la serie

temporal considerada.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos *in situ*

Las medidas *in situ* de GPP y NEP proceden de la red FLUXNET, que proporciona datos diarios en 211 torres distribuidas por todo el globo. Se obtienen mediante la técnica *eddy covariance* (EC) (Baldocchi *et al*., 2001). Las torres se ubican en diversos tipos de ecosistemas (principalmente bosques y pastizales) desde 77º N hasta 57º S. En particular, se utiliza el producto FLUXNET2015 (https://fluxnet.org/data/fluxnet2015-dataset/).

La cobertura temporal de las torres EC no es uniforme: algunos sitios solo proporcionan entre uno y cuatro años de observaciones, mientras que otros cubren más de una década. Un proceso de filtrado ha permitido seleccionar 2912 muestras (que simultáneamente presentan alta calidad del dato *in situ* y del producto MODIS) para el entrenamiento y la evaluación del modelo (sección 2.3).

2.2. Datos MODIS

Se utilizan ocho variables como predictores del modelo (sección 2.3), que se obtienen a partir de productos MODIS (Tabla 1). Todas ellas se descargaron a una resolución de 1 km de *Google Earth Engine* (GEE) en las localizaciones de las torres EC a lo largo del periodo 2001-2023.

Por otra parte, para caracterizar la precipitación se utiliza el índice de precipitación estandarizado a 12 meses (EDO SPI-12) que proporciona el *Joint Research Centre* (https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/4d64a2d4-d245-4a2e-bc97-197c8146f1d1).

Tabla 1. Variables utilizadas a partir de productos MODIS.

Variable	Producto en GEE	Referencia
PAR	MCD18C2.061	Liang & Wang (2017)
kNDVI*	MCD43A4.061	Strahler *et al*. (1999)
LST_D, LST_N	MOD11A2.061	Hulley *et al*. (2012)
ET, PET, C_{ws}=ET/PET	MOD16A2.061	Mu *et al*. (2013)
LAI	MCD15A2H.061	Myneni *et al*. (2021)

* Calculado según Cams-Valls *et al*. (2021).

2.3. Metodología

La regresión mediante procesos gaussianos (GPR, por sus siglas en inglés) proporciona un enfoque probabilístico a la regresión no paramétrica basada en kernels (Rasmussen & Williams, 2006). La GPR asume que un conjunto de funciones latentes posibles está gobernado por un proceso gaussiano previo. A partir de las observaciones y de la función de verosimilitud, se obtiene una distribución posterior que permite realizar estimaciones probabilísticas. El modelo de regresión estándar expresa la salida como la suma de una función latente desconocida $f(\boldsymbol{x})$ dependiente de las variables de entrada, y un ruido gaussiano independiente de la forma $\mathcal{N}(0, \sigma_n^2)$. Campos-Taberner *et al*. (2025) proporcionan información detallada del procedimiento.

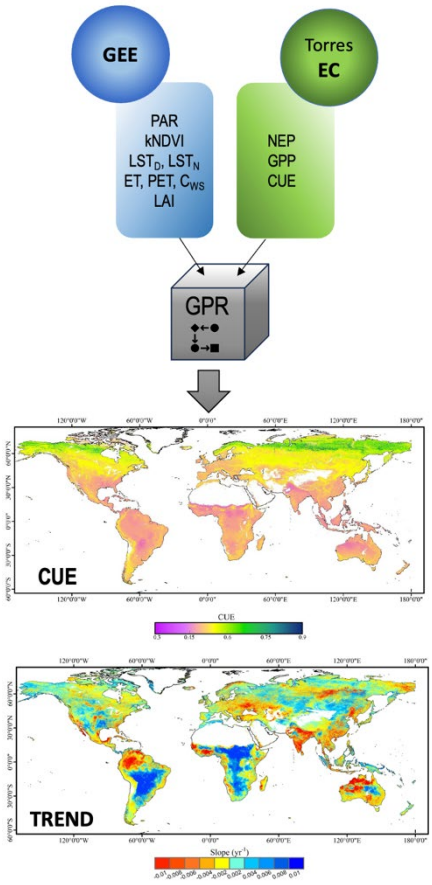


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología utilizada.

El modelo GPR se evalúa con 2912 pares de datos (8 predictores–CUE). Dado que los predictores presentan rangos de variación sustancialmente diferentes, las variables de entrada se escalan en un rango de 0 a 1 con el fin de reducir el riesgo de rendimiento subóptimo del modelo. El calibrado del modelo se lleva a cabo considerando once casos de porcentajes de entrenamiento-validación: desde un 1 % – 99 %, hasta un 90 % – 10 %. Las estadísticas de validación se promedian entre iteraciones y, posteriormente, se evalúa el modelo utilizando la división 70 % – 30 %. Finalmente, se ejecuta el modelo GPR (entrenado con todas las muestras) para obtener estimaciones multitemporales de CUE de 1 km a escala global desde 2001 hasta 2023 (Fig. 1). La tendencia de la serie (tanto a escala global como de la península) se obtiene calculando la pendiente (*S*) mediante el estimador de pendientes de Theil-Sen. Cabe destacar que todas las pendientes son significativas según el test de Mann-Kendall modificado (Hamed & Rao, 1998).

A continuación, se extrae la información de la CUE anual para la zona de estudio (península Ibérica) a lo largo del periodo 2001 – 2023. Para un análisis más detallado se seleccionan 6 *sites* (Fig. 2b).

3. RESULTADOS

3.1. Escala global

El producto de CUE a escala global proporciona una medida robusta de la eficiencia del secuestro de carbono terrestre (en promedio, CUE = 0.43 ± 0.08). Su patrón espacial concuerda con estudios previos (Campos-Taberner *et al*., 2025). Los valores medios de CUE por bandas de latitud aumentan de climas tropicales a fríos y vuelven a disminuir hacia las zonas polares. En promedio, a lo largo de las últimas dos décadas, se observa que la CUE presenta una tendencia $S = (-1.2 \pm 0.3) \times 10^{-3}\ a^{-1}$. Las áreas con tendencias negativas (Fig. 1, inferior, en rojo) se encuentran tanto en zonas húmedas como áridas: la mayor disminución de la CUE se registra en la Amazonia (húmeda), la India y el NO de Australia (más árida). Las áreas que presentan cambios positivos significativos (Fig. 1, inferior, en azul) también se encuentran tanto en zonas húmedas (como las de Sudamérica y el centro-sur de África), como en zonas áridas (Australia y el oeste de EE. UU).

3.2. Península ibérica

La Figura 2 muestra la imagen de la CUE media anual de la península Ibérica, así como la de la tendencia de dicha variable y la del SPI-12 a lo largo del periodo 2001–2023. El valor medio de la CUE (promedio espacial y temporal) es 0.44 ± 0.04. Los valores más altos de CUE (Fig. 2a) se localizan en zonas con GPP baja y estacionalidad marcada de la vegetación, es decir, cultivos de secano (con actividad máxima en primavera), vegetación dispersa en el SE, y zonas de arrozales (actividad máxima en verano). Por el contrario, los valores de CUE anual más bajos se localizan en las zonas donde la variación relativa de la actividad de la vegetación a lo largo del año es menor, como los bosques en el N y en el NO, en el centro y O, y los alcornocales en el S. Todas ellas con GPP alta y una baja estacionalidad. Los valores bajos de CUE se asocian con un alto coste metabólico (flujo de respiración elevado en bosques) o con limitaciones de nutrientes, que reducen la eficiencia.

La imagen de pendiente (Fig. 2b) presenta dos zonas con tendencias opuestas, separadas por una diagonal imaginaria que atravesaría la península de NO a E (desde Oviedo hasta Almería): una a la derecha de la diagonal, con pendiente positiva, y otra a la izquierda, con pendiente negativa, salvo algunas zonas costeras y una zona de CUE baja (bosque de eucaliptos) localizada al este de Coimbra, en Portugal (*site* #4, por ejemplo).

La tendencia positiva de la CUE sugiere que la asimilación de carbono supera los costes respiratorios, y coincide con una anomalía positiva en la precipitación durante el mismo periodo (nótese, *grosso modo*, la semejanza entre las Figs. 2b y 2c). Se manifiesta en zonas donde el estrés hídrico puede ser un importante factor limitante de la productividad, como Los Monegros (#5) y la zona semiárida de Murcia (#6). Un aumento de la precipitación alivia el estrés, fomentando la asimilación de carbono por fotosíntesis sobre la pérdida por respiración. Por otra parte, la tendencia de la CUE negativa (pérdida de capacidad de almacenar carbono) se localiza en el NO (montes de León, #3), así como en el sistema Central, sierra Morena y sistema Bético, cuenca del Guadiana al este de Mérida (#1) y en los humedales del Lucio Real, en las marismas del Guadalquivir (#2). En todas estas zonas, la precipitación registrada se encuentra en niveles por debajo del su valor medio; las plantas limitan su actividad y aumenta la respiración de mantenimiento. Las zonas #1, #2 y #3 muestran pendiente negativa, mientras que las zonas #4, #5 y #6 muestran pendiente positiva, pero el valor de la pendiente es similar en magnitud (entre $5 \times 10^{-3}\ a^{-1}$ y $7 \times 10^{-3}\ a^{-1}$).

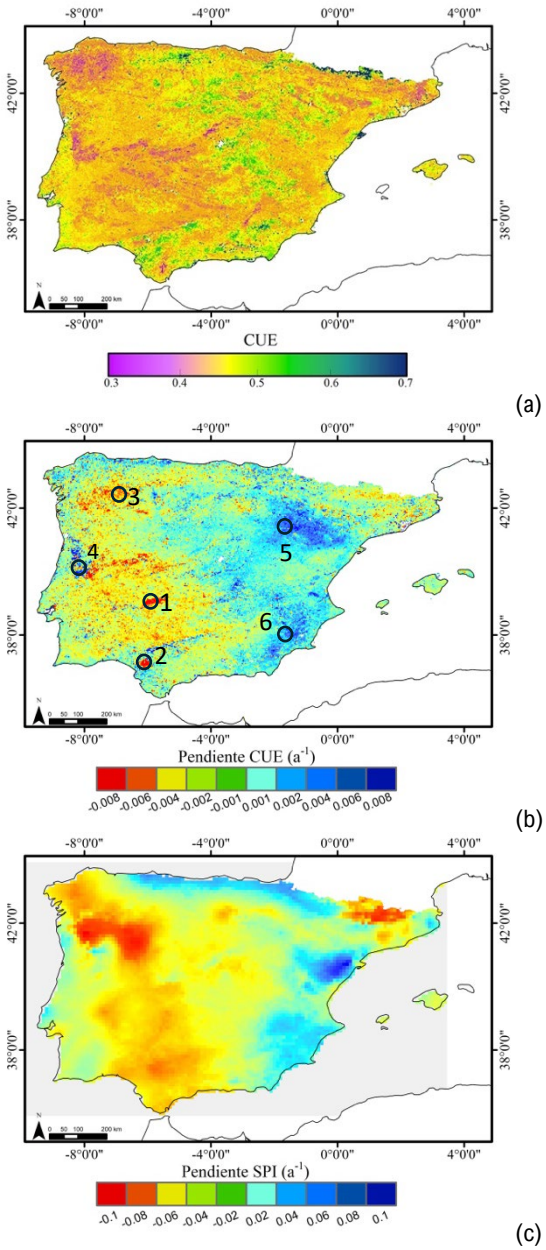


Figura 2. (a) Valor medio y (b) tendencia de la CUE anual a lo largo del periodo 2001–2023. (c) Tendencia del SPI-12. En (b) se indican los seis *sites*: #1, …, #6 seleccionados.

Se observa una dualidad en la respuesta de la vegetación: mientras que la CUE de los ecosistemas atlánticos parece estar disminuyendo, la zona mediterránea muestra una tendencia positiva. En el primer caso, el declive se traduce en una merma en la

capacidad de retención de carbono, lo cual es especialmente relevante en las zonas forestales, con GPP elevada, que consumen más energía (carbono) a través de la respiración. La tendencia positiva en la otra zona, vinculada con la anomalía positiva de la precipitación, realmente no involucra cantidades de carbono fijado significativas, dado que la GPP en estas zonas es baja. La CUE positiva podría atribuirse a unos costes respiratorios mucho más bajos.

Se ha analizado la CUE media de cada uno de los biomas presentes en la península (Fig. 3). Los bosques perennes presentan los valores de CUE más bajos (0.39 ± 0.04), mientras que los más altos se corresponden con los matorrales poco densos (0.54 ± 0.05) y con humedales permanentes (0.53 ± 0.06). Estas clases presentan cierta dispersión porque engloban zonas de características climáticas diversas.

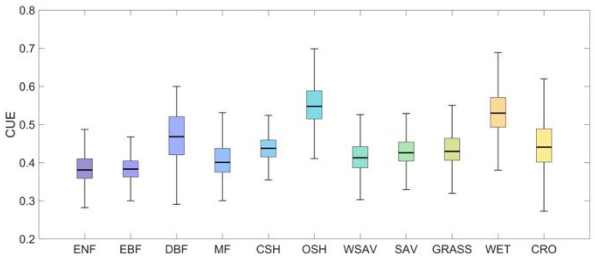


Figura 3. *Box plots* de la CUE anual media para los diferentes biomas: ENF (bosques de coníferas perennifolios), EBF (bosques de frondosas perennifolios), DBF (bosques de frondosas caducifolios), MF (bosques mixtos), CSH (matorrales cerrados), OSH (matorrales abiertos), WSAV (sabanas arboladas), SAV (sabanas), GRASS (pastizales), WET (humedales), and CRO (cultivos).

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una herramienta potente y robusta para mapear la CUE de los ecosistemas a escala global y cuantificar sus cambios a lo largo del tiempo. Se basa en una espacialización, que combina datos *in situ* con productos de teledetección en un algoritmo GPR. La tendencia negativa global de la CUE sugiere una disminución de la capacidad de los ecosistemas para secuestrar CO_2 atmosférico, lo que evidencia la importancia de continuar su evaluación en el futuro.

En la península ibérica se observa una disminución de la CUE en la parte más occidental y un aumento en la oriental. Este patrón parece estar muy influenciado por la precipitación. No obstante, también se observan divergencias entre las tendencias de precipitación y de CUE (por ejemplo, en Almería) que, en ocasiones, podrían atribuirse a limitaciones del algoritmo por su dependencia con el número y representatividad espacial de las medidas. De hecho, la base Fluxnet2015 presenta una infra-representación de biomas áridos y semiáridos. Trabajos futuros abordarán la integración explícita de estaciones de referencia locales en los procesos de entrenamiento y validación, así como el desarrollo de algoritmos capaces de ponderar la escasez de muestras.

5. AGRADECIMIENTOS

Ayuda PID2020-118036RB-I00 financiada por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por “FEDER Una manera de hacer Europa”.

6. REFERENCIAS

Baldocchi, D., Falge, E., Lianhong, G. + 20 autores (2001). FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society 82*, 2415–2434, https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082%3C2415:FANTTS%3E2.3.CO;2

Campos-Taberner, M., Gilabert, M. A., Sánchez-Ruiz, S., Martínez, B., Jiménez-Guisado, A., & García-Haro, F. J. (2025). Ecosystem carbon use efficiency at global scale: upscaling eddy-covariance data with machine learning and MODIS products. *Scientific Reports 15*, 44496. https://doi.org/10.1038/s41598-025-28151-x

Camps-Valls, G., Campos-Taberner, M., Moreno-Martínez, A. + 10 autores (2021). A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere. *Science Advances 7*, eabc7447; https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abc7447

Hamed, K.H., & Rao, A.R. (1998). A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. J*ournal of Hydrology 204*, 182.

https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X

Hulley, G. C., Hook, S. J., & Hughes, C. (2012). MODIS MOD21 land surface temperature and emissivity algorithm theoretical basis document. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration.

Liang, S., & Wang, D. (2017). MODIS Downward Shortwave Radiation (MCD18A1) and PAR (MCD18A2) Algorithm Theoretical Basis Document. https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD18C2.061

Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2013). MODIS global terrestrial ET product (NASA MOD16A2/A3). Algorithm Theoretical Basis Document, Collection, 5, 600; https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006

Myneni, R., Knyazikhin, Y., & Park, T. (2021). MODIS/Terra+Aqua Leaf Area Index/FPAR 4-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD15A3H.061

Rasmussen, C. E., & Williams, C. K. I. (2006). Gaussian Processes for Machine Learning. New York: The MIT Press.

Strahler, A. H., Muller, J.-P., & Modis Science Team Members. (1999). MODIS BRDF/albedo product: Algorith Theoretical Basis Document version 5.0 (https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod09.pdf).

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.182

Análisis de las propiedades dieléctricas del agua del mar en el espectro de las microondas y su importancia para la monitorización del ciclo del agua global.

Ruiz Sebastián, Arnau [1] **Bergas, Joan** [1] **González Gambau, Verónica** [1] **Turiel, Antonio** [1] **Onrubia, Raul** [2] **Olmedo, Estrella** [1]

[1] Barcelona Expert Center (BEC) & Instituto de Ciencias del Mar (ICM), CSIC , España

[2] Zenithal Blue Technologies (ZBT), España

ORCID: Ruiz Sebastián 0009-0002-7596-9185 Bergas 0009-0006-3909-2266 González Gambau 0000-0002-6380-3754 Turiel 0000-0001-6103-224X Onrubia 0000-0001-6636-1587 Olmedo 0000-0002-3178-1554

Correspondencia: arnauruiz@icm.csic.es jbergas@icm.csic.es vgonzalez@icm.csic.es turiel@icm.csic.es onrubia@zenithalblue.com olmedo@icm.csic.es

RESUMEN

La estimación de la salinidad superficial del océano mediante teledetección en microondas constituye un desafío debido a su carácter indirecto y a la dependencia de modelos físicos intermedios. En este trabajo se analiza la validez de los modelos existentes de constante dieléctrica del agua de mar en el rango de frecuencias de 0.4 a 2 GHz, con especial interés en su aplicabilidad en el contexto de la futura misión CRYORAD. Se estudia la dispersión entre distintos modelos ampliamente utilizados (Klein & Swift, Meissner & Wentz, BVZ, entre otros) a partir de su formulación basada en el modelo de un tiempo de relajación de Debye. Los resultados muestran que la variabilidad entre modelos es débilmente dependiente de la frecuencia en la parte real de la constante dieléctrica, mientras que en la parte imaginaria presenta una mayor sensibilidad, especialmente a bajas frecuencias. No obstante, la dispersión global se mantiene acotada, lo que sugiere que los modelos actuales son razonablemente robustos en el rango de estudio.

Palabras clave: *Constante dieléctrica, radiometría de microondas de banda ancha, salinidad superficial del mar, CryoRad*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 22 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis de las propiedades dieléctricas del agua del mar en el espectro de microondas

Ruiz Sebastián, Arnau [(1)], Bergas, Joan [(1)], González Gambau, Verónica [(1)], Turiel, Antonio [(1)], Onrubia, Raul [(2)], Olmedo, Estrella [(1)]

[(1)] Barcelona Expert Center (BEC) & Instituto de Ciencias del Mar (ICM), CSIC, España.
0009-0002-7596-9185, arnauruiz@icm.csic.es ; 0009-0006-3909-2266, jbergas@icm.csic.es
0000-0002-6380-3754, vgonzalez@icm.csic.es ; 0000-0001-6103-224X, turiel@icm.csic.es
0000-0002-3178-1554, olmedo@icm.csic.es

[(2)] Zenithal Blue Technologies (ZBT), España.
0000-0001-6636-1587, onrubia@zenithalblue.com.

Resumen: La estimación de la salinidad superficial del océano mediante teledetección en microondas constituye un desafío debido a su carácter indirecto y a la dependencia de modelos físicos intermedios. En este trabajo se analiza la validez de los modelos existentes de constante dieléctrica del agua de mar en el rango de frecuencias de 0.4 a 2 GHz, con especial interés en su aplicabilidad en el contexto de la futura misión CRYORAD. Se estudia la dispersión entre distintos modelos ampliamente utilizados (Klein & Swift, Meissner & Wentz, BVZ, entre otros) a partir de su formulación basada en el modelo de un tiempo de relajación de Debye. Los resultados muestran que la variabilidad entre modelos es débilmente dependiente de la frecuencia en la parte real de la constante dieléctrica, mientras que en la parte imaginaria presenta una mayor sensibilidad, especialmente a bajas frecuencias. No obstante, la dispersión global se mantiene acotada, lo que sugiere que los modelos actuales son razonablemente robustos en el rango de estudio.

Palabras clave: Constante dieléctrica, radiometría de microondas de banda ancha, salinidad superficial del mar, CryoRad

Analysis of the dielectric properties of sea water in the microwave spectrum

***Abstract**: The estimation of ocean surface salinity by means of microwave remote sensing constitutes a challenge due to its indirect nature and its dependence on intermediate physical models. In this work, the validity of existing models of the dielectric constant of seawater in the frequency range from 0.4 to 2 GHz is analysed, with special interest to their applicability in the context of the future CRYORAD mission. The dispersion among different widely used models (Klein & Swift, Meissner & Wentz, BVZ, among others) is studied based on their formulation derived from the Debye single time relaxation model. The results show that the variability among models is weakly dependent on frequency in the real part of the dielectric constant, whereas in the imaginary part it exhibits greater sensitivity, especially at low frequencies. Nevertheless, the overall dispersion remains bounded, which suggests that current models are reasonably robust within the studied range.*

***Keywords**: Dielectric constant, low-frequency wideband microwave radiometry, sea surface salinity, dielectric constant, microwave radiometry, sea surface salinity, CryoRad*

1. INTRODUCCIÓN

La observación por satélite de variables como la salinidad del mar presenta importantes desafíos, ya que se trata de magnitudes que no son directamente observables y cuya estimación requiere técnicas complejas y el uso de información auxiliar. No obstante, en la actualidad se dispone de más de 16 años de observaciones continuadas que, junto con los avances en teledetección tanto a nivel instrumental como en los métodos de procesado, permiten analizar su variabilidad y evolución con un grado de precisión cada vez mayor.

Las primeras misiones satelitales que han dado acceso a las variables del ciclo del agua con radiometría de microondas. En concreto, explotando la frecuencia de 1.413 GHz de la banda L de microondas, como es el caso de las misiones de la Agencia Espacial Europea SMOS (2009-), de la NASA Aquarius (2011-2015) y SMAP (2015-), y recientemente la misión china COSM (2024-). Todas estas misiones embarcan radiómetros en banda L

que permiten medir tanto variables oceánicas (salinidad, grosor del hielo marino) como terrestres (humedad del suelo). Cada una de estas misiones tiene diferentes tecnologías instrumentales y por tanto características y problemáticas diferentes. SMOS es un radiómetro interferométrico en dos dimensiones que genera una imagen de síntesis con una resolución nominal en el centro del campo de visión de 35-50 km. Aquarius tenía tres radiómetros de apertura real con resoluciones de entre 90 y150 km con tres ángulos de incidencia diferentes. SMAP tiene un radiómetro de apertura real que realiza un barrido circular sobre la superficie reflectante, una resolución nominal de 9 km y con un ángulo de incidencia fijo de 40º. Finalmente el instrumento MICAP a bordo de COSM es un radiómetro interferométrico en una dimensión y una resolución de 30 km. Se espera que entre 2029 y 2030 se lance la misión CIMR dentro del programa Copernicus, la cual vendrá dotada de radiómetros de apertura real a diversas frecuencias, incluyendo la banda L.

En cuanto a misiones futuras, la misión CRYORAD es una misión candidata del programa Earth Explorer 12 de la Agencia Espacial Europea, en la que se propone la adquisición de datos en el rango de frecuencias de microondas 0.4-2 GHz de manera continua. Las frecuencias por debajo de la banda L tienen una mayor sensibilidad a cambios de salinidad, con lo que se espera una mejora de la calidad de la recuperación de esta variable. Por otro lado, en este rango de frecuencias solo la banda L está protegida para la observación de la Tierra y, por lo tanto, en el resto de frecuencias se espera un mayor impacto de las interferencias.

El presente trabajo se centra en el análisis de los diferentes modelos existentes para la caracterización de la constante dieléctrica, magnitud que relaciona las variaciones de temperatura de brillo medidas por el instrumento con los cambios en la salinidad y la temperatura superficial del mar. El objetivo principal es evaluar la dispersión de los modelos actuales de la constante dieléctrica del agua de mar, dentro del rango de frecuencias de 0.4 a 2 GHz, y determinar su idoneidad para su aplicación en la misión CRYORAD.

2. BASE TEÓRICA

Existe una extensa literatura sobre modelos de la constante dieléctrica del agua de mar, especialmente en banda L y frecuencias más altas. Entre los más utilizados destacan los modelos de Klein & Swift (1977), Meissner & Wentz (2012), George Washington (2020) y el modelo BVZ (Boutin, Vergely & Zhou, 2023). Sin embargo, el desarrollo de modelos en banda P es relativamente reciente y aún limitado. De hecho, el único modelo ajustado con medidas de laboratorio en banda P es el modelo de Le Vine (2025).

La mayoría de estos modelos se fundamentan en el modelo de un solo tiempo de relajación de Debye (1934), que describe la dependencia de la constante dieléctrica con la frecuencia, la salinidad y la temperatura:

$$\varepsilon(\omega,S,T) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s(S,T) - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau(S,T)} - j\frac{\sigma(S,T)}{\omega\varepsilon_0} \quad (1)$$

Donde $\varepsilon(\omega,S,T)$ es la constante dieléctrica, ε_∞ es la permitividad a frecuencias muy altas, $\varepsilon_s(S,T)$ es la constante dieléctrica estática, $\tau(S,T)$ es el tiempo de relajación, $\sigma(S,T)$ es la conductividad iónica, ε_0 es la permitividad en el espacio libre y $\omega = 2\pi f$ donde f es la frecuencia (Hz). Separando la parte real e imaginaria de la constante dieléctrica, se obtiene:

$$\Re(\varepsilon) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2)$$

$$\Im(\varepsilon) = -\frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\,\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} - \frac{\sigma}{(\omega\varepsilon_0)} \quad (3)$$

Dado que los parámetros ε_s, τ y σ no dependen de la frecuencia, las ecuaciones (2) y (3) nos permiten caracterizar directamente la influencia del término f respecto al valor de la parte real e imaginaria de la constante dieléctrica. Por otro lado, la comparativa directa de ε_s, τ y σ permite evaluar las diferencias entre los modelos y determinar en qué rango de salinidades y temperaturas estas diferencias son más significativas.

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Como se indicó en la sección anterior, para cada frecuencia f la diferencia entre los modelos viene dada por la diferencia de los parámetros ε_s, τ y σ que dependen únicamente de la salinidad y de la temperatura. Estos parámetros se ajustan según las distintas mediciones y métodos considerados en cada modelo. En las Figuras 1 y 2 se presentan la media y el porcentaje de desviación estándar de los parámetros ε_s, τ y σ para los modelos Klein & Swift, Meisser & Wentz, George Washington (2020) y BVZ.

Retomando las ecuaciones (2) y (3), en la parte real la frecuencia aparece multiplicando al término τ del orden de 10^{-11} y el rango de frecuencias es del orden de 10^9 Hz. Por lo tanto, al elevar al cuadrado $\omega\tau$ se obtiene un valor del orden de 10^{-4}, lo que implica una variación pequeña en el denominador con respecto a la frecuencia.

Con respecto a la parte imaginaria, en el primer término $-\frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\,\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}$ la variación de la frecuencia también se ve atenuada por τ, lo que hace que el término dominante sea el segundo, $-\frac{\sigma}{(\omega\varepsilon_0)}$, que es inversamente proporcional a f.

En consecuencia, la dispersión entre modelos para $f \in [0.4, 2.0]$ GHz será prácticamente constante con respecto a la frecuencia para la parte real de la constante dieléctrica. Mientras que, para la parte imaginaria, crecerá a medida que el valor de f disminuya. No obstante, la Figura 3 muestra que la parte real presenta una variación limitada (≈ 2), mientras que la parte imaginaria se extiende sobre un rango significativamente mayor (≈ 100). En este sentido, aunque la parte imaginaria muestra una mayor variación absoluta respecto a la frecuencia, la dispersión relativa es poco significativa.

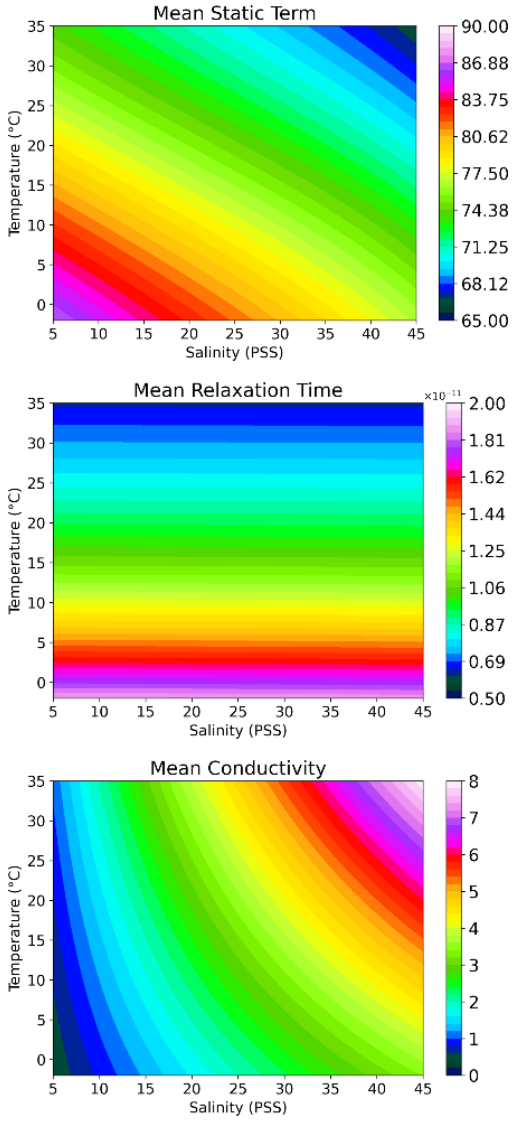


Figura 1. Media entre los modelos analizados de la constante dieléctrica estática (panel superior), el tiempo de relajación (panel central) y la conductividad iónica (panel inferior), respecto a la temperatura (ºC) y a la salinidad (PSS, Practical Salinity Scale).

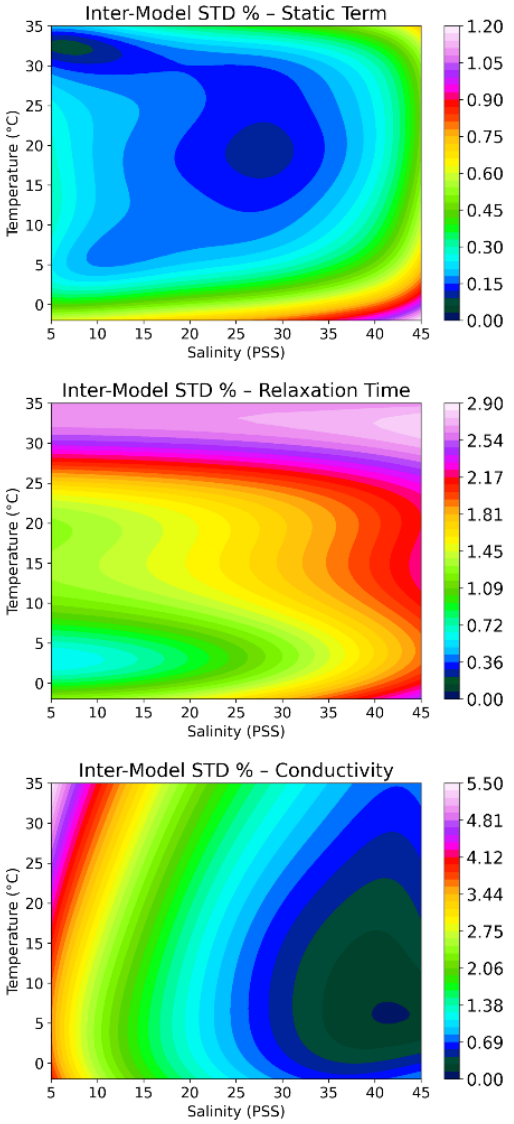


Figura 2. Porcentaje de desviación estándar entre los modelos analizados de la constante dieléctrica estática (panel superior), el tiempo de relajación (panel central) y la conductividad iónica (panel inferior), respecto a la temperatura (ºC) y a la salinidad (PSS, Practical Salinity Scale).

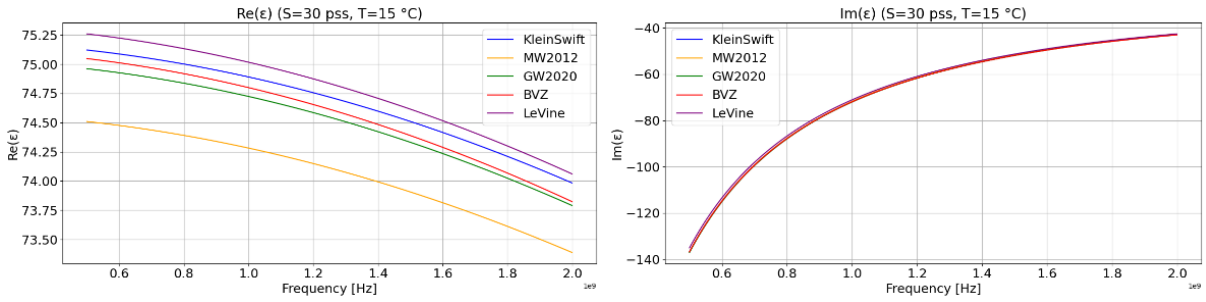


Figura 3. Parte real (panel superior) e imaginaria (panel inferior) de la constante dieléctrica en función de la frecuencia (GHz) para valores fijos de salinidad (30 PSS) y temperatura (15 ºC).

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que los modelos actuales de constante dieléctrica presentan, en términos generales, una buena consistencia en el rango de frecuencias comprendido entre 0.4 y 2 GHz. Esta concordancia es especialmente notable en la parte real, cuya dependencia con la frecuencia es débil, lo que se refleja en una baja dispersión entre modelos a lo largo de todo el rango.

Por el contrario, la parte imaginaria muestra una mayor sensibilidad a la frecuencia, particularmente en el extremo inferior del espectro, correspondiente a la banda P. Este comportamiento está dominado por el término asociado a la conductividad, que genera una dependencia inversamente proporcional a la frecuencia. A pesar de esta mayor variabilidad, la dispersión entre los distintos modelos analizados se mantiene dentro de márgenes relativamente acotados, lo que respalda su aplicabilidad en el rango de frecuencias analizado.

En conjunto, estos resultados sugieren que los modelos actuales son, en general, adecuados para su uso en el marco de la misión CRYORAD. Además, la comparativa entre modelos en banda L es aplicable también a la banda P dado el escaso efecto de la frecuencia en dichos rangos. No obstante, la limitada disponibilidad de validación experimental en banda P introduce incertidumbres adicionales, lo que evidencia la necesidad de profundizar el estudio de la constante dieléctrica a bajas frecuencias con el fin de mejorar la precisión en la estimación de la salinidad superficial del océano.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto de la Agencia Espacial Europea End-to-End Performance Simulator for CryoRad, con referencia 4000150528-1. Parte de los autores forman parte del Instituto de Ciencias del Mar, acreditado como Centro de Excelencia “Severo Ochoa” CEX-2024-001494-S por la Agencia Estatal de Investigación.

6. REFERENCIAS

Boutin, J., Vergely, J.-L., Bonjean, F., Perrot, X., Zhou, Y., Dinnat, E.P., Lang, R.H., Le Vine, D.M., and Sabia, R. (2023). New Seawater Dielectric Constant Parametrization and Application to SMOS Retrieved Salinity. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing 61, 2000813.

Debye, P. (1934). Part I. Dielectric constant. Energy absorption in dielectrics with polar molecules. Transactions of the Faraday Society, 30, 679-684.

Entekhabi, D., Njoku, E. G., O’Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., Entin, J. K., Goodman, S. D., Jackson, T. J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J. R., Koster, R. D., Martin, N., McDonald, K. C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J.-C., Spencer, M. W., Thurman, S. W., Tsang, L., & Van Zyl, J. (2010). “The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission.” Proceedings of the IEEE, 98(5), 704–716.

Kilic, L., Prigent, C., Jiménez, C., Donlon, C., *et al*. (2018). “Expected Performance of the Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR) Mission.” Remote Sensing, 10(12), 1963.

Klein, L.A., and Swift, C.T. (1977). An Improved Model for the Dielectric Constant of Sea Water at Microwave Frequencies. IEEE Transactions on antennas and propagation 25, 104–111.

D. M. Le Vine, G. S. E. Lagerloef and S. E. Torrusio, "Aquarius and Remote Sensing of Sea Surface Salinity from Space," in Proceedings of the IEEE, vol. 98, no. 5, pp. 688-703, May 2010, doi: 10.1109/JPROC.2010.2040550.

D. M. Le Vine, R. H. Lang, M. Li, E. P. Dinnat, J. Boutin, and Y. Zhou, “The Dielectric Constant of Sea Water at P-Band for Salinity From 0 to 150 pss,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 63, pp. 1–11, 2025, doi: 10.1109/tgrs.2025.3532180.

Y. Li, X. Yin, W. Zhou, M. Lin, Y. Li and H. Liu, "First Assessment of Salinity Retrieval for Airborne COSM Data," IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024, pp. 5851-5854, doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10642724.

Meissner, T., and Wentz, F.J. (2012). The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing 50, 3004–3026.

R. Sabia, A. Camps, C. Gommenginger and M. Srokosz, "Retrieved sea surface salinity spatial variability using high resolution data within the soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission," 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007, pp. 1330-1333, doi: 10.1109/IGARSS.2007.4423051.

Y. Zhou, R. H. Lang, E. P. Dinnat and D. M. Le Vine, "Seawater Debye Model Function at L-Band and Its Impact on Salinity Retrieval From Aquarius Satellite Data," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 59, no. 10, pp. 8103-8116, Oct. 2021, doi: 10.1109/TGRS.2020.3045771

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.190

Downscaling estadístico de LST diurna y nocturna de MODIS. Evaluación e impacto en la detección de patrones espaciales de mortalidad relacionada al calor en adultos mayores

Olivares-Solís, Angelo Hernane [1] **Serra Ruiz, Pere** [1] **Meseguer-Ruiz, Oliver** [2]

[1] Universidad Autónoma de Barcelona, España

[2] Universidad de Tarapacá, Chile

ORCID: Olivares-Solís 0009-0003-6011-5993 Serra Ruiz 0000-0003-1023-5586 Meseguer-Ruiz 0000-0002-2222-6137

Correspondencia: AngeloHernaneAquile.Olivares@autonoma.cat pere.serra@uab.cat omeseguer@academicos.uta.cl

RESUMEN

La resolución espacial moderada de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) a menudo limita la detección satelital de asociaciones térmicas-sanitarias en entornos urbanos heterogéneos. Este estudio evalúa un downscaling estadístico de LST (100 m) respecto a MODIS (1 km) en 35 comunas de Santiago de Chile. Se seleccionaron cinco capítulos, según la Clasificación Internacional de Enfermedades, con evidencia bibliográfica de sensibilidad al calor extremo (cardiovasculares, respiratorias, endocrinas, renales y mentales). Sus defunciones (2017–2025) en adultos mayores ≥ 65 años se agregaron por comuna y se calculó su tasa de mortalidad específica por 10 mil habitantes. Se generaron cuatro productos LST (MODIS y downscaling, día/noche) y se compararon mediante la correlación de Pearson, y los Índices de Moran Univariado y Bivariado locales. Los resultados muestran que, durante el día, el downscaling supera consistentemente a MODIS: la correlación con la mortalidad aumenta de r=0,24 (p=0,163) a r=0,33 (p=0,052), acercándose al umbral de significancia estadística; el Moran bivariado incrementa de 0,215 a 0,220 y se duplican las comunas con alta significancia local (p<0,01). Además, identifica un nuevo clúster de alto riesgo en Conchalí, no detectada con MODIS LST. Durante la noche, el downscaling presenta una correlación superior (r=0,55; p<0,001) frente a MODIS (r=0,52; p=0,001), manteniendo la misma estructura de clústeres. Se concluye que el downscaling de LST a 100 m mejora la capacidad para detectar patrones de riesgo entre mortalidad y calor en entornos urbanos heterogéneos, validando el uso de la teledetección para estudios de salud pública y clima urbano.

Palabras clave: *Temperatura superficial terrestre, downscaling estadístico, mortalidad, Santiago de Chile*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Downscaling estadístico de LST diurna y nocturna de MODIS. Evaluación e impacto en la detección de patrones espaciales de mortalidad relacionada al calor en adultos mayores

Olivares-Solís, Angelo Hernane [(1)], Serra Ruiz, Pere [(1)], Meseguer-Ruiz, Oliver [(2)]

[(1)] Universidad Autónoma de Barcelona, España.

0009-0003-6011-5993, angelohernaneaquile.olivares@autonoma.cat

0000-0003-1023-5586, pere.serra@uab.cat

[(2)] Universidad de Tarapacá, Chile.

0000-0002-2222-6137, omeseguer@academicos.uta.cl

Resumen: La resolución espacial moderada de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) a menudo limita la detección satelital de asociaciones térmicas-sanitarias en entornos urbanos heterogéneos. Este estudio evalúa un *downscaling* estadístico de LST (100 m) respecto a MODIS (1 km) en 35 comunas de Santiago de Chile. Se seleccionaron cinco capítulos, según la Clasificación Internacional de Enfermedades, con evidencia bibliográfica de sensibilidad al calor extremo (cardiovasculares, respiratorias, endocrinas, renales y mentales). Sus defunciones (2017–2025) en adultos mayores ≥ 65 años se agregaron por comuna y se calculó su tasa de mortalidad específica por 10 mil habitantes. Se generaron cuatro productos LST (MODIS y *downscaling*, día/noche) y se compararon mediante la correlación de Pearson, y los Índices de Moran Univariado y Bivariado locales. Los resultados muestran que, durante el día, el *downscaling* supera consistentemente a MODIS: la correlación con la mortalidad aumenta de r=0,24 (p=0,163) a r=0,33 (p=0,052), acercándose al umbral de significancia estadística; el Moran bivariado incrementa de 0,215 a 0,220 y se duplican las comunas con alta significancia local (p<0,01). Además, identifica un nuevo clúster de alto riesgo en Conchalí, no detectada con MODIS LST. Durante la noche, el *downscaling* presenta una correlación superior (r=0,55; p<0,001) frente a MODIS (r=0,52; p=0,001), manteniendo la misma estructura de clústeres. Se concluye que el *downscaling* de LST a 100 m mejora la capacidad para detectar patrones de riesgo entre mortalidad y calor en entornos urbanos heterogéneos, validando el uso de la teledetección para estudios de salud pública y clima urbano.

Palabras clave: Temperatura superficial terrestre, *downscaling* estadístico, mortalidad, Santiago de Chile

Statistical downscaling of daytime and nighttime MODIS LST: Evaluation and impact on the detection of spatial patterns of heat-related mortality in older adults

***Abstract**: Moderate-resolution satellite Land Surface Temperature (LST) products are often insufficient to capture intra-urban thermal heterogeneity and its association with health outcomes. This study evaluates whether a statistical downscaling of LST (100 m) improves the detection of the association between land surface temperature and heat-sensitive mortality compared to the original MODIS product (1 km) in 35 urban communes of Santiago, Chile. Five ICD-10 chapters with documented heat sensitivity (cardiovascular, respiratory, endocrine, renal and mental) were selected; deaths (2017–2025) of adults older than 65 years were aggregated by commune and their specific death rate per 10000 inhabitants was calculated. Four thermal surfaces were generated (MODIS and downscaled, day/night) and compared through Pearson correlation, Univariate Moran's I and Bivariate Local Moran's I. Results show during daytime, downscaling consistently outperforms MODIS: the correlation with mortality rises from r=0.24 (p = 0.163) to r=0.33 (p = 0.052), approaching statistical significance; bivariate Moran increases from 0.215 to 0.220 and the number of communes with high local significance (p < 0.01) doubles. Furthermore, it identifies a new high-risk cluster in Conchalí, not detected by MODIS. At night, downscaling shows a higher correlation (r=0.55; p<0.001) compared to MODIS (r=0.52; p=0.001), maintaining the same cluster structure. It is concluded that LST downscaling at 100 m improves the capacity to detect heat-mortality risk patterns in heterogeneous urban environments, validating the use of remote sensing in public health and urban climate studies.*

***Keywords**: Land surface temperature, statistical downscaling, mortality, Santiago de Chile*

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de las temperaturas extremas en entornos urbanos representa un riesgo creciente para la salud, especialmente en adultos mayores, quienes presentan mayor vulnerabilidad debido a comorbilidades y a la menor capacidad de termorregulación (Navas-Martín *et al*., 2023). La heterogeneidad térmica urbana, determinada por la densidad de edificación, cobertura vegetal y superficies impermeables, genera islas de calor urbano (UHI) con temperaturas significativamente más altas que en áreas circundantes (Oke *et al*., 2017). Las técnicas de teledetección permiten caracterizar este calor urbano mediante datos de LST obtenidos de sensores como MODIS; sin embargo, su resolución espacial (~1 km) resulta insuficiente para captar heterogeneidades críticas para la salud, limitación que puede superarse mediante *downscaling* estadístico.

La validación de productos *downscaled* suele compararse con el original mediante métricas estadísticas convencionales, aunque esta aproximación presenta limitaciones que imposibilitan comparaciones *post-hoc* independientes (Manvailer y Hamann, 2024). Frente a ello, una estrategia complementaria consiste en evaluar el producto según su capacidad para detectar fenómenos del mundo real; en este caso, los registros comunales de mortalidad constituyen una fuente independiente y epidemiológicamente significativa que permite valorar si el aumento de resolución espacial mejora la detección de asociaciones térmico-sanitarias.

Este trabajo tiene como área de estudio las comunas urbanas de Santiago de Chile, ciudad de clima mediterráneo con marcada segregación socioespacial y una población adulta mayor en rápido crecimiento. Estudios previos han analizado la LST y la UHI en Santiago y su asociación con niveles socioeconómicos (Montaner-Fernández *et al*., 2020; Sarricolea *et al*., 2022), pero ninguno ha evaluado el rol de la resolución espacial de LST en la detección de patrones de mortalidad estival en poblaciones vulnerables.

¿Puede el *downscaling* estadístico de LST diurna y nocturna (100 m) mejorar la detección de la asociación espacial entre altas temperaturas y mortalidad en adultos mayores ≥65 años respecto a MODIS (1 km)? Nuestra hipótesis es que el *downscaling* mejorará la magnitud y significancia espacial de dicha asociación, cuantificable mediante correlación de Pearson, Índice de Moran y análisis *Local Indicator of Spatial Association* (LISA).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio comprende 35 comunas urbanas de Santiago, Región Metropolitana y capital de Chile (33°26'S, 70º39'O), situada en una cuenca flanqueada por la Cordillera de la Costa y los Andes, lo que favorece condiciones de inversión térmica y limitada ventilación. El clima es de tipo mediterráneo continental (Csb) caracterizado por inviernos suaves y lluviosos, y veranos secos y calurosos. La superficie total considerada es de 7.855,9 km², con una población de adultos mayores (≥65 años) de 974.084 habitantes según datos del Censo 2024 del Instituto Nacional de Estadísticas (INE).

2.2. Datos de población y mortalidad

2.2.1. Fuente de datos

Se obtuvieron datos de defunciones de adultos mayores (≥65 años) para el período 2017–2025, proporcionados por el Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS) del Ministerio de Salud de Chile. Los registros incluyen la comuna de residencia habitual, la fecha de defunción y la causa básica de muerte, codificada según la Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades (CIE-10), 10.ª revisión.

2.2.2. Selección de causas de defunciones

Se seleccionaron cinco capítulos CIE-10 con evidencia documentada de asociación aguda con el calor: enfermedades circulatorias (I00–I99), respiratorias (J00–J99), endocrinas (E00–E90), genitourinarias (N00–N99) y trastornos mentales (F00–F99).

2.2.3. Agregación y normalización

Para cada comuna, se sumaron las defunciones de los cinco capítulos seleccionados, obteniendo un conteo único de mortalidad agregada. Sobre esta variable, se calculó la tasa de mortalidad específica en adultos mayores (≥ 65 años) por 10.000 habitantes.

2.3. Datos LST y *downscaling*

2.3.1. MODIS original

Se utilizaron imágenes de los productos MODIS Terra (MOD11A1, ~10:30 h) y Aqua (MYD11A1, ~22:30 h), obtenidas mediante *Google Earth Engine (JavaScript)*, correspondientes a enero, febrero y diciembre de 2017–2025, con píxeles de calidad óptima (QC=0). Se calculó una media temporal única por píxel para día y noche respectivamente, obteniendo 175 imágenes válidas distribuidas según la Tabla 1.

Tabla 1. Número de imágenes MODIS válidas (QC=0) por año para los productos diurno (MOD11A1) y nocturno (MYD11A1).

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	Total
N° imágenes	19	20	19	20	19	19	20	20	19	175

2.3.2. *Downscaling* estadístico

Se aplicó un *downscaling* mediante *Random Forest* en *Google Earth Engine* con 3.000 puntos de entrenamiento distribuidos a distintos niveles de altura, 300 árboles y variables PerSplit=4. Para la LST diurna, los predictores espectrales derivados de Sentinel-2 fueron NDVI (vegetación), NDBI (área construida), NDSI (suelos áridos), NDWI (humedad en vegetación), MNDWI (cuerpos de agua) y albedo de banda ancha; los topográficos fueron altitud, pendiente, orientación norte, rugosidad y posición topográfica (NASADEM, 30 m).

Para la LST nocturna se sustituyeron MNDWI, albedo y las variables de pendiente, orientación, inercia térmica (diferencia LST diurna–nocturna MODIS), emisividad (banda Emis_31, MOD11A1) y posición en valle, todas ellas como variables relevantes para los procesos de enfriamiento radiativo nocturno. Las capas resultantes (100 m) se agregaron por comuna mediante promedio zonal.

2.4. Análisis estadístico

2.4.1. Correlación

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre la tasa de mortalidad específica y cada producto LST (MODIS día, *downscaling* día, MODIS noche, *downscaling* noche). La significancia estadística se evaluó con un nivel de confianza del 95% ($p \leq 0,05$).

2.4.2. Autocorrelación espacial univariada

Sobre los mismos productos LST, se caracterizó el patrón espacial de cada uno mediante el Índice de Moran Univariado y se identificaron clústeres locales con LISA. Todos los análisis de significancia basados en LISA univariado y bivariado se realizaron con 999 permutaciones ($p< 0,05$), empleando una matriz de vecindad de tipo Reina (*Queen*).

2.4.3. Autocorrelación espacial bivariada

Se aplicó el Índice de Moran Bivariado entre la tasa de mortalidad específica por comuna y el promedio la LST (día y noche), con análisis LISA bivariado clasificando los clústeres como Alto–Alto (HH), Bajo–Bajo (LL), Alto–Bajo (HL) y Bajo–Alto (LH).

El tratamiento de los datos se realizó en R y los análisis espaciales en GeoDa.

3. RESULTADOS

3.1. Evaluación del producto *downscaling*

La comparación entre el producto LST *downscaled* (100 m) y MODIS LST (1 km), mediante reagregación espacial a 1 km, muestra una alta concordancia en día y noche. Durante el día, el *downscaling* alcanzó un $R^2 = 0,82$, un error RMSE de 0,98 °C y un sesgo prácticamente nulo (Bias = 0,02 °C). Por la noche, la concordancia fue aún mayor ($R^2 = 0,90$), con errores más bajos (RMSE = 0,295 °C; MAE = 0,22 °C) y un sesgo despreciable (Bias = 0,007 °C). Estos valores confirman que el *downscaling* reproduce fielmente la estructura térmica original, constituyendo una base sólida para los análisis comparativos posteriores.

3.2. Patrones espaciales univariado de las LST

3.2.1. LST diurna

El análisis univariado de LST mostró diferencias sustantivas entre el producto *downscaled* y MODIS. En la Tabla 2, se puede observar que el primero mejoró sustancialmente la detección del patrón térmico diurno, con un Moran *I*= 0,697 ($p< 0,001$). Se identificaron nueve clústeres de HH: Renca, Cerro Navia, Quinta Normal, Estación Central, Santiago, Pudahuel, Pedro Aguirre Cerda, Conchalí y Lo Prado; y seis clústeres de LL correspondientes a Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, Providencia, la Reina, y Puente Alto. La significancia local aumentó: ocho comunas con $p< 0,05$, cuatro con $p< 0,01$ y tres con $p< 0,001$.

Tabla 2. Comparación de Moran I univariado y bivariado entre MODIS (1 km) y *downscaling* (100 m).

Período	Producto	Moran *I* (Univ.)	*p*	Moran *I* (Biv.)	*p*
Día	1 km	0,542	0,001	0,215	0,004
	100 m	0,697	0,001	0,220	0,004
Noche	1 km	0,560	0,001	0,138	0,045
	100 m	0,526	0,001	0,136	0,046

3.2.2. LST nocturna

Durante la noche, el comportamiento fue diferente, el *downscaling* presentó un Moran *I*= 0,526 ($p< 0,001$), ligeramente inferior al de MODIS (Tabla 2). Ambos productos identificaron los mismos seis clústeres de HH (Vitacura, Recoleta, Santiago, Providencia, Ñuñoa y La Reina). Sin embargo, el *downscaling* incorpora San Bernardo como un nuevo clúster LL, junto a Puente Alto, La Pintana y El Bosque. La significancia local fue comparable entre ambos, con una ligera mejora del *downscaling* en el número de comunas con $p< 0,05$.

Estos resultados indican que el producto LST *downscaling* aumenta la capacidad de detectar heterogeneidad térmica intraurbana durante el día, mientras que en la noche conserva la estructura espacial del producto original y la refina mediante la incorporación de un nuevo clúster frío (San Bernardo).

3.3. Correlación entre mortalidad y LST

3.3.1. Correlación diurna

La correlación con la LST *downscaled* ($r= 0,33$; $p= 0,052$) fue superior a la obtenida con MODIS LST ($r= 0,24$; $p= 0,163$), acercándose al umbral de significancia estadística.

3.3.2. Correlación nocturna

Ambos productos mostraron correlaciones altas y altamente significativas. MODIS LST 1 km alcanzó $r= 0,52$ ($p= 0,00145$), mientras que el *downscaling* LST 100 m obtuvo un coeficiente superior ($r= 0,55$; $p= 0,00054$). El *downscaling* nocturno no degrada la señal térmica y mantiene una asociación robusta con la mortalidad.

3.4. Patrones espaciales bivariados

3.4.1. Mortalidad y LST MODIS 1km (día)

Con un Moran *I*= 0,215 ($p= 0,004$), se identificaron cuatro clústeres HH: Cerro Navia, Quinta Normal, Pedro Aguirre Cerda y San Miguel. Los clústeres de LL fueron cinco: Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, La Reina y Puente Alto. La significancia local alcanzó 10 comunas con $p< 0,05$, dos con $p< 0,01$ y ninguna con $p< 0,001$.

3.4.2. Mortalidad y LST *Downscaling* 100 m (día)

Se obtuvo un Moran *I*= 0,220 ($p= 0,004$), superando al producto MODIS LST. Los clústeres HH se mantuvieron en cuatro, pero con una composición espacialmente más relevante: Conchalí, Cerro Navia, Quinta Normal y Pedro Aguirre Cerda, sustituyendo a San Miguel por Conchalí, comuna que presenta una de las mayores densidades de

población adulta mayor en Santiago (Figura 1a). Los clústeres LL se mantuvieron en cinco (Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, La Reina y Puente Alto). La mejora más relevante se observó en la significancia local: ocho comunas con $p< 0,05$, cuatro con $p< 0,01$ y tres con $p< 0,001$.

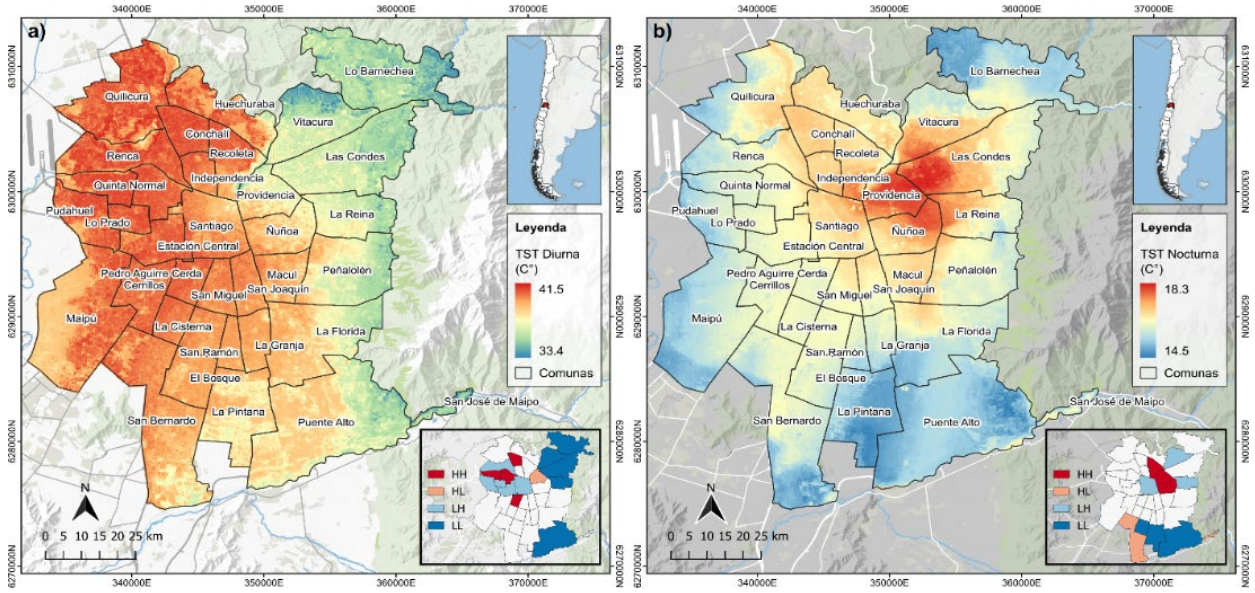


Figura 1. LST *downscaled* diurna (a) y nocturna (b) y sus respectivos clústeres bivariados con la tasa de mortalidad.

3.4.3. Mortalidad y LST MODIS 1km (noche)

Con un Moran *I*= 0,138 (p= 0,045), se identificaron tres clústeres HH: Recoleta, Providencia y Ñuñoa, y otros tres clústeres LL: Puente Alto, La Pintana y El Bosque. La significancia local mostró tres comunas con $p< 0,05$, tres con $p< 0,01$ y tres con $p< 0,001$.

3.4.4. Mortalidad y LST *Downscaling* 100 m (noche)

Por último, con un Moran *I*= 0,136 (p= 0,046), prácticamente idéntico al producto LST de MODIS. Los clústeres HH se mantuvieron en las mismas tres comunas (Recoleta, Providencia, Ñuñoa) y los clústeres LL también se conservaron (Figura 1b). Se observó un ligero aumento en la significancia local (cuatro comunas con $p< 0,05$ frente a tres en MODIS), manteniéndose tres comunas con $p< 0,01$ y 3 con $p< 0,001$. En conjunto, el *downscaling* nocturno presenta un desempeño equivalente o ligeramente superior a MODIS en términos de significancia local.

4. CONCLUSIONES

El *downscaling* LST (100 m) supera a MODIS (1 km) en la detección de patrones térmico-sanitarios en Santiago. Durante el día, mejora la correlación con mortalidad (r=0,33 vs r=0,24) rozando la significancia estadística, identifica un nuevo clúster de alto riesgo en Conchalí y duplica las comunas con alta significancia local (p<0,01). En la noche, conserva la estructura de clústeres con desempeño equivalente a MODIS, incorporando San Bernardo como nuevo clúster frío. Estos hallazgos evidencian el potencial de la teledetección y sus técnicas de *downscaling* como herramientas valiosas para la vigilancia epidemiológica del calor en ciudades con alta heterogeneidad térmica y socioespacial.

5. REFERENCIAS

Manvailer, V., y Hamann, A. (2024). Validation of global precipitation time series products against tree ring records and remotely sensed vegetation greenness. PLoS ONE, 19(2), e0299111. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299111

Montaner-Fernández, D., Morales-Salinas, L., Rodriguez, J. S., Cárdenas-Jirón, L., Huete, A., Fuentes-Jaque, G., Pérez-Martínez, W., & Cabezas, J. (2020). Spatio-Temporal Variation of the Urban Heat Island in Santiago, Chile during Summers 2005–2017. *Remote Sensing*, *12*(20), 3345. https://doi.org/10.3390/rs12203345

Navas-Martín, M. Á., López-Bueno, J. A., Ascaso-Sánchez, M. S., Follos, F., Vellón, J. M., Mirón, I. J., Luna, M. Y., Sánchez-Martínez, G., Linares, C., & Díaz, J. (2023). Heat Adaptation among the Elderly in Spain (1983–2018). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(2), 1314. https://doi.org/10.3390/ijerph20021314

Núñez-Rodríguez, S., Collazo-Riobó, C., Sedano, J., Sánchez-Iglesias, A. I., & González-Santos, J. (2025). Heat Tolerance in Older Adults: A Systematic Review of Thermoregulation, Vulnerability, Environmental Change, and Health Outcomes. *Healthcare*, *13*(21), 2785. https://doi.org/10.3390/healthcare13212785

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). Urban Climates. En Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781139016476

Sarricolea, P., Smith, P., Romero-Aravena, H., Serrano-Notivoli, R., Fuentealba, M., & Meseguer-Ruiz, O., 2022. Socioeconomic inequalities and the surface heat island distribution in Santiago, Chile. *Sci. Total Environ,* *832*, 155152 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155152

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.227

Evaluación de variables radar para la discriminación de daños agrícolas por granizo

Molina Jiménez, Barbara Beatriz [1] **Álvarez Mozos, Jesús** [1] **González de Audícana Amenábar, María** [1]

[1] Institute for Sustainability & Food Chain Innovation (IS-FOOD), Dpto. Ingeniería, Universidad Pública de Navarra

ORCID: Molina Jiménez 0000-0003-2662-1414 Álvarez Mozos 0000-0002-6518-2533 González de Audícana Amenábar 0000-0002-2430-3853

Correspondencia: barbarabeatriz.molina@unavarra.es jesus.alvarez@unavarra.es maria.audicana@unavarra.es

RESUMEN

Este trabajo evalúa la capacidad de variables derivadas de radares meteorológicos para discriminar parcelas agrícolas con y sin daño por episodios de granizo. El estudio se centra en la zona oriental de la Península Ibérica y utiliza datos de los radares de Murcia y Zaragoza correspondientes al año 2022. Para ese año se dispone de una base de datos de parcelas afectadas por eventos de granizo y de otras no afectadas, que incluye cultivo, fecha de siembra, fecha del episodio y el porcentaje de daño tasado en campo. Para generar un conjunto de datos balanceado se seleccionó, para cada parcela dañada con un nivel de daño >20%, una parcela sin daño del mismo cultivo, con fecha de siembra similar (±7 días) y situadas entre 5 y 10 km. Para dichas parcelas, se extrajeron los datos de reflectividad radar y de precipitación correspondientes al día del daño. A partir de ellos se derivaron las variables: reflectividad máxima en 24h (Z_max), precipitación acumulada en 24h (P_acum), precipitación máxima horaria en 24h (P_max) y energía cinética del granizo acumulada en 24h (E_cG), calculada a partir de la integración temporal de la reflectividad. La capacidad de discriminación se evaluó mediante curvas ROC y el índice de Youden, que permitió determinar umbrales operativos óptimos. A nivel global, Z_max y E_cG mostraron la mayor capacidad discriminativa (AUC = 0,70), mientras que P_max (AUC = 0,65) y P_acum (AUC = 0,62) presentaron menor rendimiento. El análisis por cultivo evidenció variabilidad en la respuesta, con valores elevados del índice de Youden en cultivos como melón, calabaza, pimiento o cebolla, y menor capacidad discriminativa en otros como lechuga. Los resultados indican que las variables basadas en la reflectividad presentan mayor consistencia para identificar daño por granizo y que el índice de Youden constituye una herramienta útil para definir umbrales operativos reproducibles a partir de datos radar.

Palabras clave: *Radar meteorológico, reflectividad, granizo, umbral, índice de Youden.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación de variables radar para la discriminación de daños agrícolas por granizo

Molina Jiménez, Barbara Beatriz [(1)], Álvarez Mozos, Jesús [(1)], González de Audícana Amenábar, María [(1)]

[(1)] Institute for Sustainability & Food Chain Innovation (IS-FOOD), Dpto. Ingeniería, Universidad Pública de Navarra.

0000-0003-2662-1414, barbarabeatriz.molina@unavarra.es.

0000-0002-6518-2533, jesus.alvarez@unavarra.es.

0000-0002-2430-3853, maria.audicana@unavarra.es.

Resumen: Este trabajo evalúa la capacidad de variables derivadas de radares meteorológicos para discriminar parcelas agrícolas con y sin daño por episodios de granizo. El estudio se centra en la zona oriental de la Península Ibérica y utiliza datos de los radares de Murcia y Zaragoza correspondientes al año 2022. Para ese año se dispone de una base de datos de parcelas afectadas por eventos de granizo y de otras no afectadas, que incluye cultivo, fecha de siembra, fecha del episodio y el porcentaje de daño tasado en campo. Para generar un conjunto de datos balanceado se seleccionó, para cada parcela dañada con un nivel de daño >20%, una parcela sin daño del mismo cultivo, con fecha de siembra similar (±7 días) y situadas entre 5 y 10 km. Para dichas parcelas, se extrajeron los datos de reflectividad radar y de precipitación correspondientes al día del daño. A partir de ellos se derivaron las variables: reflectividad máxima en 24h (Z_{max}), precipitación acumulada en 24h (P_{acum}), precipitación máxima horaria en 24h (P_{max}) y energía cinética del granizo acumulada en 24h (E_{cG}), calculada a partir de la integración temporal de la reflectividad. La capacidad de discriminación se evaluó mediante curvas ROC y el índice de Youden, que permitió determinar umbrales operativos óptimos. A nivel global, Z_{max} y E_{cG} mostraron la mayor capacidad discriminativa (AUC = 0,70), mientras que P_{max} (AUC = 0,65) y P_{acum} (AUC = 0,62) presentaron menor rendimiento. El análisis por cultivo evidenció variabilidad en la respuesta, con valores elevados del índice de Youden en cultivos como melón, calabaza, pimiento o cebolla, y menor capacidad discriminativa en otros como lechuga. Los resultados indican que las variables basadas en la reflectividad presentan mayor consistencia para identificar daño por granizo y que el índice de Youden constituye una herramienta útil para definir umbrales operativos reproducibles a partir de datos radar.

Palabras clave: Radar meteorológico, reflectividad, granizo, umbral, índice de Youden.

Evaluation of radar-derived variables for the discrimination of agricultural damage caused by hail

***Abstract**:This study evaluates the ability of variables derived from weather radars to discriminate agricultural parcels with and without damage from hail events. The study focuses on the eastern area of the Iberian Peninsula and uses data from the Murcia and Zaragoza radars corresponding to the year 2022. For that year, a database is available of parcels affected by hail events and other unaffected parcels, which includes crop type, sowing date, date of the event, and the percentage of damage assessed in the field. To generate a balanced dataset, for each damaged parcel with a damage level >20%, an undamaged parcel of the same crop was selected, with a similar sowing date (±7 days) and located between 5 and 10 km away. For these parcels, radar reflectivity and precipitation data corresponding to the day of the damage were extracted. From these, the following variables were derived: maximum reflectivity in 24 h (Z_{max}), accumulated precipitation in 24 h (P_{acum}), maximum hourly precipitation in 24 h (P_{max}), and accumulated hail kinetic energy in 24 h (E_{cG}), calculated from the temporal integration of reflectivity. Discriminatory ability was evaluated using ROC curves and the Youden index, which allowed optimal operational thresholds to be determined. Overall, Z_{max} and E_{cG} showed the highest discriminatory ability (AUC = 0.70), whereas P_{max} (AUC = 0.65) and P_{acum} (AUC = 0.62) showed lower performance. The crop-specific analysis evidenced variability in the response, with high Youden index values in crops such as melon, pumpkin, pepper, or onion, and lower discriminatory ability in others such as lettuce. The results indicate that reflectivity-based variables show greater consistency for identifying hail*

damage and that the Youden index is a useful tool for defining reproducible operational thresholds from radar data.

***Keywords**: Weather radar, reflectivity, hail, threshold, Youden index.*

1. INTRODUCCIÓN

El granizo constituye uno de los fenómenos meteorológicos con mayor impacto en el sector agrícola, afectando tanto a la cantidad como a la calidad de la producción de diversos cultivos. Estas tormentas se originan en sistemas convectivos de fuerte desarrollo vertical, donde las corrientes ascendentes favorecen la formación de partículas de hielo que, al superar la capacidad de sustentación, precipitan en forma de granizo o pedrisco. En el contexto actual de cambio climático, la evidencia científica señala un incremento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos (WMO, 2025), con efectos significativos sobre la producción agrícola (FAO, 2025; van Tilburg & Hudson, 2022). En España, las tormentas de pedrisco representan de forma recurrente uno de los riesgos más costosos para el sector agrario, con indemnizaciones que superan los 200 millones de euros en algunos años y cifras récord recientes de 804 millones de euros en 2025 (Agroseguro, 2026).

Los daños dependen de la intensidad del episodio y del estado fenológico del cultivo, pudiendo provocar pérdidas directas de producción y deterioro de la calidad comercial. Sin embargo, la intensidad del fenómeno no siempre se correlaciona de manera directa con el daño final, existiendo una notable variabilidad espacial y específica del cultivo (Schmitt *et al*., 2022).

En este contexto, las redes de radares meteorológicos permiten caracterizar de forma sistemática la intensidad de los episodios convectivos mediante variables como la reflectividad, las estimaciones de precipitación o parámetros físicos asociados a la energía del hidrometeoro. No obstante, la relación entre estas variables y el daño observado requiere una evaluación cuantitativa. Herramientas como las curvas de Característica Operativa del Receptor (ROC del inglés Receiver Operating Characteristic) o el índice de Youden proporcionan un marco estadístico objetivo para comparar variables y definir umbrales operativos reproducibles.

El objetivo de este trabajo es comparar distintas variables derivadas de las imágenes diezminutales de reflectividad y horarias de precipitación de los radares meteorológicos de AEMET con el fin de identificar cuáles presentan mayor capacidad para discriminar parcelas agrícolas con o sin daños por granizo y establecer umbrales óptimos de discriminación para distintos cultivos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y datos radar

Este estudio se realizó para el año 2022, en la zona oriental de la Península Ibérica, utilizando datos de los radares meteorológicos de Murcia (MU) y Zaragoza (ZA). Se utilizaron imágenes de radar de reflectividad y precipitación correspondientes a productos operativos distribuidos por AEMET. Las imágenes se procesaron y georreferenciaron para obtener campos cuantitativos en formato raster. A partir de estas imágenes se generaron series temporales completas de 24 horas, considerando únicamente aquellos días para los que se disponía de la totalidad de las imágenes necesarias.

Las variables analizadas fueron la reflectividad máxima en 24 h (Z_{max}), la precipitación acumulada en 24 h (P_{acum}), la precipitación máxima horaria en 24 h (P_{max}) y la energía cinética del granizo acumulada en 24 h (E_{cG}). Z_{max} se definió como el valor máximo de reflectividad en el píxel central de la parcela considerando las 144 imágenes diezminutales del día; P_{acum} como la suma de las estimaciones de precipitación horarias; y P_{max} como el mayor valor horario registrado en un día. La energía cinética del granizo (E_{cG}) se estimó a partir de la reflectividad lineal utilizando la relación empírica propuesta por Waldvogel *et al*. (1978), donde la tasa instantánea de flujo de energía cinética viene dada por (Eq. 1):

$$\dot{E} = 5x10^{-6}z^{0.84} \quad (1)$$

siendo z la reflectividad en unidades lineales (mm^6mm^{-3}) y $\dot{E}$ la energía cinética instantánea expresada en $Jm^{-2}s^{-1}$. La energía diaria acumulada se obtuvo mediante la integración temporal de todos los intervalos diezminutales del día (Eq. 2).

$$E = \int_{t_0}^{t_1} \dot{E}(t)dt \quad (2)$$

2.2. Datos de campo

Para el año 2022 se dispone de una base de datos de parcelas afectadas y no afectadas por episodios de granizo, que incluye además del cultivo y su fecha de siembra, la fecha de ocurrencia del episodio y el porcentaje de daño tasado en campo. Con el fin de generar un conjunto de datos balanceado entre parcelas dañadas y no dañadas se seleccionó, para cada parcela con un nivel de daño superior al 20%, una parcela sin daño del mismo cultivo, con fecha de siembra similar (±7 días) y situada a una distancia entre 5 y 10 km. En total, se trabajó con un conjunto de 613 pares de parcelas.

Para cada par (daño/no daño), se extrajeron los datos de reflectividad de las imágenes diezminutales y los datos horarios de precipitación del radar meteorológico correspondientes al día de ocurrencia del granizo, y se calcularon las variables mencionadas en el apartado anterior.

2.3. Evaluación estadística

La capacidad discriminativa de cada variable se evaluó mediante curvas ROC, utilizándose el área bajo la curva (AUC) como medida global de rendimiento, donde un

valor de 1 indica una discriminación perfecta (Zweig & Campbell, 1993).

El umbral óptimo de discriminación daño/no daño se determinó, para cada variable, mediante el índice de Youden (Youden, 1950), definido en la Ecuación (3).

$$J = Sensibilidad + Especificidad - 1 \quad (3)$$

donde la Sensibilidad representa la proporción de parcelas dañadas correctamente identificadas y la Especificidad la proporción de parcelas no dañadas correctamente identificadas. El valor de corte que maximiza J se consideró el umbral operativo óptimo, ya que corresponde a la distancia vertical máxima entre la curva ROC y la línea diagonal. El análisis se realizó tanto a nivel global como por cultivo, garantizando la estabilidad de los resultados.

3. RESULTADOS

3.1. Comparación global de variables

La Figura 1 presenta la distribución espacial de las variables obtenidas a partir de campos de reflectividad y precipitación estimados por radar para el día 1 de enero.

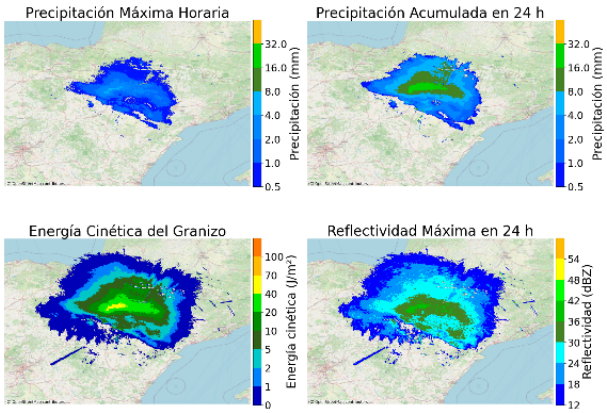


Figura 1. Mapas de variables radar derivadas de un episodio de granizo de ejemplo: (a) P_{max}, (b) P_{acum}, (c) E_{cG} y (d) Z_{max}.

En la Tabla 1 se muestran los resultados globales de las variables radar en la discriminación de daño por granizo, incluyendo para cada variable el umbral óptimo estimado, el índice de Youden y el AUC de las curvas ROC como métricas de rendimiento.

Tabla 1. Resultados globales de las variables radar en la discriminación de daño por granizo (año 2022).

Variable	Umbral	Youden	AUC	Nº pares
E_{cG}	50,66 J/m²	0,34	0,70	613
Z_{max}	48 dBZ	0,30	0,70	613
P_{max}	16 mm	0,25	0,65	498
P_{acum}	12,5 mm	0,35	0,62	498

El índice de Youden permitió determinar los umbrales operativos óptimos para cada variable (Tabla 1). En el caso de Z_{max}, el umbral óptimo fue 48 dBZ (Youden = 0,30), mientras que para E_{cG} se obtuvo un valor de 50,66 J/m² (Youden = 0,34). Las variables de precipitación mostraron umbrales de 16 mm para P_{max} (Youden = 0,25) y 12,5 mm para P_{acum} (Youden = 0,35).

Aunque P_{acum} presentó el mayor valor puntual del índice de Youden (0,35), su capacidad discriminativa global fue inferior (AUC = 0,62) frente al 0,70 obtenido por Z_{max} y E_{cG}. Esto indica que, si bien puede definirse un punto de corte relativamente equilibrado para P_{acum}, la separación global entre parcelas dañadas y no dañadas es más consistente cuando se emplean variables derivadas de reflectividad. Las curvas ROC (Figura 2) muestran que Z_{max} y E_{cG} presentan un comportamiento muy similar, superior al de las variables de precipitación en la mayor parte del rango de umbrales. P_{max} alcanza un rendimiento intermedio (AUC = 0,65), mientras que P_{acum} muestra la menor capacidad discriminativa global.

En conjunto, los resultados muestran que las variables basadas en reflectividad capturan de forma más robusta la intensidad física de los episodios asociados a daño por granizo que las variables basadas exclusivamente en precipitación acumulada u horaria.

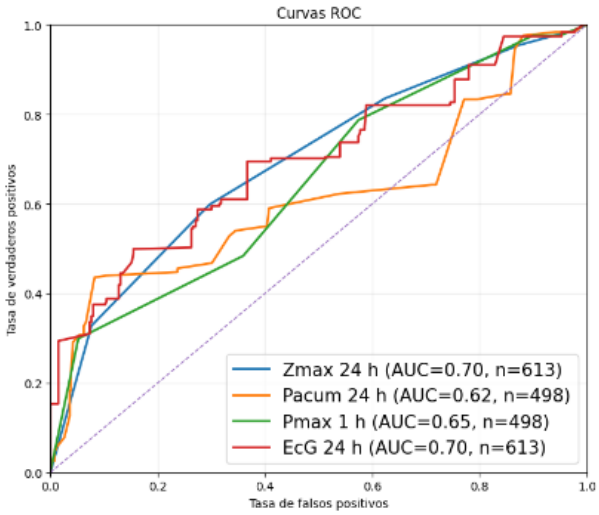


Figura 2. Curvas ROC comparadas de las variables radar para la discriminación de daño por granizo (año 2022).

3.2. Análisis por cultivo

El análisis por cultivo evidenció variabilidad en la capacidad discriminativa de las variables radar (Fig. 3 y 4). En el caso de las variables basadas en reflectividad, tanto Z_{max} como E_{cG} mostraron valores elevados del índice de Youden en cultivos como melón, calabaza, pimiento o brócoli, mientras que en cultivos como lechuga la capacidad discriminativa fue notablemente menor.

La comparación entre Z_{max} y E_{cG} indica que, aunque ambas variables presentan un rendimiento global similar, E_{cG} alcanza valores ligeramente superiores del índice de Youden en determinados cultivos, lo que sugiere que la integración temporal de la energía cinética del granizo puede aportar información adicional respecto al uso exclusivo de la reflectividad máxima.

En el grupo de variables de precipitación, P_{max} y P_{acum} mostraron comportamientos similares, con capacidad discriminativa moderada en algunos cultivos específicos y menor rendimiento en otros. En general, su capacidad de discriminación fue inferior a la observada en las variables basadas en reflectividad.

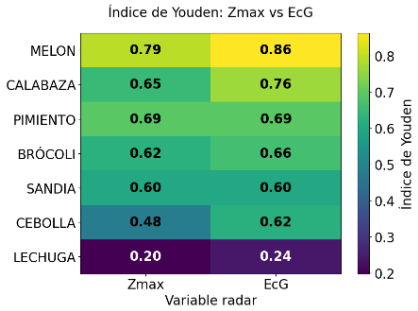


Figura 3. Índice de Youden por cultivo para reflectividad máxima y energía cinética del granizo (2022).

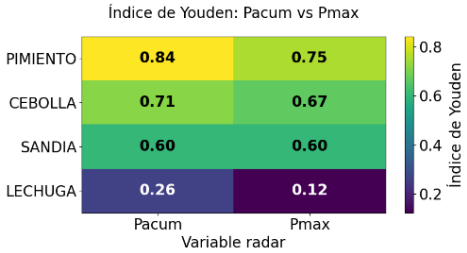


Figura 4. Índice de Youden por cultivo para precipitación acumulada y precipitación máxima horaria (2022).

Estos resultados reflejan que la respuesta al granizo no es homogénea entre cultivos y que la utilidad de cada variable radar puede variar en función del tipo de cultivo analizado.

4. CONCLUSIONES

El análisis realizado para el año 2022 muestra que las variables derivadas de imágenes de reflectividad de radar meteorológico presentan mayor consistencia en la discriminación de daños agrícolas por granizo que las variables basadas exclusivamente en estimaciones de precipitación.

A nivel global, tanto la reflectividad máxima en 24 h (Z_{max}) como la energía cinética del granizo acumulada en 24 h (E_{cG}) alcanzaron valores de AUC de 0,70, superiores a los obtenidos para la precipitación máxima horaria (0,65) y la precipitación acumulada diaria (0,62). Si bien P_{acum} alcanzó el mayor índice de Youden en el umbral óptimo, su menor AUC evidencia que su poder de separación global entre parcelas dañadas y no dañadas es menor. Por tanto, la selección de la variable no debe basarse únicamente en el valor máximo de Youden, sino en su comportamiento discriminativo global.

El uso del índice de Youden permitió definir umbrales operativos objetivos para cada variable, como 48 dBZ para Z_{max} y 50,66 J/m² para E_{cG}, facilitando su posible aplicación en contextos operativos o de análisis de riesgo. El análisis por cultivo evidenció variabilidad en la respuesta, observándose valores elevados del índice de Youden en cultivos como melón, calabaza o pimiento y menor capacidad discriminativa en otros como lechuga. En varios cultivos, E_{cG} presentó valores ligeramente superiores a Z_{max}, lo que apunta a que la consideración de la evolución temporal de la reflectividad puede mejorar la caracterización del episodio respecto al uso exclusivo del valor máximo.

En conjunto, los resultados confirman que las variables basadas en reflectividad constituyen una herramienta más consistente para la identificación de daño por granizo a partir de datos de radar meteorológico y que el índice de Youden constituye un parámetro adecuado para la definición de umbrales reproducibles.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por Agroseguro mediante el contrato OTRI 2024904260 y por el proyecto DAMAGE (PID2023-152885OBI00 financiado por MCIU/AEI/10 13039 501100011033/UE).

6. REFERENCIAS

Agroseguro. (2026, January 28). La siniestralidad del seguro agrario crece un 15% en 2025 y se eleva hasta los 804 millones de euros. https://agroseguro.es/la-siniestralidad-del-seguro-agrario-crece-un-15-en-2025-y-se-eleva-hasta-los-804-millones-de-euros/

FAO. (2025). Climate change adaptation and mitigation | Modules | SFM Toolbox | Food and Agriculture Organization of the United Nations. SFM-Toolbox. https://www.fao.org/home/es

Schmitt, J., Offermann, F., Söder, M., Frühauf, C., & Finger, R. (2022). Extreme weather events cause significant crop yield losses at the farm level in German agriculture. *Food Policy, 112,* 102359. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2022.102359

van Tilburg, A. J., & Hudson, P. F. (2022). Extreme weather events and farmer adaptation in Zeeland, the Netherlands: A European climate change case study from the Rhine delta. *Science of The Total Environment, 844,* 157212. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157212

Waldvogel, A., Schmid, W., & Federer, B. (1978). The Kinetic Energy of Hailfalls. Part I: Hailstone Spectra. *Journal of Applied Meteorology, 17*(4), 515–520.

WMO. (2025). WMO report documents spiralling weather and climate impacts. World Meteorological Organization. https://wmo.int/news/media-centre/wmo-report-documents-spiralling-weather-and-climate-impacts

Youden, W. J. (1950). Index for rating diagnostic tests. *Cancer, 3*(1), 32–35. https://doi.org/10.1002/1097-0142(1950)3:1<32::AID-CNCR2820030106>3.0.CO;2-3

Zweig, M. H., & Campbell, G. (1993). Receiver-operating characteristic (ROC) plots: A fundamental evaluation tool in clinical medicine. *Clinical Chemistry, 39*(4), 561–577.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.235

Modelización y atribución de la dinámica vegetación-clima a escala global mediante inteligencia artificial explicable

García Díaz, Daniel [1,2] **Aguilar Gómez, Fernando** [2] **A. Schauman, Santiago** [3,1] **Verger, Aleixandre** [1,3]

[1] Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE)

[2] Instituto de Física de Cantabria (IFCA)

[3] Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF)

ORCID: García Díaz 0000-0002-3399-1598 Aguilar Gómez 0000-0001-9462-4831 Verger 0000-0001-9374-1745

Correspondencia: garciad@ifca.unican.es aguilarf@ifca.unican.es santischauman@gmail.com verger@csic.es

RESUMEN

Comprender la respuesta de la vegetación a la variabilidad y al cambio climático es esencial para evaluar la dinámica de los ecosistemas a escala global. El índice de área foliar (LAI), derivado de series temporales satelitales de larga duración, constituye un indicador clave de la vegetación; sin embargo, atribuir sus variaciones a forzamientos climáticos específicos sigue siendo complejo debido a la no linealidad de las interacciones, la heterogeneidad espacial y la multicolinealidad entre variables ambientales. En este estudio se desarrolla un marco metodológico escalable a nivel global para analizar las relaciones vegetación-clima a partir de la evolución del producto GEOV2-AVHRR LAI durante el periodo 1982–2022 y su relación con variables climáticas derivadas del reanálisis ERA5. Como caso ilustrativo, se presentan resultados para el dominio de América, donde se analiza la sensibilidad del LAI frente a indicadores de disponibilidad hídrica, incluyendo la humedad del suelo. Las relaciones vegetación-clima se modelizan mediante algoritmos no lineales basados en árboles, como Random Forest y Gradient Boosting, e incorporando técnicas de inteligencia artificial explicable (XAI), como SHAP y análisis de dependencia parcial, para cuantificar la contribución de los predictores climáticos y estimar sensibilidades comparables entre modelos y regiones. Los resultados muestran una alta consistencia espacial entre algoritmos, lo que refuerza la robustez de las sensibilidades estimadas y su interpretación física. El enfoque propuesto proporciona un marco reproducible y extensible para el análisis de las interacciones vegetación-clima a gran escala.

Palabras clave: *Índice de área foliar (LAI); Sensibilidad climática; Aprendizaje automático; Inteligencia artificial explicable; Cambio climático*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Modelización y atribución de la dinámica vegetación-clima a escala global mediante inteligencia artificial explicable

García-Diaz, Daniel [1,2], Aguilar Gómez, Fernando [2], Schauman, Santiago A. [3,1], Verger, Aleixandre [1,3]

[1] Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE).
0000-0002-3399-1598, garciad@ifca.es
0000-0001-9374-1745, verger@csic.es.

[2] Instituto de Física de Cantabria.
0000-0001-9462-4831, aguilarf@ifca.es.

[3] Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF).
santischauman@gmail.com

Resumen: Comprender la respuesta de la vegetación a la variabilidad y al cambio climático es esencial para evaluar la dinámica de los ecosistemas a escala global. El índice de área foliar (LAI), derivado de series temporales satelitales de larga duración, constituye un indicador clave de la vegetación; sin embargo, atribuir sus variaciones a forzamientos climáticos específicos sigue siendo complejo debido a la no linealidad de las interacciones, la heterogeneidad espacial y la multicolinealidad entre variables ambientales. En este estudio se desarrolla un marco metodológico escalable a nivel global para analizar las relaciones vegetación-clima a partir de la evolución del producto GEOV2-AVHRR LAI durante el periodo 1982–2022 y su relación con variables climáticas derivadas del reanálisis ERA5. Como caso ilustrativo, se presentan resultados para el dominio de América, donde se analiza la sensibilidad del LAI frente a indicadores de disponibilidad hídrica, incluyendo la humedad del suelo. Las relaciones vegetación-clima se modelizan mediante algoritmos no lineales basados en árboles, como Random Forest y Gradient Boosting, e incorporando técnicas de inteligencia artificial explicable (XAI), como SHAP y análisis de dependencia parcial, para cuantificar la contribución de los predictores climáticos y estimar sensibilidades comparables entre modelos y regiones. Los resultados muestran una alta consistencia espacial entre algoritmos, lo que refuerza la robustez de las sensibilidades estimadas y su interpretación física. El enfoque propuesto proporciona un marco reproducible y extensible para el análisis de las interacciones vegetación-clima a gran escala.

Palabras clave: Índice de área foliar (LAI); Sensibilidad climática; Aprendizaje automático; Inteligencia artificial explicable; Cambio climático

Modelling and Attribution of Global Vegetation-Climate Dynamics Using Explainable Artificial Intelligence

***Abstract**: Understanding vegetation responses to climate variability and climate change is essential for assessing ecosystem dynamics at the global scale. The Leaf Area Index (LAI), derived from long-term satellite time series, constitutes a key indicator of vegetation; however, attributing its variations to specific climatic forcings remains challenging due to the nonlinearity of interactions, spatial heterogeneity, and multicollinearity among environmental variables. In this study, a globally scalable methodological framework is developed to analyse vegetation–climate relationships based on the evolution of the GEOV2-AVHRR LAI product over the period 1982–2022 and its relationship with climatic variables derived from the ERA5 reanalysis. As an illustrative case, results are presented for the domain of the Americas, where LAI sensitivity to indicators of water availability, including soil moisture, is analysed. Vegetation–climate relationships are modelled using nonlinear tree-based algorithms, such as Random Forest and Gradient Boosting, incorporating explainable artificial intelligence (XAI) techniques, including SHAP and partial dependence analysis, to quantify the contribution of climatic predictors and estimate sensitivities comparable across models and regions. The results show high spatial consistency among algorithms, reinforcing the robustness of the estimated sensitivities and their physical interpretation. The proposed approach provides a reproducible and extensible framework for analysing vegetation–climate interactions at large spatial scales.*

***Keywords**: Leaf Area Index (LAI); Climate sensitivity; Machine learning; Explainable artificial intelligence (XAI); Climate change*

1. INTRODUCCIÓN

La vegetación terrestre desempeña un papel clave en la regulación del sistema climático al controlar los flujos de carbono, agua y energía entre la superficie y la atmósfera. El índice de área foliar (Leaf Area Index, LAI) constituye uno de los indicadores biofísicos más robustos de la vegetación, estrechamente vinculado a la fotosíntesis y la productividad primaria. El desarrollo de productos satelitales de larga duración y alta consistencia temporal, como GEOV2-AVHRR (Verger *et al*., 2023), permite analizar la dinámica de la vegetación a escala global durante las últimas cuatro décadas.

Durante este periodo se ha documentado un fenómeno generalizado de reverdecimiento a escala global (Zhu *et al*., 2016; Chen *et al*., 2019), acompañado de cambios en los factores climáticos dominantes que regulan la productividad vegetal (Wang *et al*., 2020; Liu *et al*., 2023), incluyendo un aumento de la sensibilidad a la disponibilidad hídrica y respuestas diferenciadas según los regímenes climáticos regionales (Li *et al*., 2022; Zhang *et al*., 2021). Sin embargo, atribuir de forma robusta las tendencias observadas del LAI a forzamientos climáticos específicos sigue siendo un desafío debido a la no linealidad de las interacciones, la multicolinealidad entre variables ambientales y la heterogeneidad espacial (Zscheischler *et al*., 2018).

En este contexto, el aprendizaje automático proporciona un marco flexible para modelizar relaciones vegetación-clima a escala global sin imponer hipótesis funcionales predefinidas. No obstante, el uso de modelos complejos exige incorporar herramientas de interpretabilidad que permitan traducir el rendimiento predictivo en conocimiento físico. La inteligencia artificial explicable (XAI), mediante técnicas como SHAP (Lundberg & Lee, 2017), ofrece un marco cuantitativo para estimar la contribución de las variables climáticas y analizar la estabilidad espacial y temporal de dichas contribuciones.

Este trabajo propone un enfoque basado en algoritmos no lineales de tipo árbol (Random Forest y Gradient Boosting), para modelizar las relaciones vegetación-clima y estimar sensibilidades climáticas del LAI a partir de técnicas XAI. Aunque el marco metodológico se concibe a escala global, en esta contribución se presenta un caso ilustrativo centrado en el dominio de América.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos

El estudio se basa en las series temporales del producto LAI GEOV2-AVHRR (Verger *et al*., 2023), disponible en el portal GEODES (https://geodes.cnes.fr), con frecuencia de 10 días, resolución espacial de 5 km y cobertura global para el periodo 1981-2022.

Como variables explicativas se utilizan datos climáticos mensuales del reanálisis ERA5, incluyendo temperatura, precipitación, radiación, presión de vapor y variables de disponibilidad hídrica (humedad del suelo superficial y en zona radicular). La incorporación explícita de indicadores hídricos responde a la evidencia creciente del papel dominante de las limitaciones por agua en amplias regiones del planeta (Li *et al*., 2022; Liu *et al*., 2023). Todas las variables se remuestrean a una resolución espacial común de 0.5°.

2.2. Preprocesado y calculo de anomalías

Se aplica un preprocesado homogéneo a nivel de píxel que incluye control de calidad y verificación de la consistencia de las series temporales. Posteriormente, se calculan climatologías mensuales a partir de medias multianuales y, a partir de ellas, las anomalías correspondientes (Zhu *et al*., 2016; Chen *et al*., 2019).

El análisis se restringe a la temporada de crecimiento de la vegetación, definida mediante un umbral térmico (temperatura del aire > 5ºC), con el fin de analizar las relaciones dinámicas entre anomalías climáticas y del LAI.

2.3. Modelización mediante aprendizaje automático

Las relaciones entre anomalías de LAI y variables climáticas se modelizan mediante algoritmos no lineales basados en árboles, permitiendo capturar interacciones complejas y dependencias no lineales entre predictores. Los modelos se entrenan de forma independiente a nivel de píxel, integrando información de distintos biomas y regímenes climáticos en un marco común.

El objetivo del modelado no es únicamente predictivo, sino proporcionar una base sobre la que aplicar técnicas de interpretabilidad que permitan descomponer las predicciones en contribuciones atribuibles a cada variable climática. A partir de estas contribuciones se derivan sensibilidades climáticas comparables entre regiones y algoritmos. La Figura 1 resume el flujo metodológico completo.

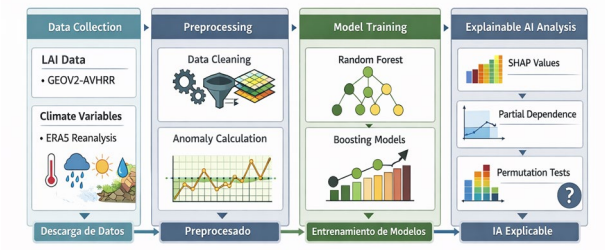


Figura 1. Esquema metodológico del estudio, que integra la adquisición de datos, preprocesado y cálculo de anomalías, entrenamiento de modelos de aprendizaje automático y la aplicación de técnicas de inteligencia artificial explicable.

2.4. Interpretabilidad y estimación de sensibilidad climática

Para avanzar más allá del análisis puramente predictivo, se aplican técnicas de inteligencia artificial explicable

(XAI) que permiten descomponer las predicciones del modelo en contribuciones atribuibles a cada variable climática. En particular, se emplea SHAP (Lundberg & Lee, 2017; Liu *et al*., 2023) para estimar contribuciones locales a nivel de píxel y tiempo, proporcionando una medida consistente de la influencia de cada predictor sobre la predicción del modelo. De forma complementaria, se utilizan métodos basados en permutación (*permutation importance*) para evaluar la importancia relativa de las variables y verificar la estabilidad de las atribuciones obtenidas.

A partir de estas contribuciones se estiman sensibilidades empíricas del LAI frente a cada variable climática, permitiendo cuantificar tanto la magnitud como la dirección de la influencia de cada forzamiento y analizar su variabilidad espacial y temporal.

3. SENSIBILIDAD CLIMÁTICA

La sensibilidad climática local se define como una aproximación empírica a la respuesta del LAI frente a variaciones en un predictor climático, y puede interpretarse como una derivada efectiva dependiente del estado del sistema. Para un predictor climático X, la sensibilidad S_X en el píxel i se expresa como la relación entre las anomalías de LAI y del predictor correspondiente:

$$S_{X,i} = \frac{\partial LAI'_{i,t}}{\partial X'_{i,t}} \qquad (1)$$

donde LAI'$_{i,t}$ representa la anomalía del LAI y X'$_{i,t}$ la anomalía del predictor climático.

Dado que los modelos empleados son no lineales y no analíticamente diferenciables, esta sensibilidad se aproxima a partir de las contribuciones locales estimadas mediante técnicas XAI. En particular, los valores SHAP permiten cuantificar la contribución de cada predictor a la predicción del modelo (Lundberg & Lee, 2017).

Bajo este enfoque, la contribución del predictor climático X a la anomalía del LAI puede expresarse como:

$$\phi_{X,i,t} = S_{X,i} X'_{i,t} + \epsilon_{i,t} \qquad (2)$$

donde $\phi_{X,i,t}$ representa el valor SHAP asociado al predictor X; $S_{X,i}$ es la sensibilidad climática local estimada; X'$_{i,t}$ corresponde a la anomalía del predictor y $\epsilon_{i,t}$ es el termino residual que recoge la variabilidad no explicada por el modelo.

4. RESULTADOS

Como caso ilustrativo, se presenta el dominio de América, donde se han entrenado modelos Random Forest (RF) y HistGradientBoosting (HGB) para estimar la sensibilidad del LAI frente a la humedad del suelo.

Los mapas de sensibilidad obtenidos con ambos algoritmos muestran patrones espaciales coherentes (Figura 2), con respuestas positivas dominantes en amplias zonas semiáridas y mayor heterogeneidad, incluyendo respuestas negativas, en regiones tropicales y húmedas. Las magnitudes estimadas son comparables entre modelos.

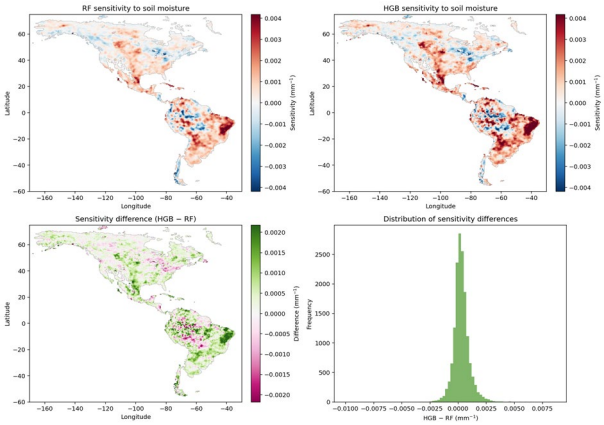


Figura 2. Comparación espacial de la sensibilidad del LAI a la humedad del suelo estimada mediante RF y HGB en América. Se muestran los mapas de ambos modelos, el mapa de diferencias (HGB-RF) y la distribución de dichas diferencias. Las unidades de sensibilidad se expresan en mm^{-1}.

La comparación cuantitativa confirma esta consistencia: la correlación espacial entre mapas alcanza r = 0.90, con un RMSE de 7.9 × 10^{-4} mm^{-1}. El 86.7% de los píxeles presentan el mismo signo de sensibilidad en ambos modelos, mientras que las discrepancias se concentran en regiones con sensibilidades cercanas a cero. La distribución de diferencias está centrada en cero, indicando un alto grado de acuerdo entre algoritmos.

Estos resultados evidencian la robustez de las sensibilidades estimadas frente al algoritmo empleado y respaldan la interpretación física de los patrones detectados, así como su extensión a escala global y a otros predictores climáticos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, proyecto PROFECIA (PID2023-152114OB-I00). Los productos GEOV2-AVHRR fueron producidos y distribuidos por el CNES utilizando los algoritmos desarrollados por el CSIC, CREAF y INRAE en el marco del programa THEIA (contratos CNES nº. 5700007172/DOA096 y nº 140570/00).

6. REFERENCIAS

Chen, C., Park, T., Wang, X., *et al*. (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2(2), 122–129. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0220-7

Li, W., Ciais, P., Peng, S., *et al*. (2022). Widespread increasing vegetation sensitivity to soil moisture. Nature Communications, 13, 3959. https://doi.org/10.1038/s41467-022-31665-9

Liu, Y., Piao, S., Chen, A., *et al*. (2023). Shifts in climatic limitations on global vegetation productivity unveiled by Shapley additive explanation: Reduced temperature but increased water limitations. Global

Change Biology, 29(3), 623–638. https://doi.org/10.1111/gcb.16432

Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In I. Guyon *et al*. (Eds.), Advances in neural information processing systems (Vol. 30). Curran Associates.

Verger, A., Baret, F., & Weiss, M. (2023). GEOV2-AVHRR: Continuous and consistent time series of global leaf area index and fraction absorbed PAR from 1981 to 2022. Remote Sensing of Environment, 290, 113509. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113509

Wang, X., Piao, S., Ciais, P., *et al*. (2020). Recent global decline of CO_2 fertilization effects on vegetation photosynthesis. Science, 370(6522), 1295–1300. https://doi.org/10.1126/science.abb7772

Zhang, Y., Xiao, X., Zhou, S., et al. (2021). Contrasting ecosystem vegetation response in global drylands under drying and wetting conditions. Global Change Biology, 27(8), 1759–1773. https://doi.org/10.1111/gcb.15523

Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., et al. (2016). Greening of the Earth and its drivers. Nature Climate Change, 6(8), 791–795. https://doi.org/10.1038/nclimate3004

Zscheischler, J., Westra, S., van den Hurk, B. J. J. M., et al. (2018). Future climate risk from compound events. Nature Climate Change, 8(6), 469–477. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.236

Impacto del Cambio Climático en la Temperatura de las Grandes Aglomeraciones Urbanas del Mundo

Salinas González, Daniel [1] **Sobrino Rodriguez, José** [1] **Balaguer Beser, Ángel** [2] **Skokovic Jovanovic, Drazen** [1]

[1] Universitat de València, España

[2] Universitat Politècnica de València

ORCID: Salinas González 0000-0002-5109-5391 Sobrino Rodriguez 0000-0003-3787-9373 Balaguer Beser 0000-0003-0039-2641 Skokovic Jovanovic 0000-0001-7103-9138

Correspondencia: daniel.salinas@uv.es jose.sobrino@uv.es abalague@mat.upv.es drazen.skokovic@uv.es

RESUMEN

El cambio climático representa uno de los desafíos más críticos del siglo XXI, manifestándose con severidad en las grandes aglomeraciones urbanas mediante la alteración del balance energético superficial. Este estudio investiga cómo el calentamiento global amplifica las anomalías térmicas en las ciudades, centrándose en la cuantificación y evolución del fenómeno de la Isla de Calor Urbano Superficial (SUHI) a escala global utilizando sensores MODIS (Terra y Aqua). La metodología se basa en la recuperación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) mediante el algoritmo UVEG-TES. Este enfoque físico procesa radiancias de Nivel 1B e integra perfiles atmosféricos de reanálisis ERA5 con el modelo RTTOV. La base de datos generada (Nivel 2 UVEG) permite desacoplar la emisividad de la temperatura en entornos complejos, sirviendo de referencia para validar los productos estándar MOD21/MYD21 y garantizando una precisión contrastada con estaciones in situ. El análisis del impacto climático se realiza mediante productos de Nivel 3 (L3) derivados de la serie UVEG. Se aplica una delimitación dinámica de áreas urbanas y rurales (triangulación de Voronoi) para calcular la intensidad del SUHI. Asimismo, se analizan indicadores de degradación térmica como el Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI), el Discomfort Index (DI) y la identificación de Hotspots mediante umbrales estadísticos. Los resultados en 56 metrópolis globales evidencian una tendencia creciente en las temperaturas y una intensificación del estrés térmico, vinculando la expansión urbana con la exacerbación del cambio climático local. Finalmente, la consistencia de la serie temporal generada permite no solo estimar la evolución histórica del SUHI, sino también establecer bases robustas para la predicción de futuras olas de calor, proporcionando una herramienta esencial para el diseño de estrategias de adaptación en las aglomeraciones urbanas más vulnerables..

Palabras clave: *LST, SUHI, Cambio Climático, Predicción Térmica, TES*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Impacto del Cambio Climático en la Temperatura de las Grandes Aglomeraciones Urbanas del Mundo

Salinas González, Daniel [(1)], Sobrino Rodriguez, José A [(1)], Balaguer Beser, Ángel [(2)], Skokovic Jovanovic, Drazen [(1)]

[(1)] Universitat de València, España.

0000-0002-5109-5391, daniel.salinas@uv.es; 0000-0003-3787-9373, sobrino@uv.es

0000-0001-7103-9138, drazen.skokovic@uv.es

[(2)] Universitat Politècnica de València.

0000-0003-0039-2641, abalague@mat.upv.es

Resumen: El cambio climático representa uno de los desafíos más críticos del siglo XXI, manifestándose con severidad en las grandes aglomeraciones urbanas mediante la alteración del balance energético superficial. Este estudio investiga cómo el calentamiento global amplifica las anomalías térmicas en las ciudades, centrándose en la cuantificación y evolución del fenómeno de la Isla de Calor Urbano Superficial (SUHI) a escala global utilizando sensores MODIS (*Terra* y *Aqua*). La metodología se basa en la recuperación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) mediante el algoritmo UVEG-TES. Este enfoque físico procesa radiancias de Nivel 1B e integra perfiles atmosféricos de reanálisis ERA5 con el modelo RTTOV. La base de datos generada (Nivel 2 UVEG) permite desacoplar la emisividad de la temperatura en entornos complejos, sirviendo de referencia para validar los productos estándar MOD21/MYD21 y garantizando una precisión contrastada con estaciones *in situ*. El análisis del impacto climático se realiza mediante productos de Nivel 3 (L3) derivados de la serie UVEG. Se aplica una delimitación dinámica de áreas urbanas y rurales (triangulación de Voronoi) para calcular la intensidad del SUHI. Asimismo, se analizan indicadores de degradación térmica como el *Urban Thermal Field Variance Index* (UTFVI), el *Discomfort Index* (DI) y la identificación de Hotspots mediante umbrales estadísticos. Los resultados en 56 metrópolis globales evidencian una tendencia creciente en las temperaturas y una intensificación del estrés térmico, vinculando la expansión urbana con la exacerbación del cambio climático local. Finalmente, la consistencia de la serie temporal generada permite no solo estimar la evolución histórica del SUHI, sino también establecer bases robustas para la predicción de futuras olas de calor, proporcionando una herramienta esencial para el diseño de estrategias de adaptación en las aglomeraciones urbanas más vulnerables.

Palabras clave: LST, SUHI, Cambio Climático, Predicción Térmica, TES

Impact of Climate Change on the Temperature of the World's Large Urban Agglomerations

***Abstract**: Climate change represents one of the most critical challenges of the 21st century, manifesting with particular severity in large urban agglomerations through the alteration of the surface energy balance. This study investigates how global warming amplifies thermal anomalies in cities, focusing on the quantification and evolution of the Surface Urban Heat Island (SUHI) phenomenon on a global scale using MODIS sensors (Terra and Aqua). The methodology is based on the retrieval of Land Surface Temperature (LST) using the UVEG-TES algorithm. This physical approach processes Level 1B radiances and integrates atmospheric profiles from ERA5 reanalysis with the RTTOV model. The generated database (UVEG Level 2) allows for the decoupling of emissivity and temperature in complex environments, serving as a reference to validate standard MOD21/MYD21 products and ensuring accuracy cross-referenced with in situ stations. The analysis of climate impact is conducted using Level 3 (L3) products derived from the UVEG series. A dynamic delimitation of urban and rural areas (via Voronoi triangulation) is applied to calculate SUHI intensity. Furthermore, thermal degradation indicators such as the Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI), the Discomfort Index (DI), and the identification of Hotspots through statistical thresholds are analysed. Results across 56 global metropolises evidence a warming trend in surface temperatures and an intensification of thermal stress, linking*

urban expansion with the exacerbation of local climate change. Finally, the consistency of the generated time series allows not only for the estimation of the historical evolution of the SUHI but also for the establishment of robust foundations for the prediction of future heatwaves, providing an essential tool for designing adaptation strategies in the most vulnerable urban agglomerations.

***Keywords**: LST, SUHI, Climate Change, Thermal Prediction, TES.*

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del calentamiento global, la teledetección térmica ocupa un papel central, ya que la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) es un parámetro esencial del balance energético del sistema Tierra. La recuperación precisa de esta variable requiere un conocimiento detallado de la física de la radiación y la aplicación de algoritmos robustos como el *Split-Window* (SW) y el *Temperature and Emissivity Separation* (TES), validados mediante campañas internacionales de calibración y validación (Gillespie *et al*., 1998; Sobrino *et al*., 2008). El avance hacia misiones de alta resolución térmica, como *Copernicus LSTM*, *TRISHNA* y *SBG*, promete ampliar significativamente la capacidad de observación detallada del ciclo energético urbano (Koetz *et al*., 2018).

Bajo este panorama tecnológico, el estudio de la Isla de Calor Urbano Superficial (SUHI) emerge como un campo de aplicación crítico. Este fenómeno, manifestado como una anomalía térmica positiva entre las áreas urbanas y sus entornos rurales, representa uno de los indicadores más claros del impacto térmico del desarrollo urbano y su interacción con el cambio climático global. La relevancia del SUHI ha aumentado notablemente debido al incremento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor, afectando de manera desproporcionada a poblaciones vulnerables. No obstante, su caracterización precisa enfrenta desafíos metodológicos derivados de la heterogeneidad de los materiales artificiales, la geometría tridimensional de las ciudades y la variabilidad de la emisividad superficial.

Para abordar estos desafíos, el presente trabajo se centra en el desarrollo y aplicación de la metodología UVEG-TES. Esta aproximación permite procesar de forma autónoma la base de datos de productos de Nivel 1B de los satélites MODIS (*Terra* y *Aqua*). El núcleo del flujo de trabajo consiste en la generación de una base de datos propia de Nivel 2 (LST y emisividad), mediante la integración de perfiles atmosféricos de reanálisis ERA5 y el modelo de transferencia radiativa RTTOV. Este refinamiento metodológico permite superar las limitaciones de los productos operativos estándar en entornos urbanos complejos, garantizando una precisión validada frente a estaciones *in situ*.

A partir de esta serie homogénea, se realiza un análisis de productos de Nivel 3 en 56 grandes ciudades del mundo durante el periodo 2003-2023. Se emplea una delimitación dinámica de áreas urbanas y rurales basada en la triangulación de Voronoi (Gold *et al*., 1997) para cuantificar la intensidad del SUHI, junto con indicadores de degradación térmica como el *Urban Thermal Field Variance Index* (UTFVI), el *Discomfort Index* (DI) y la identificación de hotspots o puntos calientes. Finalmente, la consistencia de la serie temporal generada permite no solo estimar la evolución histórica del impacto del cambio climático en las grandes aglomeraciones urbanas, sino también establecer bases robustas para la predicción de futuras olas de calor, proporcionando una herramienta esencial para el diseño de estrategias de adaptación urbana a escala global.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y base de datos multitemporal

El estudio se centra en 56 grandes aglomeraciones urbanas distribuidas globalmente, seleccionadas por su relevancia demográfica y diversidad climática. La base de datos comprende 20 años de observaciones (2003-2023) provenientes de los sensores MODIS a bordo de las plataformas Terra y Aqua. Se han procesado radiancias de Nivel 1B (MOD021KM/MYD021KM) y datos de geolocalización (MOD03/MYD03). La distribución espacial de las ciudades de estudio se presenta en la Figura 1, donde se observa la representatividad en todos los continentes y regímenes climáticos (desde áridos hasta tropicales).

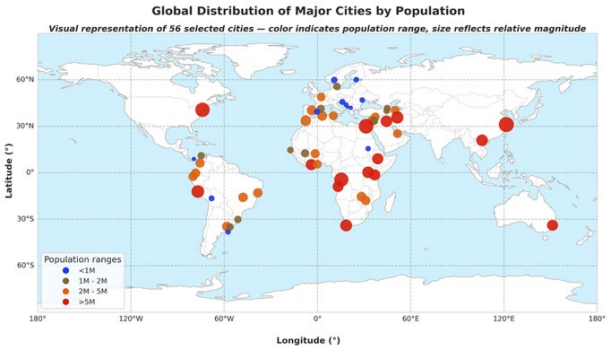


Figura 1. Distribución global de las 56 ciudades de estudio, según el número de habitantes.

Para garantizar la precisión en la corrección atmosférica, se han integrado perfiles de reanálisis ERA5 (ECMWF) con resolución horaria, que proporcionan la estructura vertical de la atmósfera (temperatura y humedad) en el momento exacto de la adquisición satelital.

2.2. Generación del producto de Nivel 2

La recuperación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) se fundamenta en el algoritmo UVEG-TES. Este flujo de procesamiento (Fig. 2) transforma las radiancias medidas en el tope de la atmósfera en

parámetros biofísicos de superficie mediante la resolución de la ecuación de transferencia radiativa. El proceso utiliza el modelo RTTOV para simular la emitancia y transmitancia atmosférica píxel a píxel.

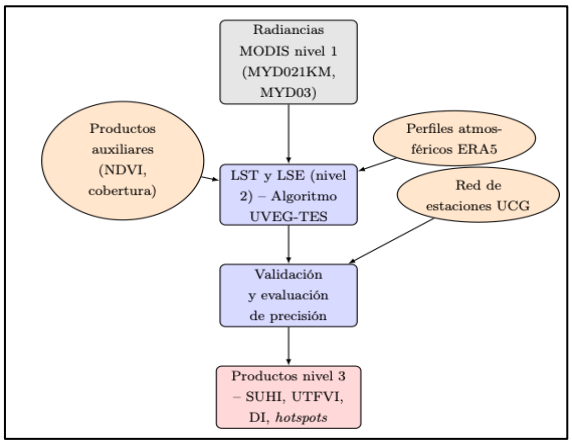


Figura 2. Cadena de procesos, para la generación y validación de productos de Nivel 2 y 3 a partir de radiancias de Nivel1.

Un aspecto crítico de esta metodología es la validación de los productos generados. Los datos de LST de Nivel 2 de UVEG han sido validados rigurosamente mediante dos enfoques: en primer lugar, una comparación cruzada (*cross-validation*) con los productos operativos de la NASA (MOD21 y MYD21); en segundo lugar, una validación absoluta frente a mediciones de temperatura *in situ* procedentes de redes de estaciones meteorológicas y radiométricas. Estos resultados confirman una incertidumbre inferior a 1 K, lo que garantiza la fiabilidad de la serie temporal para el análisis del impacto del cambio climático.

2.3. Procesamiento de Nivel 3 y cuantificación de indicadores urbanos

El paso del producto de Nivel 2 al Nivel 3 constituye la etapa de análisis espacial y generación de indicadores climáticos (Fig. 2). En esta fase, se aplica una delimitación dinámica de las áreas urbanas y rurales mediante la triangulación de Voronoi (Gold *et al*., 1997), permitiendo una comparación estandarizada entre ciudades de distinta morfología. A partir de la LST recuperada, se calculan diversos índices térmicos que caracterizan el impacto del calentamiento en las aglomeraciones. Las expresiones matemáticas de estos indicadores se detallan a continuación. El índice SUHI (Ecuación 1) define la magnitud de la anomalía térmica urbana, mientras que el UTFVI (Ecuación 2) y el DI (Ecuación 3) permiten evaluar el estrés ecológico y humano, respectivamente.

$$LST_{URBAN} - LST_{RURAL} \quad (1)$$

$$UTFVI = 1 - \frac{LST_{urban_{mean}}}{LST_{urban_{pixel}}} \quad (2)$$

$$Di = LST - (0.55 - 0.005) \cdot RH) \cdot (LST - 14.5) \quad (3)$$

$$LST_{pixel} > LST_{\{media\}} + k \cdot \sigma_{\{LST\}} \quad (4)$$

Finalmente, la identificación de *Hotspots* (Ecuación 4) se realiza mediante umbrales estadísticos de anomalía, lo que permite detectar zonas de especial vulnerabilidad dentro de la trama urbana.

3. RESULTADOS

La metodología UVEG-TES permitió procesar 4,29 millones de imágenes en la infraestructura JASMIN, generando 21 años (2003–2023) de datos diarios de LST y LSE para 56 ciudades. El uso de perfiles ERA5 y el modelo RTTOV mantiene una producción continua de productos de Nivel 2, con una precisión validada frente a estaciones terrestres (RMSE entre 1,1 K y 2,7 K). Destaca el rendimiento nocturno, donde el algoritmo redujo el RMSE en 0,1 K respecto a los productos operativos de la NASA. Asimismo, la emisividad mostró discrepancias inferiores al 2%, asegurando una alta estabilidad espectral en entornos urbanos heterogéneos.

El análisis revela un marcado gradiente de calentamiento liderado por urbes en regiones áridas, como Baghdad (+0,50 K/década) y Doha (+0,66 K/década), vinculado a la densificación y la baja capacidad de enfriamiento nocturno. En contraste, ciudades del hemisferio sur y zonas oceánicas (Sydney o Buenos Aires) presentaron una estabilidad notable con cambios totales acumulados inferiores a 0,5 K. La intensidad del SUHI, calculada mediante triangulación de Voronoi (Gold *et al*., 1997), confirmó que el contraste térmico depende de la configuración regional: Barcelona (intensidad de +3,8 K) superó a ciudades desérticas debido a su entorno rural vegetado. Además, el análisis de *hotspots* identificó que hasta el 25% del área en ciudades como Aleppo actúa como foco crítico de calor.

La serie temporal muestra un incremento sostenido de la LST nocturna con una tasa global ponderada de +0,95 K por década, acelerándose notablemente desde 2015 (Sobrino *et al*., 2020). Existe una marcada asimetría entre hemisferios: el Norte registra una LST media de 293,4 K con un cambio total de +2,2 K (+1,10 K/década), mientras que el Sur mantiene una media de 284,5 K y un incremento de +1,6 K (+0,80 K/década). Esta disparidad se traduce en una mayor frecuencia de eventos extremos en el norte, con noches que superan los 300 K. El estudio advierte que, aunque el sur es hoy más estable por la influencia oceánica, las tendencias atmosféricas de ERA5 sugieren que esta capacidad de amortiguación podría verse comprometida en el futuro.

4. DISCUSIÓN

El algoritmo UVEG-TES demuestra una robustez superior al generar series de 21 años con una incertidumbre de K frente a productos oficiales (Guillevic *et al*., 2018). El uso de perfiles ERA5 y el modelo RTTOV son una alternativa estable para la recuperación de la

LST en periodos largos, superando las limitaciones de los algoritmos convencionales en superficies urbanas heterogéneas. Asimismo, la intensidad del SUHI queda vinculada a la interacción entre forzamientos climáticos y morfología local; mientras los climas áridos muestran fenómenos más persistentes, las urbes costeras presentan intensidades menores por la regulación marina. Se confirma, además, una retroalimentación positiva en ciudades con temperaturas elevadas, alineada con las proyecciones de extremos térmicos del IPCC (2021).

Metodológicamente, la triangulación de Voronoi (Gold *et al*., 1997) y el coeficiente de expansión urbana (Sobrino *et al*., 2020) suponen avances críticos que minimizan errores espaciales y garantizan la comparabilidad temporal ante el crecimiento de las ciudades. A pesar de centrarse en datos nocturnos, los productos de Nivel 3 generados estandarizan los índices térmicos a escala global. Esta capacidad de diagnóstico permite identificar zonas de alta vulnerabilidad, fundamentando estrategias de mitigación y adaptación climática basadas en evidencias físicas precisas para proteger a la población frente al calentamiento global.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo valida la metodología UVEG-TES como una herramienta robusta para la monitorización térmica global. Al generar una base de datos propia de 21 años para 56 ciudades, se ha logrado una precisión de K y una trazabilidad conforme a los estándares CEOS-LPV. El uso de la triangulación de Voronoi y un coeficiente de expansión urbana ha resultado crucial para corregir la subestimación del efecto SUHI en ciudades en crecimiento, revelando que la intensidad de la isla de calor depende del contraste morfológico local y mostrando una intensificación crítica de extremos térmicos en climas áridos.

Más allá del registro histórico, esta serie permite entrenar modelos de aprendizaje automático para predecir futuras olas de calor y el alcance del efecto SUHI ante la expansión urbana. La metodología ya se ha validado en campañas reales y se presenta como el flujo operativo para la nueva generación de satélites de alta resolución, estableciendo un estándar para la futura monitorización del planeta. En definitiva, este estudio aporta la evidencia física necesaria para entender el calentamiento global y diseñar estrategias de mitigación eficaces que protejan a la población.

6. AGRADECIMIENTOS

Contribución del IPL a la explotación científica de las misiones térmicas de alta resolución espacial: LSTM, TRISHNA y SBG, (financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, la Agencia Estatal de Investigación (AEI/10.13039/501100011033), en el marco del proyecto PID2023-150737OB-I00).

Indicadores Medioambientales y Fenómenos Adversos en la Comunidad Valenciana usando datos de satélite (INMESAT), (financiado por la Conselleria de Educación, Cultura y Universidades de la Generalitat Valenciana en el marco del programa PROMETEO 2024 (Subvenciones para la realización de proyectos de I+D+i para grupos de investigación de excelencia), con referencia CIPROM2023-42).

7. REFERENCIAS

Gillespie, A. and Rokugawa, S. and Matsunaga, T. and Cothern, J. S. and Hook, S. and Kahle, A. B. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for ASTER images. IEEE Transactions on Geoscience and *Remote Sensing, (36)*. https://doi.org/10.1109/36.700995

Guillevic, P. C., Göttsche, F.-M., Nickeson, J., Hulley, G., Ghent, D., Yu, Y., Trigo, I. F., Hook, S., Sobrino, J. A., Remedios, J., Román, M., & Camacho, F. (2018). Land Surface Temperature Product Validation Best Practice Protocol (v1.1, Best Practice for Satellite-Derived Land Product Validation). CEOS WGCV Land Product Validation (LPV) Subgroup. https://doi.org/10.5067/doc/ceoswgcv/lpv/lst.001

Gold, C. M., Remmele, P. R., & Roos, T. (1997). Voronoi Methods in GIS. In M. van Kreveld, J. Nievergelt, T. Roos, & P. Widmayer (Eds.), *Algorithmic Foundations of Geographic Information Systems* (Vol. 1340, pp. 21–35). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-63818-0_2

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Koetz, B., Bastiaanssen, W. G. M., Berger, M., Defourny, P., & others. (2018). High Spatio-Temporal Resolution Land Surface Temperature Mission a Copernicus Candidate Mission in Support of Agricultural Monitoring. IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4078–4081. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517433

Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2008). Split-Window Coefficients for Land Surface Temperature Retrieval from Low-Resolution Thermal Infrared Sensors. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 5*(4), 806–809. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:12347129

Sobrino, J. A., & Irakulis, I. (2020). A Methodology for Comparing the SUHI in Selected Urban Agglomerations Around the World from Sentinel-3 SLSTR Data. *Remote Sensing, 12*(12), 2052. https://doi.org/10.3390/rs12122052

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.239

Cuantificación de flujos de energía en regiones insulares mediterráneas bajo cambio climático: implementación del modelo TSEB mediante datos de Teledetección

Cristóbal Rosselló, Jordi [1] **Company, Jaume** [2] **Estrany, Joan** [2] **Gago, Xurxo** [3] **Bozorgi, Mahsa** [4]

[1] Universitat Autònoma de Barcelona, España

[2] Natural Risks and Emergencies Observatory of the Balearic Islands—RiscBal, University of the Balearic Islands. Department of Geography and Institute of Agro-Environmental & Water Economy Research-INAGEA

[3] Research Group on Plant Biology under Mediterranean Conditions, Department of Biology, University of the Balearic Islands (UIB), Institute of Agroecology and Water Economy (INAGEA)

[4] Programa de l'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, IRTA

ORCID: Cristóbal Rosselló 0000-0001-6244-4289 Estrany 0000-0003-3669-9936 Bozorgi 0009-0006-2935-2597

Correspondencia: jordi.cristobal@uab.cat jaume.company@uib.cat joan.estrany@uib.cat jorge.gago@uib.cat mahsa.bozorgi@irta.cat

RESUMEN

Las regiones insulares mediterráneas están experimentando cambios sin precedentes en respuesta a los impactos del cambio climático. Sin embargo, las retroalimentaciones entre la hidrosfera y los eventos extremos, ya sean antropogénicos o climáticos, requieren mejoras significativas en su cuantificación, especialmente ante fenómenos como lluvias extremas, sequías e incendios forestales. Este trabajo presenta resultados preliminares de la implementación del modelo TSEB (Two-Source Energy Balance) para estimar flujos de energía superficial en la cuenca experimental de Sa Font de la Vila (4.8 km²), Mallorca. Se instaló una torre de flujos de 4 metros equipada con analizador de gases de trayectoria abierta, anemómetro sónico 3D, radiómetro neto y placas de flujo de calor del suelo. El modelo TSEB se ejecutó utilizando datos de temperatura superficial de la torre y datos MODIS Terra/Aqua para el período noviembre 2020 - diciembre 2022. Los resultados muestran un acuerdo aceptable entre el modelo TSEB y los datos de la torre de flujos, permitiendo la futura integración de flujos energéticos diarios. El coeficiente PT mostró mejor acuerdo cuando se forzó a valores más bajos (0.9 vs 1.26).

Palabras clave: *Flujos de energía, TSEB, Torre de flujos, Región insular mediterránea, Recursos hídricos*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Cuantificación de flujos de energía en regiones insulares mediterráneas bajo cambio climático: implementación del modelo TSEB mediante datos de Teledetección

Cristóbal Rosselló, Jordi [(1)], Company, Jaume [(2)], Estrany, Joan [(2)], Gago, Xurxo [(3)], Bozorgi, Mahsa [(4)]

[(1)] Universitat Autònoma de Barcelona, España.
0000-0001-6244-4289, jordi.cristobal@uab.cat.

[(2)] Natural Risks and Emergencies Observatory of the Balearic Islands—RiscBal, University of the Balearic Islands. Department of Geography and Institute of Agro-Environmental & Water Economy Research-INAGEA.
0000-0000-0000-0001, jaume.company@uib.cat ; 0000-0003-3669-9936, joan.estrany@uib.cat.

[(3)] Research Group on Plant Biology under Mediterranean Conditions, Department of Biology, University of the Balearic Islands (UIB), Institute of Agroecology and Water Economy (INAGEA).
0000-0000-0000-0001, jorge.gago@uib.cat.

[(4)] Programa de l'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, IRTA.
0009-0006-2935-2597, mahsa.bozorgi@irta.cat

Resumen: Las regiones insulares mediterráneas están experimentando cambios sin precedentes en respuesta a los impactos del cambio climático. Sin embargo, las retroalimentaciones entre la hidrosfera y los eventos extremos, ya sean antropogénicos o climáticos, requieren mejoras significativas en su cuantificación, especialmente ante fenómenos como lluvias extremas, sequías e incendios forestales. Este trabajo presenta resultados preliminares de la implementación del modelo TSEB (Two-Source Energy Balance) para estimar flujos de energía superficial en la cuenca experimental de Sa Font de la Vila (4.8 km²), Mallorca. Se instaló una torre de flujos de 4 metros equipada con analizador de gases de trayectoria abierta, anemómetro sónico 3D, radiómetro neto y placas de flujo de calor del suelo. El modelo TSEB se ejecutó utilizando datos de temperatura superficial de la torre y datos MODIS Terra/Aqua para el período noviembre 2020 - diciembre 2022. Los resultados muestran un acuerdo aceptable entre el modelo TSEB y los datos de la torre de flujos, permitiendo la futura integración de flujos energéticos diarios. El coeficiente PT mostró mejor acuerdo cuando se forzó a valores más bajos (0.9 vs 1.26).

Palabras clave: Evapotranspiración, temperatura de la superficie terrestre, MODIS (Terra/Aqua), Covarianza de torbellinos

Quantification of energy fluxes in Mediterranean island regions under climate change: implementation of the TSEB model using remote sensing data.

***Abstract**: Mediterranean island regions are witnessing unprecedented changes in response to climate change impacts. However, feedback between the hydrosphere and extreme events, whether anthropogenic or climatic, require significant improvements in their quantification, especially in the face of extreme phenomena such as extreme rainfall, droughts and wildfires. This work presents preliminary results from implementing the TSEB (Two-Source Energy Balance) model to estimate surface energy fluxes in the Sa Font de la Vila experimental catchment (4.8 km²), Mallorca. A 4-meter flux tower was installed equipped with open-path gas analyzer, 3D sonic anemometer, net radiometer and soil heat flux plates. The TSEB model was run using surface temperature data from the tower and Terra/Aqua MODIS data for the period November 2020 - December 2022. Results show an acceptable agreement between TSEB model and flux tower data, allowing further integration of daily energy fluxes. The PT coefficient showed better agreement when forced to lower values (0.9 vs 1.26).*

***Keywords**: Evapotranspiration, land surface temperature, MODIS (Terra/Aqua), Eddy covariance*

1. INTRODUCCIÓN

Las regiones insulares mediterráneas están experimentando cambios sin precedentes en respuesta a los impactos del cambio climático. Las retroalimentaciones entre la hidrosfera y los eventos extremos ya sean antropogénicos o climáticos, requieren mejoras significativas en su cuantificación, especialmente ante fenómenos extremos como lluvias intensas, sequías prolongadas e incendios forestales recurrentes. Esta limitación revela un alto grado de incertidumbre en las predicciones sobre cuánto, qué tan rápido y dónde cambiarán los ecosistemas insulares mediterráneos. También resulta incierto cómo las perturbaciones antropogénicas o naturales como eventos extremos de precipitación, sequías o incendios forestales impactarán sobre los recursos hídricos y la dinámica climática. Por tanto, cuantificar cómo estos eventos extremos afectan a los recursos hídricos y las tendencias espaciotemporales es clave para comprender cómo evolucionarán los ecosistemas insulares mediterráneos en el futuro. El objetivo principal de este estudio es investigar los patrones espaciotemporales de los flujos de energía, especialmente el calor latente o evapotranspiración (ET), controlados por cambios en las condiciones de la superficie terrestre y la cobertura vegetal, bajo los efectos del cambio global a escalas local (cuenca) y regional. Para ello, se implementó el modelo TSEB (*Two-Source Energy Balance*) a escala local combinando datos de una torre de flujos instalada en la cuenca experimental de Sa Font de la Vila (Mallorca) así como datos de Teledetección MODIS para su futura implementación a nivel regional en cuencas insulares mediterráneas.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca experimental de Sa Font de la Vila está localizada en la isla de Mallorca (Fig. 1), con una superficie de 4.8 km² (2407 ha). El área ha experimentado revegetación natural de antiguos cultivos agrícolas y recurrencia de incendios forestales, con eventos significativos en 1994 y 2013 (Lucas-Borja *et al*., 2018). Los usos del suelo dominantes son bosque (51%), matorral (33%), cultivos arbóreos de secano (12%), cultivos herbáceos de secano (1%) y usos urbanos (3%). La vegetación actual incluye especies como *Pinus halepensis*, *Ampelodesmos mauritanica*, *Chamaerops humilis*, *Quercus ilex*, *Calicotome spinosa*, *Pistacia lentiscus*, *Cistus albidus* y *Erica multiflora* (entre otras). Desde 2013 se monitoriza continuamente el flujo de agua y sedimentos, temperatura del aire, precipitación y humedad del suelo en diferentes puntos de la cuenca. En noviembre de 2020 se instaló una torre de flujos de 4 metros de altura en la subcuenca de So na Vidala (4.9 hectáreas), equipada con instrumentación avanzada para mediciones micrometeorológicas continuas.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Torre de flujos de energía

La torre de flujos instalada en So na Vidala está equipada con un sistema integrado IRGASON que combina analizador de gases de trayectoria abierta y anemómetro sónico 3D con una frecuencia de adquisición de datos de 20Hz. Este sistema mide de forma continua concentraciones absolutas de dióxido de carbono y vapor de agua, temperatura del aire, presión barométrica, velocidad del viento en tres dimensiones y temperatura sónica del aire. Adicionalmente, la torre incluye un radiómetro neto CNR-4 para mediciones de radiación de onda corta y onda larga, dos placas de flujo de calor auto-calibrables HFP01SC-L instaladas en el suelo, y una sonda termopares TCAV para mediciones promediadas de temperatura del suelo. Todos los sensores están conectados a un registrador de datos CR1000X que almacena mediciones en intervalos de 30 minutos. La estación también cuenta con sensores adicionales para temperatura y humedad relativa del aire, precipitación, presión atmosférica, radiación solar, dirección y velocidad del viento, además de 12 sondas de humedad del suelo, temperatura y conductividad eléctrica distribuidas espacialmente en la subcuenca y 6 diversos sensores de temperatura infrarroja distribuidos por el *footprint* de la torre.

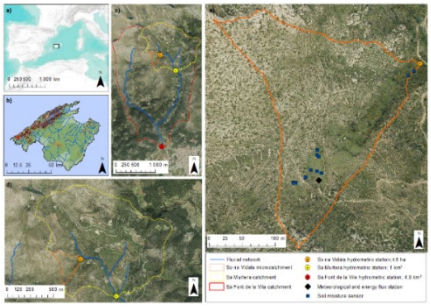




Figura 1. Zona de estudio de Sa Font de la Vila (imagen superior). Detalle de la estación de flujos de energía (imagen inferior).

3.2. Datos de Teledetección

Para explorar la potencial aplicación a nivel regional del modelo a nivel espaciotemporal, se utilizaron productos MODIS de los satélites Terra y Aqua para obtener temperatura de superficie terrestre (LST), índice de área foliar (LAI) y los índices de vegetación NDVI y EVI. Estos productos proporcionan información sobre la fracción de cobertura vegetal (f_G) necesaria para el modelo TSEB. La resolución espacial de los productos MODIS utilizados es de 500 m, menos la LST que es de 1000 m.

3.3. El modelo TSEB

El modelo TSEB (*Two-Source Energy Balance*) desarrollado por Norman *et al*. (1995) es un modelo basado en temperatura de la superficie (T_{RAD}) que separa el balance energético de dos fuentes: vegetación y suelo (Fig. 2). El modelo integra el flujo de calor sensible del

dosel vegetal (Hc) y del suelo (Hs), utilizando resistencias aerodinámicas (RA), resistencia de la capa límite foliar (Rx) y resistencia de la capa límite del suelo (Rs). Las entradas principales del modelo incluyen datos de Teledetección (MODIS Terra/Aqua para LAI, NDVI/EVI y LST), datos de la torre de flujos (LST medida cada 30 minutos con pirgeómetro) y datos meteorológicos (radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento, presión atmosférica y presión de vapor actual).

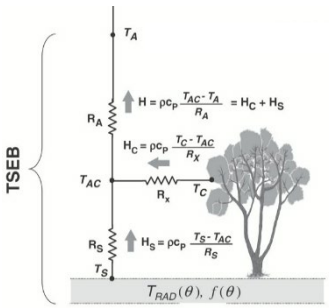


Figura 2. Esquema del modelo TSEB. T_A: temperatura del aire, T_{AC}: temperatura del aire en el dosel, H: calor sensible del dosel (H_c) y del suelo (H_s), RA: resistencia aerodinámica, R_x: resistencia de la capa límite foliar agregada, R_s: resistencia de la capa límite de la superficie del suelo, T_{RAD}: temperatura de la superficie (o LST), f(θ): fracción de cobertura de vegetación.

3.4. Ejecución y evaluación del modelo

El modelo se ejecutó para el período desde noviembre de 2020 hasta diciembre de 2022 a escala local usando los datos de LST del pirgeómetro y a escala regional usando los datos de LST de los satélites Terra y Aqua (MOD11). Se evaluó el rendimiento del modelo bajo diferentes condiciones: cielo despejado y nublado, radiación neta mayor a 100 W·m⁻², cierre de energía de la estación de flujos superior a 0.65, y dos valores diferentes del coeficiente de Priestley-Taylor (Priestley & Taylor, 1972): PT = 0.9 y PT = 1.26. El valor de PT igual a 1.26 es el de la formulación original de TSEB asumiendo condiciones de evapotranspiración potencial donde el agua no es limitante. Teniendo en cuenta que las especies mediterráneas han desarrollado mecanismos de resistencia a la sequía que limitan la transpiración, el valor de PT se ajustó a 0.9 permitiendo que el modelo TSEB capturara mejor la realidad fisiológica de los ecosistemas mediterráneos, como Cristóbal *et al*. (2020) sugirió en ambientes árticos y subárticos. El flujo de calor del suelo (G) se estableció como el 10 % de la radiación neta (Rn). Para el cálculo de los flujos se energía se usó la librería pyTSEB (github.com/hectornieto/pyTSEB) con modificaciones para el cálculo de la emisividad atmosférica en días nubosos (Cristóbal *et al*., 2020). La evaluación del modelo TSEB se realizó comparando las estimaciones de flujo de calor latente con las mediciones directas de la torre mediante el método de covarianza de torbellinos. Se calcularon estadísticos de error incluyendo la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el sesgo medio (bias) y el coeficiente de determinación (R^2) para intervalos de 30 minutos y promedios diarios.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación con datos de la torre de flujos

Los resultados preliminares muestran un acuerdo aceptable entre las estimaciones del modelo TSEB y los datos medidos por la torre de flujos (Fig. 3 y Tabla 1). Para datos de covarianza de torbellinos a intervalos de 30 minutos (n = 4157), el modelo evaluado con coeficiente PT = 0.9 mostró un RMSE promedio de 51 W·m⁻² para todos los flujos, un MBE de -19.5 W·m⁻² y R^2 de 0.63. El modelo forzado con PT = 1.26 presentó RMSE promedio para todos los flujos de 61 W·m⁻², un MBE de -18.2 W·m⁻² y R^2 = 0.63. Los resultados indican que el coeficiente PT muestra mejor acuerdo cuando el modelo se fuerza a utilizar un valor más bajo de PT (0.9), especialmente en la estimación de LE y H (Tabla 1 y Fig. 3). Este valor reducido de PT refleja las condiciones más características de la vegetación mediterránea. En ambos casos los resultados están cerca de un valor marco de 50 W·m^{-2} considerado como óptimo para escalar los datos a flujos diarios.

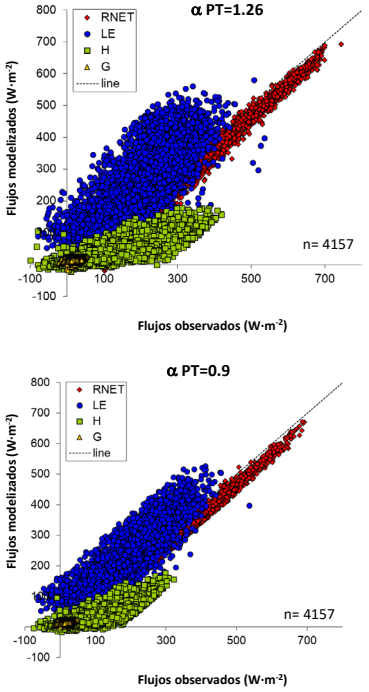


Figura 3. Resultados de la modelización de los flujos de energía con el método TSEB a escala local usando datos de LST medidos por el pirgeómetro del sensor de radiación neta (panel superior) usando un valor de PT de 1.26 (panel superior) y de 0.9 (panel inferior). line es la línea de correlación máxima 1:1

4.2. Evaluación con datos satelitales MODIS

La evaluación del modelo utilizando temperatura superficial de MODIS y un coeficiente PT de 0.9 mostró resultados variables según el sensor (Fig. 4, Tabla 2). Para Terra MODIS (n = 111 observaciones), el modelo alcanzó RMSE promedio para todos los flujos de 51 W·m⁻², MBE de -18 W·m⁻² y R^2 = 0.63 con PT = 0.9. Para Aqua MODIS (n = 53 observaciones), los estadísticos fueron RMSE = 61.25 W·m⁻², MBE = -19.5 W·m⁻² y R^2 = 0.61. Los resultados, similares a la modelización con los

datos de la LST de la torre de flujos, muestran una futura integración de datos de Teledetección para la estimación espacial de los flujos de energía a escala regional.

Tabla 1. Estimadores del error y de la correlación entre los flujos estimados por TSEB y observados en la torre de flujos de energía con un coeficiente PT de 0.9. Rn: radiación neta, LE: flujo de calor latente, H flujo de calor sensible, G: flujo de calor del suelo. RMSE y MBE en W·m-2

PT		Rn	LE	H	G	n
1.26	R^2	0.98	0.73	0.73	0.01	4157
	RMSE	46	85	98	16	
	MBE	-39	44	-77	-6	
0.9	R^2	0.98	0.82	0.72	0.01	4157
	RMSE	44	65	80	14	
	MBE	-37	32	-64	-4	

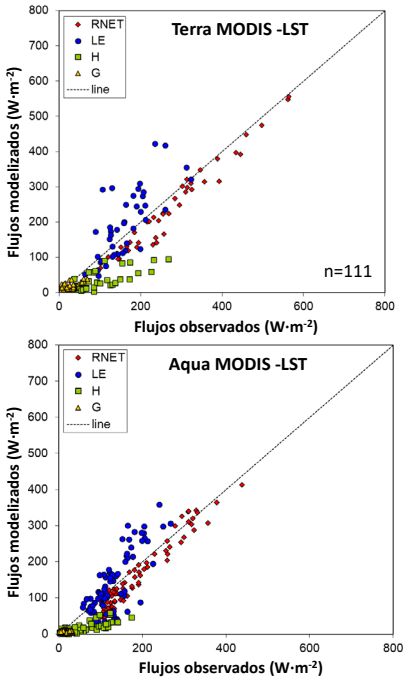


Figura 4. Resultados de la modelización de los flujos de energía con el método TSEB usando datos de LST del satélite Terra (panel superior) y Aqua (panel inferior) con una resolución espacial de 1000m. line es la línea de correlación máxima 1:1

Tabla 2. Estimadores del error y de la correlación entre los flujos estimados por TSEB y observados en la torre de flujos de energía. Sat: satélite, RMSE y MBE en W·m-2

Sat		Rn	LE	H	G	n
AQUA	R^2	0.98	0.73	0.73	0.01	53
	RMSE	46	85	98	16	
	MBE	-39	44	-77	-6	
TERRA	R^2	0.98	0.82	0.72	0.01	111
	RMSE	44	65	80	14	
	MBE	-37	32	-64	-4	

5. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares demuestran que el modelo TSEB presenta un acuerdo aceptable con los datos de la torre de flujos, permitiendo la futura integración de flujos energéticos a escala diaria. El coeficiente PT muestra mejor ajuste cuando se utiliza un valor de 0.9 en lugar del valor estándar de 1.26, lo cual es coherente en ecosistemas mediterráneos caracterizados por mayor estrés hídrico. El modelo presentó resultados similares cuando se aplicó con la LST de Terra MODIS, pero menor acuerdo con Aqua MODIS, indicando la necesidad de investigación adicional para optimizar la parametrización según el sensor utilizado. Estos resultados preliminares establecen una base sólida para el escalado espacial de estimaciones de flujos energéticos en la región insular mediterránea a escala regional. El trabajo futuro se centrará en el escalado de flujos de energía instantáneos a diarios con datos Sentinel-2 a 20 m de resolución espacial mediante el marco de modelado SenET (https://www.esa-sen4et.org/) permitiendo una comprensión completa de la dinámica de los flujos de energía y su relación con la disponibilidad de recursos hídricos en el contexto de cambio global. Además, se están procesando los datos para toda la serie temporal hasta diciembre de 2025 para llevar a cabo una evaluación temporal en condiciones de sequía.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PID2021-123707OB-I00 (MEDhyCON-3), UIB-FPI-2021 y PRD2018/54 (InsoFlux), ET4DROUGHT (PID2021-127345OR-C31) y CALIB-FIRE (PID2023-151124NB-I00).

7. REFERENCIAS

Lucas-Borja, M. E., Calsamiglia, A., Fortes, J., García-Comendador, J., Lozano Guardiola, E., García-Orenes, F., Gago, J., & Estrany, J. (2018). The role of wildfire on soil quality in abandoned terraces of three Mediterranean micro-catchments. *Catena, 170*, 246–256. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.014

Cristóbal, J., Prakash, A., Anderson, M. C., Kustas, W. P., Alfieri, J. G., & Gens, R. (2020). Surface energy flux estimation in two boreal settings in Alaska using a thermal-based remote sensing model. *Remote Sensing, 12*(24), Article 4108. https://doi.org/10.3390/rs12244108

Norman, J., Kustas, W., & Humes, K. (1995). A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology, 77*, 263–293. https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y

Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review, 100*(2), 81–92. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.265

El método Nearest Neighbour Temperature Sharpening para la mejora de la resolución espacial de la TST

Skokovic, Drazen [1] **Sobrino, José Antonio** [1] **Llorens, Rafael** [1]

[1] Universidad de Valencia, España

ORCID: Skokovic 0000-0001-7103-9138 Sobrino 0000-0003-3787-9373 Llorens 0000-0002-1973-3437

Correspondencia: drazen.skokovic@uv.es jose.sobrino@uv.es rafael.llorens@uv.es

RESUMEN

Los sensores a bordo de satélites que miden en el Infrarrojo Térmico (TIR), proporcionan datos diarios de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) con una resolución espacial generalmente baja, a 1 km, adecuada para la gestión de grandes campos agrícolas. Sin embargo, esta resolución espacial no es apropiada para Europa, donde el tamaño de las parcelas suele ser inferior a 100 m y con una elevada heterogeneidad espacial. En este trabajo se propone el procedimiento Desagregación por Vecino más Cercano (DVC) para mejorar la resolución espacial. El método se basa en una relación estadística sencilla entre la TST, el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) y el Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI), haciendo especial énfasis en los píxeles que presentan valores máximos y mínimos de NDVI para la mejora del contraste de la TST. Dado que el DVC se fundamenta en el algoritmo original de Afinado de Imágenes Térmicas o, en el inglés original, Thermal Image Sharpening, este modelo también fue evaluado en el estudio para su comparación. Ambos modelos se aplicaron a datos de Sentinel-3 con el objetivo de generar imágenes de TST a la misma resolución espacial que los datos del visibles e infrarrojo cercano del Sentinel-2 (10 m). Los productos obtenidos se validaron frente a imágenes aerotransportadas adquiridas durante la campaña intensiva realizada por la ESA en Italia.

Palabras clave: *TST, NNTS, desagregación, evapotranspiración*

Fecha de recepción: 19 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 20 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

El método Nearest Neighbour Temperature Sharpening para la mejora de la resolución espacial de la TST

Skokovic, Drazen [1], Sobrino, José Antonio [1], Llorens, Rafael [1]

[1] Universidad de Valencia, España.

0000-0001-7103-9138, drazen.skokovic@uv.es ; 0000-0003-3787-9373, jose.sobrino@uv.es

0000-0002-1973-3437, rafael.llorens@uv.es.

Resumen: Los sensores a bordo de satélites que miden en el Infrarrojo Térmico (TIR), proporcionan datos diarios de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) con una resolución espacial generalmente baja, a 1 km, adecuada para la gestión de grandes campos agrícolas. Sin embargo, esta resolución espacial no es apropiada para Europa, donde el tamaño de las parcelas suele ser inferior a 100 m y con una elevada heterogeneidad espacial. En este trabajo se propone el procedimiento Desagregación por Vecino más Cercano (DVC) para mejorar la resolución espacial. El método se basa en una relación estadística sencilla entre la TST, el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) y el Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI), haciendo especial énfasis en los píxeles que presentan valores máximos y mínimos de NDVI para la mejora del contraste de la TST. Dado que el DVC se fundamenta en el algoritmo original de Afinado de Imágenes Térmicas o, en el inglés original, Thermal Image Sharpening, este modelo también fue evaluado en el estudio para su comparación. Ambos modelos se aplicaron a datos de Sentinel-3 con el objetivo de generar imágenes de TST a la misma resolución espacial que los datos del visibles e infrarrojo cercano del Sentinel-2 (10 m). Los productos obtenidos se validaron frente a imágenes aerotransportadas adquiridas durante la campaña intensiva realizada por la ESA en Italia.

Palabras clave: TST, DVC, desagregación, TsHARP, Sentinel

The Nearest Neighbour Temperature Sharpening method for the improvement of Land Surface Temperature spatial resolution

***Abstract**: Current Thermal Infrared (TIR) sensors onboard satellite provide daily LST data at relatively low ground sampling distance resolution, above 1 km, adequate for crop management of extensive fields. However, this cannot be applied to European agricultural fields, mostly with sizes below 100 m and high heterogeneity. Many techniques were developed to reconstruct high-resolution LST, been statistical models most commonly used. In this work, we propose the Nearest Neighbour Temperature Sharpening (NNTS) procedure to improve the GSD of LST. Method is based on simple statistical relation between LST, NDVI and normalized difference water index (NDWI), emphasizing the pixels with maximal and minimal NDVI values. In this way, method can achieve the maximal LST expansion or contrast for high resolution image retrieval. As NNTS is based on the original model thermal image sharpening (TsHarp) algorithm, this model was also tested in the work. Models were applied to Sentinel-3 data in order to generate an image with the same GSD as Sentinel-2 (10 m). Retrievals were tested against the airborne images collected during the intensive campaign performed by ESA in Italy.*

***Keywords**: LST, NNTS, downscaling, TsHARP, Sentinel*

1. INTRODUCCIÓN

La Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) es una variable fundamental en la física que liga la interacción de la superficie terrestre y atmósfera y está directamente relacionada con los flujos de radiación neta y con los algoritmos de estimación de la evaporación. A diferencia de los sensores a bordo de satélites que operan en el espectro visible e infrarrojo, la resolución espacial de los pixeles en el espectro térmico, con los que usualmente se obtiene la TST, siempre ha sido más baja. Debido a esta diferencia en la resolución espacial, el acoplamiento de los datos de ambos espectros, requerido, sobre todo, para la estimación de los flujos de energía, necesita de un proceso de reescalado que iguale la resolución espacial de los píxeles implicados.

La mejora de la resolución espacial, se refiere al proceso de obtención de la información a escala local o regional mediante la desagregación de los datos térmicos de baja

resolución espacial (o del pixel grueso), a resoluciones más altas obteniendo, así, píxeles más finos de temperatura a nivel de subpíxel (dentro del pixel grueso). Este proceso se lleva a cabo generalmente mediante algoritmos que explotan relaciones empíricas entre variables de diferentes resoluciones espaciales (Mechri *et al*., 2016).

Se han desarrollado diversos métodos para la mejora de la resolución espacial de los datos de baja resolución, entre los que destacan los enfoques basados en regresión estadística (Kustas *et al*., 2003; Lacerda *et al*., 2021), técnicas de asimilación de datos, análisis de componentes principales (Wang *et al*., 2015) o, más recientemente, el uso de redes neuronales y machine learning.

De entre los modelos de regresión estadística, la relación NDVI–TST ha sido ampliamente utilizada con fines de desagregación, especialmente mediante métodos de ajustes empíricos (Jeganathan *et al*., 2011), particularmente en entornos agrícolas y urbanos. Esta relación se ha utilizado tanto en modelos locales, que se basan en relaciones definidas dentro de una vecindad limitada (normalmente una ventana de entre 3 × 3 a 11 × 11 píxeles, dependiendo de la resolución original de la TST), como en modelos globales, que aplican una única relación para toda la imagen.

En este trabajo, se propone un nuevo método de desagregación, denominado Desagregación por Vecino más Cercano (DVC). Este enfoque se basa en la variante local del modelo Afinado de Imágenes Térmicas o Temperature Sharpening (TsHARP, por sus siglas en inglés), introducido por Jeganathan *et al*. (2011), y que se aplica a ventanas locales.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio y datos

La zona agrícola de Grosseto, Italia (42.9º N, 11.1º E) ha sido elegida en multitud de ocasiones para la realización de campañas de medidas, preparadas por la Agencia Espacial Europea (ESA). La zona posee una gran variedad de campos de diferentes tamaños y variedad de cultivos ideal para estudios de evapotranspiración, algoritmia y simulación de imágenes sintéticas.

En el año 2018 se realizó una campaña con el sensor hiperespectral aerotransportado Thermal Airborne Spectrographic Imager (TASI), que posee 32 bandas entre 8-11,5 micrómetros. Con él, se tomaron imágenes a una resolución espacial de 3 metros entre los días 18 y 24 de julio. Estos datos, una vez procesados mediante el algoritmo Temperature and Emissivity Separation (TES), fueron validados con datos in situ con un error cuadrático medio inferior a 2 K.

Para los datos de TST de baja resolución, con los que se aplicaran los modelos de desagregación de los píxeles, se han empleado los datos del sensor Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) a bordo de Sentinel-3. Estos vienen dados a una resolución de 1 km en nadir y con varias imágenes diarias sobre la misma zona de estudio. En nuestro caso, se escogió una imagen, lo más cercana posible al nadir, del producto de nivel 2 de TST. Ya que a la hora de paso de Sentinel-3 había varias pasadas de avión con una diferencia temporal de 5 minutos con respecto a Sentinel-3, se utilizaron todas las pasadas incluidas en el intervalo de ± 5 min para la validación de los métodos DVC y TsHARP. Teniendo en cuenta esto, se seleccionó la imagen de las 10h UTC del Sentinel-3A del día 18 de julio y tres imágenes TASI de entre las 9:55h y 10:05h de ese mismo día.

Para los datos visibles e infrarrojos, se utilizó el producto de nivel 2 de reflectividad del sensor Multispectral Imager (MSI) a bordo del Sentinel-2. Ya que los datos de reflectividad de la superficie terrestre suelen tener pocas variaciones con el paso de los días (siempre que las condiciones meteorológicas sean estables y la influencia humana sea mínima), se empleó una imagen lo más cercana posible a la fecha de la campaña, con una cobertura mínima de nubes y remuestreada a una resolución de 10 m, mediante el método de vecino más cercano. A partir de aquí, se calculó el NDVI y el NDWI.

Finalmente, los productos TST, NDVI, NDWI de Sentinel y TST-TES de TASI, se georreferenciaron a la misma grilla para poder trabajar con ellas y validar los resultados. Además, los datos TASI se remuestrearon a 10 m, para su posterior uso en la validación.

2.2. Métodos de desagregación de TST

Para la desagregación, el primer paso que se realiza es el remuestreo de los datos NDVI y NDWI a la resolución de la TST gruesa, siendo estos denotados como $\overline{\mathrm{NDVI}}\ y\ \overline{\mathrm{NDWI}}$. A partir de aquí, se aplican ambos métodos a un área de vecindad de 3 × 3 píxeles que se desliza por toda la imagen, desagregando la TST.

El método DVC se basa en la similitud de las propiedades de los píxeles vecinos gruesos ($\overline{\mathrm{NDVI}}\ y\ \overline{\mathrm{NDWI}}$) con el valor de NDVI-NDWI del pixel fino del cual se quiere estimar su TST, teniendo en cuenta su distancia. Esto complementa el modelo lineal $\overline{\mathrm{NDVI}} - \overline{\mathrm{NDWI}}$ frente a TST gruesa usado en el TsHARP para la estimación de la TST fina. Además, al método se le ha añadido una mejora del contraste de la TST, que reorganiza los píxeles de mayor y menor temperatura, junto con los valores más bajos y altos de NDVI, respectivamente, para trazar un nuevo ajuste por mínimos cuadrados. Esta reorganización sólo se realiza cuando el modelo por mínimos cuadrados tiene un coeficiente de determinación pobre ($r^2 < 0{,}6$). Finalmente, la TST fina se estima como la suma ponderada de la TST obtenida por regresión lineal y la TST copiada de los vecinos próximos que comparten propiedades de NDVI y NDWI.

A diferencia del modelo original TsHARP, donde la TST se estima mediante una regresión por mínimos cuadrados ordinarios, el método DVC añade una mayor complejidad por la introducción de las similitudes entre píxeles y la adición del contraste. En la Figura 1 y 2 se presenta un esquema del funcionamiento de ambos métodos.

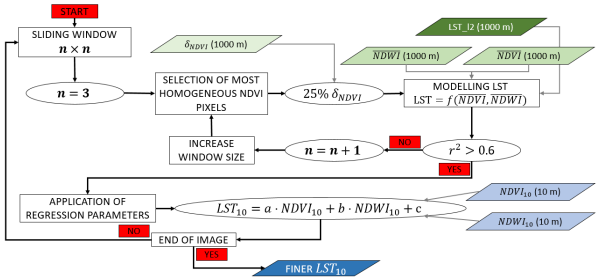


Figura 1. Esquema del procedimiento seguido para la aplicación del algoritmo TsHARP.

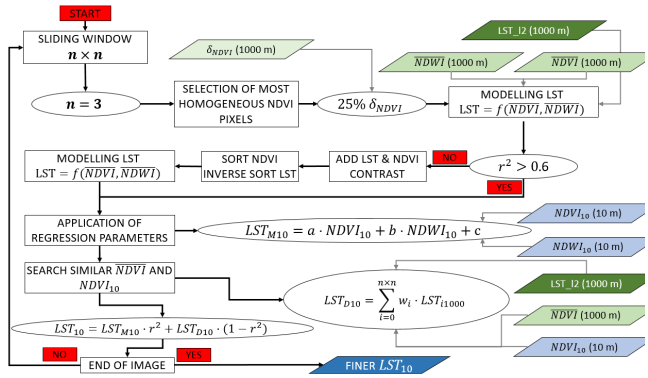


Figura 2. Esquema del procedimiento seguido para la aplicación del algoritmo DVC.

3. RESULTADOS

En la Figura 3 se muestran las imágenes originales y desagregadas de la TST obtenidas del producto Sentinel-3 y mediante la aplicación del método NNTS, respectivamente. Como se puede observar, la obtenida por desagregación, de alta resolución, nos muestra valores más altos y bajos de la TST, además de mostrar con gran detalle los diferentes campos de la zona.

En la Figura 4 y 5 se presentan las imágenes a 10 metros de resolución espacial sobre la zona de estudio de Grosseto. En la primera, se muestran los valores estimados por DVC, mientras que, en la segunda, se presentan los valores TST-TES de TASI. En ambas se aprecia una gran similitud entre las imágenes, aunque con una diferencia significativa, entre 5 K y 7 K, para los valores superiores a 315 K, siendo los del producto TST-TES, siempre superiores.

Si nos fijamos en los resultados obtenidos mediante la comparación de las imágenes desagregadas frente a las registradas por el sensor TASI, Figura 6 y 7, podemos observar que el método DVC obtiene un mejor resultado que el método TsHARP, con una diferencia entre ambos métodos de 0.7 K, en términos del error cuadrático medio obtenido. Esta diferencia, se debe a que el método DVC (Figura 6) consigue alcanzar valores más altos y más bajos de TST. Para TsHARP, los valores están en un rango de entre 305-320 K, muy parecido a la imagen Sentinel-3, mientras que para el método DVC, este rango aumenta alcanzando valores de 302-325 K. Esta mejora en el contraste es la que permite expandir el rango de TST, siendo este más parecido a la imagen TASI.

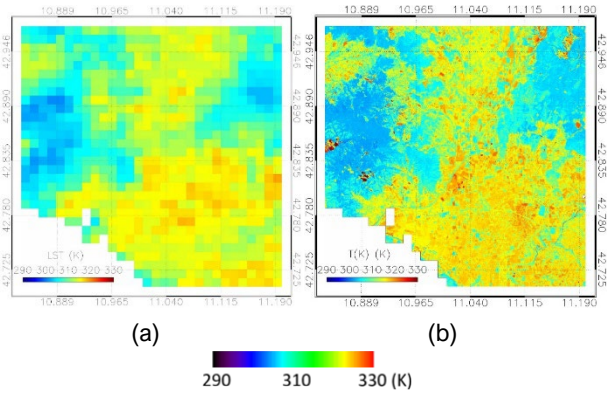


Figura 3. (a) Imagen TST extraída del producto TST de Seninel-3 y (b) Imagen desagregada por el método DVC.

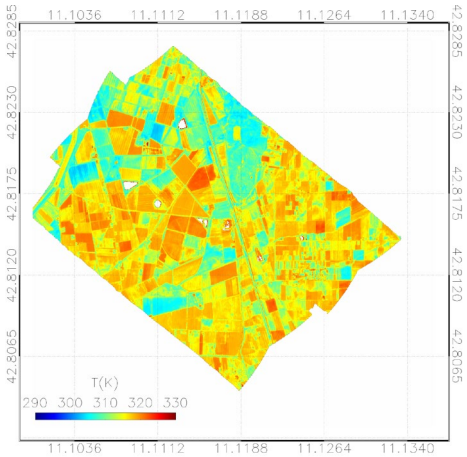


Figura 4. Imagen desagregada aplicando el método DVC sobre la zona agrícola de Grosseto.

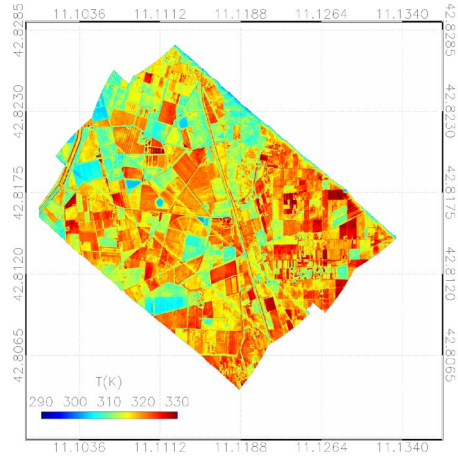


Figura 5. Imagen TST-TES de TASI a 10 m de resolución espacial formada por el promedio de 3 imágenes entre las 9:55-10:05 h.

En términos globales, podemos decir que ambos métodos funcionan bien, a pesar de que el resultado de 4.2 K y 3.5 K pueda parecer pobre. Hay que tener en cuenta que la imagen obtenida nos da la TST a 10 m (un incremento de resolución de 100 veces) y que, además, la comparación con la imagen TASI no es perfecta, ya que el procedimiento de rescaldado aplicado a la imagen

TST-TES no garantiza una representación perfecta del pixel a 10 m. Teniendo en cuenta esto, podemos decir que los resultados obtenidos son satisfactorios para ambos métodos, siendo el DVC un poco mejor que el TsHARP.

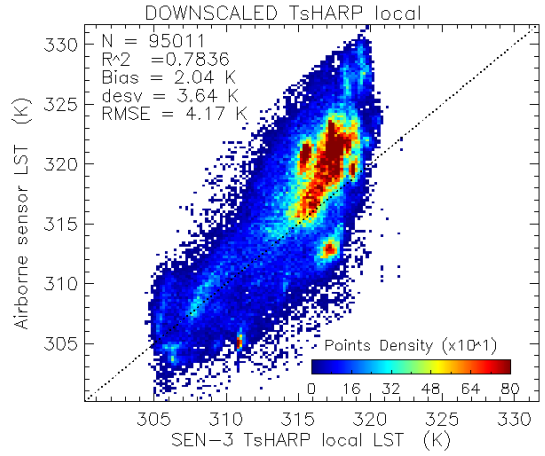


Figura 6. Resultado de la comparación entre la imagen desagregada por TsHARP y los datos TASI.

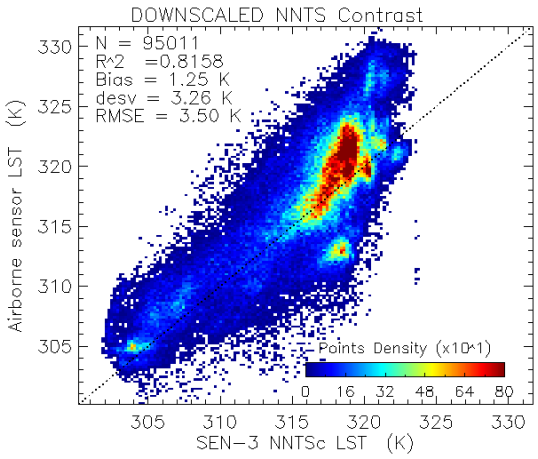


Figura 7. Resultado de la comparación entre la imagen desagregada por DVC y los datos TASI.

4. CONCLUSIONES

Los métodos de desagregación son necesarios para la estimación de la TST a una resolución espacial más alta, sobre todo si estos datos son necesarios para aplicaciones que incluyan la evapotranspiración como su elemento principal.

Con la adición de la mejora de contraste y similitud con píxeles vecinos, el algoritmo DVC mejora el resultado del TsHARP, ya que da más peso a los valores extremos de los píxeles. A pesar de que se ha conseguido mejorar el resultado con este nuevo método, este se ha de analizar en otras zonas agrícolas, para diferentes etapas de crecimiento de cosechas y distribución de parcelas verdes y suelos desnudos. Todo esto puede afectar a los resultados, por lo que, un análisis más detallado en otras zonas sería recomendable.

Por último, cabe destacar que la validación con datos de avión presenta bastantes problemas, debido a los reajustes en la georreferenciación y reescalado de los píxeles, pudiendo, estos, añadir un error extra a la comparación. Una opción interesante, sería la validación de los métodos con datos in situ, lo que eliminaría este problema.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la financiación recibida por la Conselleria de Educación, Cultura y Universidades de la Generalitat Valenciana, dentro del marco PROMETEO 2024 (Subvenciones para la realización de proyectos de I+D+I para grupos de investigación de excelencia), para el proyecto “Indicadores Medioambientales y Fenómenos Adversos en la Comunidad Valenciana usando datos de satélite” (INMESAT, referencia CIPROM2023-42) y también al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, la Agencia Estatal de Investigación en el marco del proyecto IPL-HRTS (PID2023-150737OB-I00).

6. REFERENCIAS

Lacerda, L.N., Cohen, Y., Snider, J., Huryna, H., Liakos, V., Vellidis, G. (2021) Field Scale Assessment of the TsHARP Technique for Thermal Sharpening of MODIS Satellite Images Using VENμS and Sentinel-2-Derived NDVI. *Remote Sensing, vol. 13*, 1155. https://doi.org/10.3390/rs13061155

Jeganathan, C., Hamm, N. A., Mukherjee, S., Atkinson, P. M., Raju, P. L. N., & Dadhwal, V. K. (2011). Evaluating a thermal image sharpening model over a mixed agricultural landscape in India. I*nternational Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 13*, Issue 2, Pag. 178-191. https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.11.001

Kustas, W.P., Norman, J.M., Anderson, M.C., French, A.N. (2003). Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index–radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment, Vol. 85* (4), Pag. 429-440. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00036-1

Mechri, R., Ottlé, C., Pannekoucke, O., Kallel, A., Maignan, F., Courault, D. and Trigo, I. F. (2016) Downscaling Meteosat Land Surface Temperature over a Heterogeneous Landscape Using a Data Assimilation Approach. *Remote Sensing, Vol. 8*, Pag. 586-604. https://doi.org/10.3390/rs8070586

Wang, F., Qin, Z., Li, W., Song, C., Karnieli, A. and Zhao, S. (2015). An Efficient Approach for Pixel Decomposition to Increase the Spatial Resolution of Land Surface Temperature Images from MODIS Thermal Infrared Band Data” *Sensors, Vol. 15*, no. 1, Pag. 304–330. https://doi.org/10.3390/s150100304

SESIÓN 04

Sistemas Agroforestales

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.118

Caracterización espectrofenológica de formaciones vegetales de ribera en Cantabria

Fernández-Menéndez, Álvaro [1] **Concostrina-Zubiri, Laura** [1] **Barquín, José** [1]

[1] IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, España

ORCID: Fernández-Menéndez 0000-0001-8067-3528 Concostrina-Zubiri 0000-0001-7781-6030 Barquín 0000-0003-1897-2636

Correspondencia: fmenendeza@unican.es laura.concostrina@unican.es jose.barquin@unican.es

RESUMEN

La disponibilidad de imágenes multiespectrales permite extraer información ecológica valiosa sobre los patrones estacionales de la vegetación, especialmente en ambientes dinámicos como los riparios. En este estudio, mediante modelos lineales, presentamos las relaciones entre la fenología vegetal y variables taxonómicas, ambientales y estructurales en ecosistemas de ribera. A partir de una serie de imágenes Sentinel-2 mensuales, extrajimos cuatro métricas fenológicas anuales (inicio y fin de temporada, pico de producción y rango) para el período 2022-2025, y consideramos 12 formaciones vegetales riparias, incorporando fases maduras y pioneras, así como especies autóctonas y exóticas. La composición explicó la mayor proporción de varianza para el pico y el rango, mientras que el peso de los factores ambientales fue mayor para el inicio de temporada. La Reynoutria sp. fue la formación con valores fenológicos más destacados, lo que facilita la alerta temprana de especies invasoras. Las formaciones más estrictamente riparias (alisedas, fresnedas, saucedas) mostraron una temporada de crecimiento más prolongada con respecto a las especies más típicas de ladera. Las implicaciones de este trabajo suponen una base importante para la caracterización y modelización de la vegetación riparia en ambientes dinámicos.

Palabras clave: *Espectrofenología, Sentinel-2, Vegetación riparia, Series temporales*

Fecha de recepción: 5 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 5 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Caracterización espectrofenológica de formaciones vegetales de ribera en Cantabria

Fernández-Menéndez, Álvaro [(1)], Concostrina-Zubiri, Laura [(1)], Barquín, José [(1)]
[(1)] IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, España.
0000-0001-8067-3528, fmenendeza@unican.es.
0000-0001-7781-6030, laura.concostrina@unican.es.
0000-0003-1897-2636, jose.barquin@unican.es.

Resumen: La disponibilidad de imágenes multiespectrales permite extraer información ecológica valiosa sobre los patrones estacionales de la vegetación, especialmente en ambientes dinámicos como los riparios. En este estudio, mediante modelos lineales, presentamos las relaciones entre la fenología vegetal y variables taxonómicas, ambientales y estructurales en ecosistemas de ribera. A partir de una serie de imágenes Sentinel-2 mensuales, extrajimos cuatro métricas fenológicas anuales (inicio y fin de temporada, pico de producción y rango) para el período 2022-2025, y consideramos 12 formaciones vegetales riparias, incorporando fases maduras y pioneras, así como especies autóctonas y exóticas. La composición explicó la mayor proporción de varianza para el pico y el rango, mientras que el peso de los factores ambientales fue mayor para el inicio de temporada. La *Reynoutria* sp. fue la formación con valores fenológicos más destacados, lo que facilita la alerta temprana de especies invasoras. Las formaciones más estrictamente riparias (alisedas, fresnedas, saucedas) mostraron una temporada de crecimiento más prolongada con respecto a las especies más típicas de ladera. Las implicaciones de este trabajo suponen una base importante para la caracterización y modelización de la vegetación riparia en ambientes dinámicos.

Palabras clave: Espectrofenología, Sentinel-2, Vegetación riparia, Series temporales

Land Surface Phenology of riparian vegetation formations in Cantabria

***Abstract**: The availability of multispectral images allows for the extraction of valuable ecological information about the seasonal patterns of vegetation, especially in dynamic environments, such as riparian zones. In this study, through the use of linear models, we present the relations between plant phenology and taxonomic, environmental, and structural variables in riparian ecosystems. Starting from a series of monthly Sentinel-2 images, we extracted four yearly phenological metrics (start and end of the season, production peak, and range) for the 2022-2025 period, and we considered 12 riparian vegetation formations, incorporating mature and pioneer phases, as well as native and exotic species. Composition explained the greatest proportion of variance for peak and range, while the weight of environmental factors was higher for the season start.* Reynoutria *sp. had the most distinct phenological values, which facilitates the early alert of invasive species. The more strictly-riparian formations (alder, ash, and willow) showed a prolonged growth season in comparison to more hillside-typical species. The implications of this work are an important basis for the characterization and modelling of riparian vegetation modelling in dynamic environments.*

***Keywords**: Land Surface Phenology, Sentinel-2, Riparian vegetation, Time series*

1. INTRODUCCIÓN

Los patrones fenológicos de la vegetación suponen una importante fuente de información sobre el comportamiento de los ecosistemas y su respuesta ante factores externos. Concretamente, en la vegetación de ribera la dimensión temporal juega un papel clave en un contexto de regímenes de caudal irregulares, procesos de cuenca acumulativos y gradientes ambientales (Naiman & Décamps, 1997). Por este motivo, la multitemporalidad es fundamental para estudiar la vegetación riparia (Huylenbroeck *et al*., 2020) y la disponibilidad de imágenes multiespectrales permite examinar periódicamente estos patrones mediante el análisis de series temporales. Esta aproximación (espectrofenología) ha sido ampliamente utilizada para describir interacciones ecológicas a grandes escalas espaciales y temporales (Dronova & Taddeo, 2022). En este aspecto, a pesar de los notables avances sobre la relación entre clima y fenología vegetal, es necesario explorar con mayor profundidad la influencia de factores no climáticos (Ma *et al*., 2022). Considerando que la

respuesta fenológica de la vegetación tiene causas ambientales y genéticas, la plasticidad fenológica de las formaciones puede variar en función de la especie o el grado de madurez (Vitasse *et al*., 2013). Por tanto, el objetivo del trabajo consiste en analizar las relaciones entre variables fenológicas, taxonómicas, ambientales y estructurales en formaciones vegetales de ribera, siendo el principal interés encontrar diferencias entre distintos tipos de formaciones.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se centró en las cuencas hidrográficas de la Comunidad Autónoma de Cantabria (Fig. 1), tratándose de una región montañosa con una gran variación altitudinal y una distinción biogeográfica entre las vertientes norte (clima oceánico húmedo templado) y sur (influencia mediterránea de interior). La delineación de la zona riparia se realizó bajo criterios geomorfológicos (inundación a 5 alturas de *bankfull*), incluyendo desde el cauce activo hasta las terrazas aluviales.

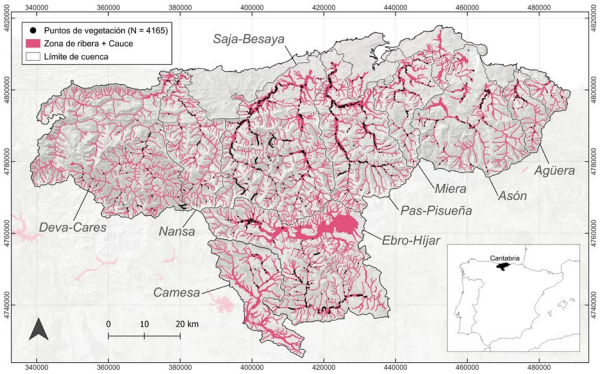


Figura 1. Zona de estudio.

2.2. Puntos de vegetación (composición)

Consideramos un total de 12 formaciones caducifolias (10 maduras y 2 pioneras) y generamos una serie de puntos georreferenciados distribuidos a lo largo de los principales gradientes ambientales (altitudinal, latitudinal y fluvial; Fig. 1) del territorio. Estos se obtuvieron a partir de cuatro campañas de campo (2016, 2017, 2019 y 2025) e interpretación de mapas y ortofotos (PNOA y Gobierno de Cantabria). Los puntos se etiquetaron en base a la especie dominante en el dosel en cada píxel: aliseda (*Alnus glutinosa*; n = 1383), chopera (*Populus* spp.; n = 983), fresneda (*Fraxinus excelsior*; n = 486), hayedo (*Fagus sylvatica*; n = 172), melojar (*Quercus pyrenaica*; n = 197), robledal (*Quercus robur*; n = 426), saucedas arbóreas (*Salix alba* y *S. atrocinerea*; n = 873) y saucedas arbustivas (*Salix cantabrica* y *S. eleagnos*; n = 530). Dada su extensión manifiesta en las riberas cantábricas, se añadieron dos especies exóticas: plátano de sombra (*Platanus* × *hispanica*; n = 281) y bambú japonés (*Reynoutria japonica*; n = 93). Asimismo, teniendo en cuenta la acusada dinámica temporal de algunos cauces (eventos periódicos de erosión y sucesión vegetal), se incorporaron formaciones en regeneración (pioneras) de *Reynoutria* (n = 144) y de saucedas arbustivas (n = 253).

2.3. Métricas fenológicas, estructurales y ambientales

Generamos una serie de Sentinel-2 (L2A) en *Google Earth Engine* para el período 2022-2025, aplicando filtros de nieve (*SCL* y 0.4 *NDSI*), nubes y sombras (*Cloud Score+*), calculando medias mensuales y rellenando huecos mediante interpolación lineal temporal. Tomamos el EVI (*Enhanced Vegetation Index*; Eq. 1) como indicador de actividad vegetal, principalmente por su desempeño en zonas de biomasa densa. Para el cálculo del inicio y final de la temporada de crecimiento nos basamos en el método del umbral (de Beurs & Henebry, 2009; Eq. 2).

$$EVI = 2.5 \cdot \left(\frac{NIR - RED}{NIR + 6 \cdot RED - 7.5 \cdot BLUE + 1}\right) \quad (1)$$

$$\mu = 0.5 \cdot (EVI_{95} - EVI_5) + EVI_5 \quad (2)$$

Para cada año, el inicio de temporada (*SoS*) se calculó como la proporción entre el valor de EVI en abril y el umbral de cada píxel. Asimismo, el final (*EoS*) es la proporción entre el EVI de octubre y el umbral. Estos meses corresponden a momentos clave en la foliación y senescencia típicas en Cantabria, de modo que las métricas identificarían puntos con activación temprana (*SoS* alto) o senescencia aplazada (*EoS* alto). La variable *Peak* es el promedio de EVI entre junio y agosto, período de máxima producción en la región. Finalmente, el rango anual (*Range*) es la diferencia entre *Peak* y el promedio de EVI en el período de dormancia (enero-febrero).

Adicionalmente, generamos una variable estructural (altura de vegetación; *H*; LiDAR, PNOA) y cuatro ambientales: altitud (*Alt*), condición de iluminación media (*IC*; a partir del ángulo zenital y azimutal de imágenes Sentinel-2); máxima temperatura del mes más cálido (*T*; WorldClim); y cuenca vertiente (*V*; Norte vs. Sur). Se añadió año (2022 a 2025) como predictora para considerar la posible variación fenológica interanual.

2.4. Análisis estadístico

Tomando como respuesta las métricas fenológicas (*SoS*, *EoS*, *Peak*, *Range*), generamos cuatro modelos lineales con las variables taxonómicas (formación), estructurales (*H*) y ambientales (*T*, *Alt*, *IC*, *V*), además del año. Las variables fueron normalizadas para facilitar la interpretación. Finalmente, estimamos la fracción de varianza explicada por cada tipo de predictora mediante un análisis de partición de varianza (regresiones parciales; función *varpart*, paquete *vegan*, R Core Team), usando los coeficientes de determinación ajustados (R^2).

3. RESULTADOS PRELIMINARES Y DISCUSIÓN

Todas las variables ejercieron influencia significativa sobre la fenología de las formaciones riparias (Fig. 2), explicando más de un 30 % (R^2) de la varianza de *SoS*, *Peak* y *Range*, así como un 7 % de *EoS*. Dado que los factores influyentes en el inicio y fin de temporada son distintos (Mei *et al*., 2021; Jiang *et al.*, 2023), la baja predictibilidad de *EoS* (Fig. 2-B) puede deberse a factores no considerados (p. ej., precipitación otoñal). Por el contrario, la variación de *SoS* muestra una relación ambiental más clara (Fig. 2-A).

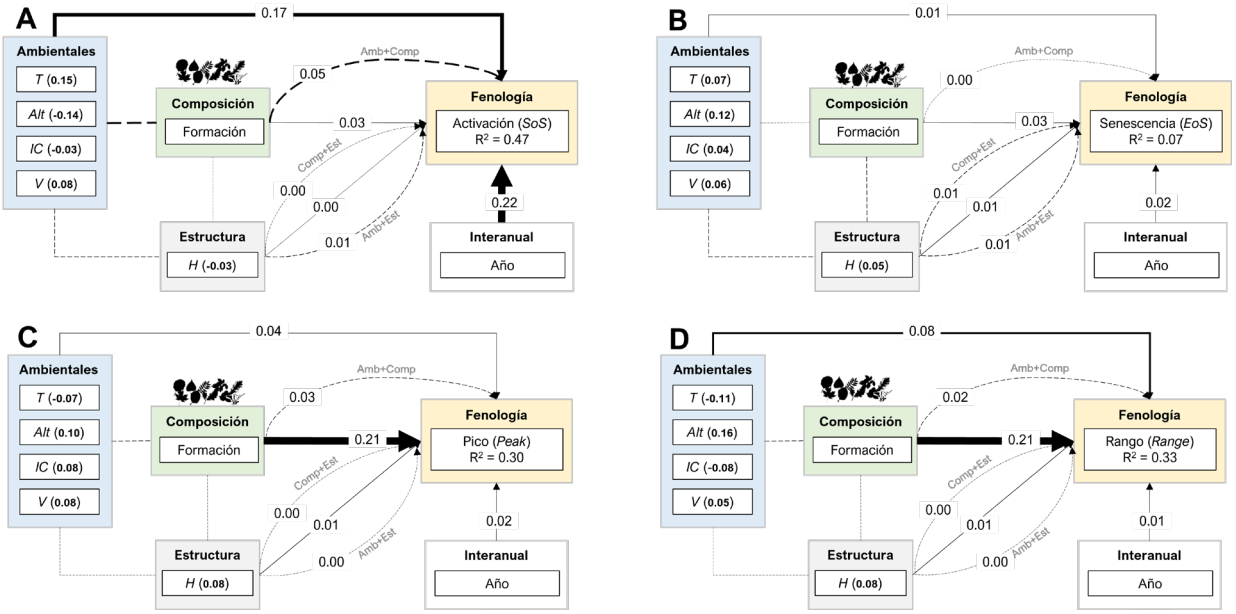


Figura 2. Relación entre variables ambientales, taxonómicas, estructurales y fenológicas (incluyendo variación interanual). R^2: proporción de varianza explicada para cada variable fenológica. Números sobre líneas: Partición de varianza para cada grupo de variables (proporcional al grosor de la fecha). Línea continua: Efecto único. Línea discontinua: Efecto mediado. Números entre paréntesis: Estima de cada variable continua en el modelo lineal (negrita = significativo, p-valor < 0.05).

El destacado efecto del año sobre *SoS* podría indicar una oscilación interanual fruto de variables no consideradas (p. ej., desviación meteorológica). En cuanto a la composición, por sí sola explicó un 3 % de la varianza de *SoS*, aunque compartiendo un 5 % con las variables ambientales. De este modo, los factores ambientales condicionan la composición de especies, lo que mediaría el efecto sobre la fenología. La influencia de la composición sobre *EoS* fue también reducida (3 %), siendo, no obstante, mayor que la del resto de las variables (Fig. 2-B). Por el contrario, el tipo de formación fue influyente sobre *Peak* y *Range*, con un efecto puro del 21 % en ambos casos (Fig. 2-C, D), por encima del ambiente (< 10 %). En relación con el efecto específico de cada variable ambiental, *SoS* mostró una correlación positiva con *T* y *V*, y negativa con *Alt* e *IC* (Fig. 2-A). Esto se ajusta a la hipótesis de que zonas bajas y cálidas, tienden a asociarse con una actividad fotosintética más temprana (Jiang *et al*., 2023; Stendardi *et al*., 2019). El papel de la estructura fue reducido, con una variación fenológica mínima en función de *H.*

Analizando las diferencias entre formaciones (Fig. 3), la *Reynoutria* destacó por su gran productividad estival (*Peak* alto) y su senescencia aplazada (*EoS* alto), en contraste con su activación tardía (*SoS* bajo). La productividad elevada en ecosistemas invadidos está descrita en la literatura (Rout & Callaway, 2009) y, precisamente, la segunda formación con mayor *Peak* fue la otra especie exótica (plátano). La *Reynoutria* también manifestó un *Range* excepcionalmente alto, ya que tiende a formar matas monoespecíficas densas cuya parte aérea se seca completamente en invierno (manteniendo el rizoma). Los valores elevados de *SoS* y *EoS* para el plátano sugieren una temporada de crecimiento prolongada, otro rasgo comúnmente observado en especies exóticas (Fridley, 2012).

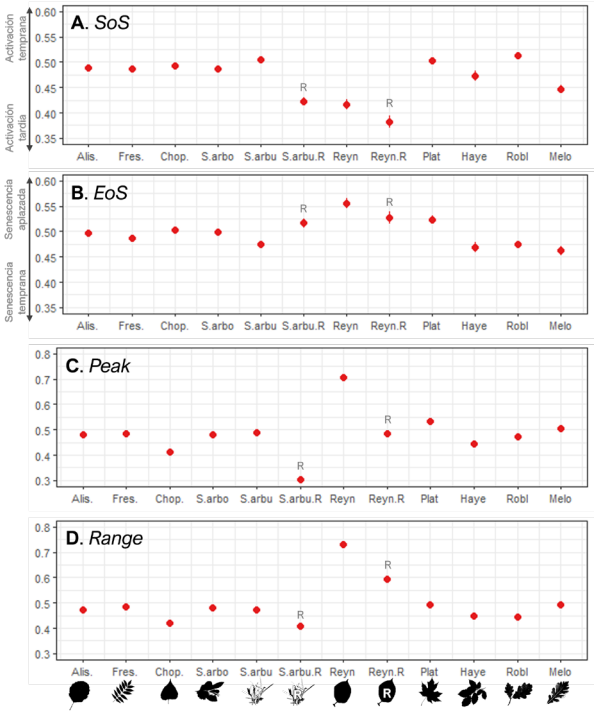


Figura 3. Media estimada con intervalo de confianza 95 % (eje y) de métricas fenológicas para cada formación vegetal. Letra "R": formación en regeneración.

Al comparar las formaciones maduras frente a sus equivalentes pioneras, los patrones fueron generalmente análogos para la regeneración natural (saucedas arbustivas) e invasora (*Reynoutria*). La vegetación pionera mostró una activación más tardía (*SoS* bajo) y un *Peak* y *Range* menor que la madura, sin embargo, en el caso de las saucedas, también tuvo una senescencia

más aplazada (*EoS* alto). Las formaciones típicamente riparias (alisedas, choperas, fresnedas y saucedas arbóreas) presentaron una época de crecimiento ligeramente más prolongada que formaciones más típicas de ladera (hayedos, melojares y robledales), estas últimas con un menor *SoS* (a excepción del robledal) y *EoS* (Fig. 3-A, B). Por otra parte, las diferencias de *Peak* y *Range* entre estas formaciones no fueron destacables (Fig. 3-C, D), con la salvedad de los valores relativamente bajos de las choperas.

4. CONCLUSIONES

En términos de aplicabilidad a la gestión, el comportamiento fenológico distintivo de una especie invasora como la *Reynoutria*, junto con la disponibilidad de imágenes Sentinel-2, supone una ventaja para estudiar su expansión en cauces, generando protocolos de alerta temprana. Asimismo, el uso de métricas fenológicas con datos anuales puede ser aplicado a la modelización de hábitats en ambientes dinámicos, como son los riparios, considerando tanto las formaciones maduras como las incipientes. Las herramientas disponibles y el elevado tamaño muestral (N = 4165) permitirían desarrollar modelos sofisticados con distintos tipos de variables en trabajos futuros. Un grupo de variables con gran potencial serían los rasgos (*traits*) funcionales de cada formación. Además, los datos LiDAR permiten generar variables estructurales más allá de la altura de la vegetación (con efecto mínimo en este trabajo), como la densidad o la diversidad de alturas. Finalmente, asumiendo que la plasticidad fenológica varía según la especie (Vitasse *et al.*, 2013), es procedente incorporar interacciones en los modelos, cuantificando el efecto de la composición en función del año o de valores ambientales propios de cada año.

Aunque la aproximación para el cálculo de *SoS* y *EoS* es computacionalmente sencilla y se ajusta a la fenología propia de Cantabria (foliación típica en abril y senescencia en octubre), la transferencia a otras regiones podría facilitarse mediante su cálculo como día juliano, así como empleando el mes de máximo EVI para determinar *Peak*. Las variables ambientales se corresponden con datos climáticos medios, pero sería conveniente aprovechar datos meteorológicos anuales para obtener resultados más precisos de la influencia ambiental, siendo las temperaturas de la fase de crecimiento más efectivas que los agregados (Körner, 2007). La variación interanual de *SoS* señala la necesidad de trabajar con variables ambientales específicas de cada momento. Además, la demostrada influencia de la temperatura en la fenología riparia puede suponer un riesgo para el funcionamiento de estos ecosistemas ante el cambio climático. Por tanto, el estudio de la fenología permite identificar las vulnerabilidades o grado de adaptación de la vegetación riparia ante cambios de regímenes de temperaturas. Estas consideraciones serán incorporadas en los futuros desarrollos más inmediatos.

5. REFERENCIAS

De Beurs, K. M., & Henebry, G. M. (2009). Spatio-Temporal Statistical Methods for Modelling Land Surface Phenology. En *Phenological Research* (pp. 177-208). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3335-2_9

Dronova, I., & Taddeo, S. (2022). Remote sensing of phenology: Towards the comprehensive indicators of plant community dynamics from species to regional scales. *Journal Of Ecology, 110*(7), 1460-1484. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13897

Fridley, J. D. (2012). Extended leaf phenology and the autumn niche in deciduous forest invasions. *Nature, 485*(7398), 359-362. https://doi.org/10.1038/nature11056

Huylenbroeck, L., Laslier, M., Dufour, S., Georges, B., Lejeune, P., & Michez, A. (2020). Using remote sensing to characterize riparian vegetation: A review of available tools and perspectives for managers. *Journal Of Environmental Management, 267*, 110652. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110652

Jiang, J., Yu, Q., Mickler, R. A., Tang, Q., Liang, T., Zhang, H., Song, K., & Wang, S. (2023). Forest Phenology under Differing Topographic Conditions: A Case Study of Changbai Mountain in Northeast China. *Forests, 14*(7), 1466. https://doi.org/10.3390/f14071466

Körner, C. (2007). The use of 'altitude' in ecological research. *Trends In Ecology & Evolution, 22(11)*, 569-574. https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.09.006

Ma, X., Zhu, X., Xie, Q., Jin, J., Zhou, Y., Luo, Y., Liu, Y., Tian, J., & Zhao, Y. (2022). Monitoring nature's calendar from space: Emerging topics in land surface phenology and associated opportunities for science applications. *Global Change Biology, 28*(24), 7186-7204. https://doi.org/10.1111/gcb.16436

Mei, L., Bao, G., Tong, S., Yin, S., Bao, Y., Jiang, K., Hong, Y., Tuya, A., & Huang, X. (2021). Elevation-dependent response of spring phenology to climate and its legacy effect on vegetation growth in the mountains of northwest Mongolia. *Ecological Indicators, 126*, 107640. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107640

Naiman, R. J., & Décamps, H. (1997). The Ecology of Interfaces: Riparian Zones. *Annual Review Of Ecology And Systematics, 28*(1), 621-658. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621

Rout, M. E., & Callaway, R. M. (2009). An invasive plant paradox. *Science, 324*(5928), 734-735. https://doi.org/10.1126/science.1173651

Stendardi, L., Karlsen, S. R., Niedrist, G., Gerdol, R., Zebisch, M., Rossi, M., & Notarnicola, C. (2019). Exploiting Time Series of Sentinel-1 and Sentinel-2 Imagery to Detect Meadow Phenology in Mountain Regions. *Remote Sensing, 11*(5), 542. https://doi.org/10.3390/rs11050542

Vitasse, Y., Hoch, G., Randin, C. F., Lenz, A., Kollas, C., Scheepens, J. F., & Körner, C. (2013). Elevational adaptation and plasticity in seedling phenology of temperate deciduous tree species. *Oecologia, 171(3)*, 663-678. https://doi.org/10.1007/s00442-012-2580-9

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.121

Cartografía forestal mediante datos multiespectrales de alta resolución y técnicas avanzadas de clasificación

Marcello Ruiz, Francisco Javier [1] **Eugenio González, Francisco** [1] **Mederos Barrera, Antonio** [1] **Gonzalo Martín, Consuelo** [2] **García Pedrero, Ángel Mario** [2] **Boumahdi, Meryeme** [2]

[1] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España

[2] Universidad Politécnica de Madrid, España

ORCID: Marcello Ruiz 0000-0002-9646-1017 Eugenio González 0000-0002-0010-4024 Mederos Barrera 0000-0003-1680-0726 Gonzalo Martín 0000-0002-0804-9293 García Pedrero 0000-0002-6848-481X Boumahdi 0000-0003-0600-8137

Correspondencia: javier.marcello@ulpgc.es francisco.eugenio@ulpgc.es antonio.mederos@ulpgc.es consuelo.gonzalo@upm.es angelmario.garcia@upm.es m.boumahdi@alumnos.upm.es

RESUMEN

La isla de La Palma presenta una elevada diversidad forestal como resultado de su compleja orografía, variedad climática y gradiente altitudinal, lo que hace imprescindible disponer de herramientas eficaces para la monitorización y gestión de sus ecosistemas forestales. En este contexto, la teledetección se posiciona como una herramienta clave para la clasificación y análisis de las formaciones forestales. Este trabajo evalúa la clasificación de la vegetación forestal arbolada de La Palma como paso previo al análisis de la salud de los distintos hábitats. Para ello, se emplearon datos multiespectrales de muy alta resolución del satélite WorldView-2, complementados con información de referencia procedente de cartografías oficiales y datos multiespectrales y LiDAR adquiridos mediante dron. Se definieron cinco clases principales de cobertura forestal y se comparó el rendimiento de distintos algoritmos de clasificación supervisada, incluyendo métodos clásicos, técnicas de aprendizaje máquina (Random Forest, SVM, etc.) y un modelo avanzado de aprendizaje profundo basado en transformers (SegFormer). Los resultados muestran que los clasificadores Random Forest y SVM ofrecen las mejores precisiones globales (superiores al 70%), especialmente cuando se combinan las bandas espectrales con índices de vegetación y variables topográficas. El modelo de aprendizaje profundo presenta un buen comportamiento general, aunque no supera cuantitativamente a los métodos de aprendizaje máquina, lo que exige incrementar la base de datos de entrenamiento del modelo. El estudio confirma el potencial de los datos multiespectrales y las técnicas basadas en inteligencia artificial para la cartografía forestal de alta precisión.

Palabras clave: *WorldView, clasificación forestal, Random Forest, Support Vector Machine, SegFormer*

Fecha de recepción: 5 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Cartografía forestal mediante datos multiespectrales de alta resolución y técnicas avanzadas de clasificación

Marcello Ruiz, Francisco Javier [(1)], Eugenio González, Francisco [(1)], Mederos Barrera, Antonio [(1)], Gonzalo Martín, Consuelo [(2)], García Pedrero, Ángel Mario [(2)], Boumahdi, Meryeme [(2)]

[(1)] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España.
0000-0002-9646-1017, javier.marcello@ulpgc.es.
0000-0002-0010-4024, francisco.eugenio@ulpgc.es.
0000-0003-1680-0726, antonio.mederos@ulpgc.es.

[(2)] Universidad Politécnica de Madrid, España.
0000-0002-0804-9293, consuelo.gonzalo@upm.es.
0000-0002-6848-481X, angelmario.garcia@upm.es.
0000-0003-0600-8137, m.boumahdi@alumnos.upm.es.

Resumen: La isla de La Palma presenta una elevada diversidad forestal como resultado de su compleja orografía, variedad climática y gradiente altitudinal, lo que hace imprescindible disponer de herramientas eficaces para la monitorización y gestión de sus ecosistemas forestales. En este contexto, la teledetección se posiciona como una herramienta clave para la clasificación y análisis de las formaciones forestales. Este trabajo evalúa la clasificación de la vegetación forestal arbolada de La Palma como paso previo al análisis de la salud de los distintos hábitats. Para ello, se emplearon datos multiespectrales de muy alta resolución del satélite WorldView-2, complementados con información de referencia procedente de cartografías oficiales y datos multiespectrales y LiDAR adquiridos mediante dron. Se definieron cinco clases principales de cobertura forestal y se comparó el rendimiento de distintos algoritmos de clasificación supervisada, incluyendo métodos clásicos (MD, MhD, P, SAM, ML, NB), técnicas de aprendizaje automático (KNN, RF, SVM) y un modelo avanzado de aprendizaje profundo basado en *transformers* (SegFormer). Los resultados muestran que los clasificadores Random Forest y SVM ofrecen las mejores precisiones globales (superiores al 70%), especialmente cuando se combinan las bandas espectrales con índices de vegetación y variables topográficas. El modelo de aprendizaje profundo presenta un buen comportamiento general, aunque no supera cuantitativamente a los métodos de aprendizaje automático, lo que exige incrementar la base de datos de entrenamiento del modelo. El estudio confirma el potencial de los datos multiespectrales y las técnicas basadas en inteligencia artificial para la cartografía forestal de alta precisión.

Palabras clave: WorldView, clasificación forestal, *Random Forest*, *Support Vector Machine*, SegFormer

Forest mapping using high-resolution multispectral data and advanced classification techniques

***Abstract**: La Palma exhibits a high level of forest diversity as a result of its complex topography, climatic variability, and altitudinal gradient, making the availability of effective tools for monitoring and managing its forest ecosystems essential. In this context, remote sensing emerges as a key tool for the classification and analysis of forest formations. This study evaluates the classification of forested vegetation in La Palma as a preliminary step toward assessing the health of different habitats. To this end, very high–resolution multispectral data from the WorldView-2 satellite were used, complemented by reference information from official cartography and multispectral and LiDAR data acquired by an unmanned aerial vehicle. Five forest cover classes were considered, and the performance of different supervised classification algorithms was compared, including classical methods (MD, MhD, P, SAM, ML, NB), machine learning techniques (KNN, RF, SVM), and an advanced deep learning model based on transformers (SegFormer). The results show that the Random Forest and SVM classifiers achieve the highest overall accuracies (above 70%), particularly when spectral bands are combined with vegetation indices and topographic variables. The deep learning model demonstrates good overall performance; however, it does not quantitatively outperform machine learning methods, highlighting the need to increase the size of*

the training dataset. This study confirms the potential of multispectral data and artificial intelligence–based techniques for high-precision forest mapping.

***Keywords**: WorldView, forest classification, Random Forest, Support Vector Machine, SegFormer*

1. INTRODUCCIÓN

La riqueza forestal de La Palma es uno de los elementos más emblemáticos de su patrimonio natural, resultado de la combinación de una geografía abrupta, un clima variado y una gran diversidad de pisos bioclimáticos sobre un pequeño territorio insular. Sin embargo, se ha visto seriamente afectada en los últimos años como consecuencia de incendios forestales, la erupción volcánica de Tajogaite (Carracedo *et al.*, 2022) y el efecto del cambio climático, que incrementa la frecuencia e intensidad de episodios de sequía, olas de calor y condiciones favorables para la proliferación de plagas, como la lagarta (*Calliteara fortunata*), que afecta al pinar canario. Todo ello hace imprescindible una monitorización continua del estado de la masa forestal. En este contexto, la teledetección se presenta como una herramienta especialmente útil para la clasificación y el seguimiento de las especies forestales de La Palma.

En este trabajo se evalúa la clasificación de la vegetación forestal arbolada de La Palma como paso previo para un análisis de la salud de cada tipo de hábitat forestal. Con el objetivo de discriminar las distintas formaciones forestales, se han usado datos multiespectrales de muy alta resolución procedentes del satélite WorldView. Se han comparado diferentes algoritmos de clasificación (Matyukira, 2024), incluyendo tanto métodos clásicos como clasificadores avanzados, evaluando su exactitud y fiabilidad en función de diferentes datos de entrada. Para el entrenamiento y el análisis de la precisión se han utilizado las cartografías existentes, así como datos multiespectrales y LiDAR captados desde un dron y abarcando zonas representativas en toda la isla.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La Palma, a pesar de tener una superficie de aproximadamente 706 km², presenta una gran altitud (2.423 metros). Por este motivo, la isla posee una amplia variedad de pisos bioclimáticos, algunos sometidos a la presencia de los alisios, lo que los hace más húmedos y lluviosos, y otros más secos como los del Sur y el Oeste insular. Estos pisos de vegetación contribuyen a la singularidad del ecosistema de la isla. Habitualmente, entre los 600 y 1000 metros de altitud se desarrolla la laurisilva, un bosque húmedo y fresco. Por encima de este piso aparece el fayal-brezal. A mayores altitudes, este bosque da paso al pinar canario, una formación fundamental para la protección del suelo frente a la erosión en zonas abruptas y acompañada de especies adaptadas a suelos volcánicos como el codeso y la retama. Además, en las medianías y el norte de la isla destaca la presencia de castañeros.

2.2. Datos

Dado que el objetivo de este trabajo consiste en generar un mapa con los tipos de vegetación forestal más representativos de la isla de La Palma, como paso previo, se han obtenido y revisado las cartografías existentes. Es de elevada importancia seleccionar la cartografía de referencia adecuada, ya que será pieza fundamental en el proceso de entrenamiento y evaluación de los modelos y resultados obtenidos. Específicamente, se han analizado las existentes, tanto a nivel insular, como regional, nacional y europeo, destacando las cartografías de vegetación del Gobierno de Canarias (2021), Cabildo de la Palma (PIOLP 2020), Mapa Forestal Español (2018), SIOSE de Alta Resolución (2017) y Corine Land Cover + BackBone (2021). Se seleccionó como cartografía de referencia el mapa de vegetación del Gobierno de Canarias, proporcionado por la empresa pública Cartográfica de Canarias GRAFCAN.

Respecto a los datos de teledetección, se han utilizado datos multiespectrales de alta resolución captados por el satélite WorldView-2 (WV-2). Este satélite dispone de 8 bandas multiespectrales con resolución espacial de 1,8 m y una resolución radiométrica de 11 bits. Para abarcar la isla completa se hizo el mosaico de escenas mayoritariamente captadas el 4 de mayo de 2024.

Además, para tener una referencia precisa para generar regiones de entrenamiento y evaluación, se obtuvieron datos dron en 43 parcelas de 9 ha. Se utilizó la plataforma DJI Matrice 300 RTK equipada con el sensor multiespectral MicaSense RedEdge-MX Dual de 10 bandas y con el sensor LiDAR Zenmuse L1 que permitió la obtención del modelo digital de elevación del terreno (MDT) y de la altura de la vegetación (CHM).

En la Figura 1 se muestran los datos utilizados para este trabajo y los datos dron para las 2 parcelas recuadradas.

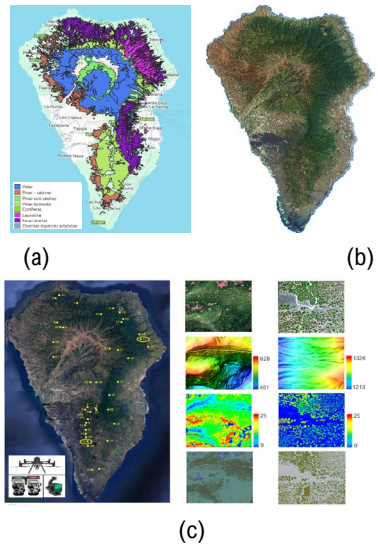


Figura 1. Datos utilizados: (a) Hábitats forestales más representativos (Gob. Canarias, 2021), (b) WorldView-2 del 4 de mayo 2024 (reflectancia en superficie), y (c) parcelas dron y ejemplos de datos multiespectrales, LiDAR (MDT y CHM en metros) y mapas clasificados.

2.3. Metodología de clasificación

En primer lugar, se aplicó una etapa de preprocesado, ya que las imágenes WorldView-2 captadas por plataformas espaciales sufren una serie de distorsiones, que deben ser corregidas para obtener valores precisos de reflectancia de la superficie terrestre. Se aplicó la corrección y calibración radiométrica, que ajusta los valores digitales del sensor y corrige el funcionamiento de los detectores; la corrección atmosférica, que compensa los efectos de absorción y dispersión en la atmósfera; y la corrección geométrica, que adapta la imagen a un sistema de coordenadas y proyección cartográfica. En este estudio, la corrección atmosférica se realizó mediante el modelo FLAASH, debidamente parametrizado para la fecha de captación y las condiciones locales de la escena. Además, para obtener la imagen ortorectificada se aplicaron los RPCs (*Rational Polynomial Coefficients*) junto con un modelo digital de elevación del terreno de alta resolución (Marcello *et al.*, 2021).

A continuación, se llevó a cabo una clasificación supervisada. Se consideraron seis clases de interés: coníferas, laurisilva, fayal-brezal, castaño, otras especies vegetales, y suelo desprovisto de vegetación, áreas urbanas y otras cubiertas. Las regiones de entrenamiento y evaluación se definieron a partir del mapa de vegetación y de los datos adquiridos con dron. Para cada clase, se seleccionaron 100.000 píxeles de entrenamiento y 10.000 píxeles de evaluación, procurando que las muestras fueran representativas y recogieran la variabilidad existente dentro de cada categoría. Asimismo, la separabilidad espectral entre pares de clases se evaluó mediante la distancia de Jeffries-Matusita (Xu *et al*., 2023).

Para la etapa de asignación se han abordado dos aproximaciones: (i) la primera basada en clasificadores supervisados clásicos y los basados en técnicas de inteligencia artificial de aprendizaje automático (*machine learning*) (Farnaz *et al*., 2025). Específicamente, se evaluaron 9 clasificadores siguientes: *Minimum Distance* (MD), *Mahalanobis Distance* (MhD), *Parallelepipeds* (P), *Spectral Angle Mapper* (SAM), *Maximum Likelihood* (ML), *Naïve Bayes* (NB), *K-Nearest Neighbors* (KNN), *Random Forest* (RF) y *Support Vector Machine* (SVM). (ii) la segunda aproximación basada en un clasificador avanzado de inteligencia artificial usando técnicas de aprendizaje profundo (*deep learning*). Se seleccionó el modelo SegFormer (Xie *et al*., 2021) (Figura 2), que consiste en una arquitectura *encoder–decoder* con *transformers* que combina un codificador jerárquico eficiente con un decodificador ligero, permitiendo capturar tanto detalles locales como contexto global en las imágenes. Destaca por su capacidad para manejar resoluciones altas y variabilidad espacial, logrando representaciones robustas sin necesidad de convoluciones pesadas.

Para mejorar los resultados obtenidos, además de utilizar las bandas espectrales se hizo una evaluación de la exactitud obtenida al añadir también las características derivadas de los datos satelitales (tales como el índice de vegetación WDRVI y la textura, específicamente la varianza) e información relativa a la topografía (modelo de elevación del terreno MDT, pendiente y orientación) y climatología (temperatura y precipitación).

3. RESULTADOS

3.1. Clasificadores basados en técnicas clásicas y de aprendizaje automático

En primer lugar, se identificó el clasificador supervisado que proporcionaba una mejor precisión al ser evaluado en 2 conjuntos de entradas: (1) MS: las 8 bandas multiespectrales del WV-2, y (2) Todas: 8 bandas + características derivadas (índice de vegetación y textura) y datos topográficos (MDT, pendiente y orientación). En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para los 9 clasificadores analizados.

Tabla 1. Exactitud de la clasificación para los 9 clasificadores y 2 combinaciones de datos de entrada.

Método	Datos	Precisión (%)						
		L	F-B	P	C	OV	S	Global
MD	MS	55,2	25,9	32,0	44,3	26,9	57,5	40,1
	Todas	56,2	25,5	32,2	82,4	12,0	55,0	43,1
MhD	MS	60,7	31,4	47,0	72,2	54,0	79,0	57,2
	Todas	57,2	33,9	48,7	76,1	20,2	72,1	50,5
P	MS	20,3	5,1	29,6	0,0	39,2	49,5	24,2
	Todas	16,8	24,8	19,6	14,1	32,9	8,9	18,9
SAM	MS	55,9	34,7	11,3	74,6	17,1	78,9	44,6
	Todas	58,8	33,1	33,7	92,2	3,1	75,3	48,1
ML	MS	71,9	42,0	67,9	92,0	62,9	87,2	70,4
	Todas	66,5	52,6	70,4	92,5	80,4	85,2	74,5
NB	MS	53,2	46,8	24,9	77,5	54,1	86,9	56,8
	Todas	47,4	70,2	47,1	84,1	73,6	79,5	66,6
KNN	MS	63,5	47,4	65,4	86,8	58,5	99,4	69,5
	Todas	60,8	48,1	74,4	86,1	80,6	97,6	74,4
RF	MS	72,8	49,5	75,8	91,5	70,3	99,0	**76,1**
	Todas	75,7	44,2	79,8	89,6	78,4	98,3	**77,5**
SVM	MS	73,7	49,5	71,1	89,3	65,0	98,3	74,1
	Todas	70,0	47,1	70,9	91,2	68,4	97,6	73,8

Clases: L: Laurisilva, F-B: Fayal-Brezal, P: Pinar, C: Castaño, OV: Otra Vegetación, S: Suelo-otro

SVM y RF son los dos algoritmos que proporcionan la mejor precisión. Tras el análisis previo se ha seleccionado el modelo Random Forest por su elevada precisión y mayor rapidez de cálculo. En segundo lugar, para este clasificador, se ha realizado un análisis más detallado en función de los datos de entrada. Se ha incorporado, adicionalmente, el mapa anual de precipitación acumulada (1975-2020) y el de temperatura media (1991-2020), disponibles en el Atlas Climático de Canarias para ver si con esta información climática se lograban mejorar los resultados de la clasificación. Los resultados son en general bastante similares para las diferentes combinaciones de entrada. Se aprecia que la textura apenas supone una mejora en la precisión, al igual que la inclusión de información de temperatura o precipitación, mientras que las bandas multiespectrales, junto con el índice de vegetación, la

pendiente y la orientación, obtienen una mejor precisión en las clases de interés (Figura 2).

3.2. Clasificador basado en técnicas de aprendizaje profundo

El mapa de los hábitats forestales más representativos obtenido mediante el modelo SegFormer, tras el ajuste fino con datos WorldView-2, se presenta en la Figura 2(b). Como se aprecia, los resultados son bastante similares al mapa de referencia, aunque los resultados cuantitativos obtenidos sobre las regiones de interés de test no mejoran a los modelos de aprendizaje automático (Tabla 2). El modelo de segmentación mostró un buen rendimiento general, con una fiabilidad aceptable en las coberturas dominantes (pinares, laurislva y fayal-brezal), aunque persisten dificultades en las clases minoritarias o espectralmente menos distintivas, como Otra Vegetación. Es, por tanto, necesario aumentar la base de datos de entrenamiento para mejorar las prestaciones de este clasificador.

Tabla 2. Evaluación de la exactitud global de la clasificación.

Clase	Precisión	Exhaustividad (Recall)	F1-Score
Laurisilva	0.57	0.94	0.71
Fayal-Brezal	0.65	0.83	0.73
Pinares	0.86	0.99	0.92
Castaño	0.99	0.50	0.67
Otra vegetación	0.00	0.00	0.00
Suelo y otros	0.51	0.8	0.65
Promedio	**0.60**	**0.69**	**0.61**

4. CONCLUSIONES

Este trabajo confirma la idoneidad de los datos multiespectrales de muy alta resolución, combinados con variables topográficas, para la cartografía detallada de las formaciones forestales de La Palma, un territorio caracterizado por una elevada heterogeneidad ambiental. La integración de distintas fuentes de información permite mejorar la discriminación entre hábitats y proporciona una representación más fiable de la distribución espacial de la vegetación forestal.

Los resultados evidencian que los métodos de aprendizaje automático, especialmente Random Forest y SVM, ofrecen un rendimiento sólido y estable frente a enfoques más complejos de aprendizaje profundo, que requieren una mayor base de datos para alcanzar su máximo potencial.

Estos resultados, pueden permitir hacer análisis multitemporales con datos Sentinel-2 del estado de la salud forestal, en función del hábitat seleccionado, y evidenciar el impacto tras los incendios, la erupción volcánica y las plagas forestales.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España, el Gobierno de Canarias y el Cabildo Insular de La Palma en el marco del proyecto “Estudio de los efectos de la erupción volcánica de La Palma sobre especies amenazadas y sus hábitats naturales” (ref. 316/2023/ACU) y por el Organismo Autónomo Parques Nacionales (Proyecto SPIP2022-02897). Agradecer la disponibilidad del MDT de alta resolución del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA_LiDAR).

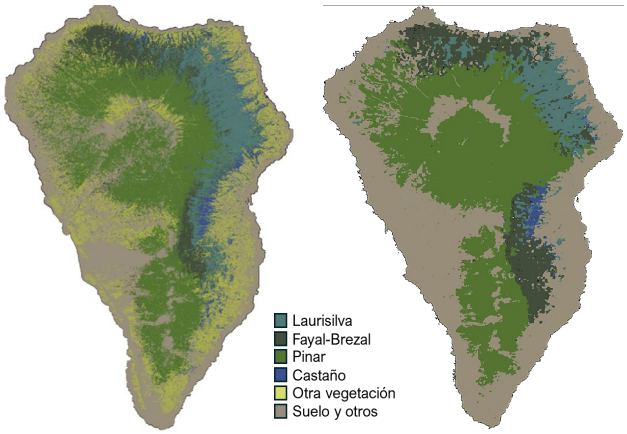


Figura 2. Cartografía de vegetación forestal: (a) Random Forest, y (b) SegFormer.

6. REFERENCIAS

Carracedo JC., et al. (2022). The 2021 eruption of the Cumbre Vieja volcanic ridge on La Palma. *Geology Today (38)*. http://doi.org/10.1111/gto.12388

Farnaz, Nuthammachot, N., & Ali, M.Z. (2025). Comparative study of multiple algorithms classification for land use and land cover change detection and its impact on local climate of Mardan District, Pakistan. *Environmental Challenges, (18)*. https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101069

Mapa de Vegetación del Gobierno de Canarias (2021). https://idecan2.grafcan.es/ServicioWMS/Vegetacion?

Marcello, J., Eugenio, F., Gonzalo-Martín, C., Rodríguez-Esparragón, D., & Marqués, F. (2021). Advanced Processing of Multiplatform Remote Sensing Imagery for the Monitoring of Coastal and Mountain Ecosystems. *IEEE Access, (9)*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3046657

Matyukira, C., Mhangara, P. (2024). Advances in vegetation mapping through remote sensing and machine learning techniques: a scientometric review. European *Journal of Remote Sensing, 57*(1). https://doi.org/10.1080/22797254.2024.2422330

Xie, E., Wang, W., Yu, Z., Anandkumar, A., Alvarez, J. M., & Luo, P. (2021). SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers. *Advances in Neural Information Processing Systems, (34)*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.15203

Xu, F., Xu, Z., Xu, C., & Yu, T. (2023). Automatic Extraction of the Spatial Distribution of Picea schrenkiana in the Tianshan Mountains Based on Google Earth Engine and the Jeffries–Matusita Distance. *Forests, 14*(7), 1373. https://doi.org/10.3390/f14071373

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.135

Evaluación del potencial de los modelos de Deep Learning para la clasificación de árboles a nivel de género utilizando datos LiDAR

Morales-Martín, Alejandro [1] **Mesas-Carrascosa, Francisco Javier** [2] **Pérez-Porras, Fernando** [2] **Vargas, Víctor Manuel** [1] **Moreno-Cano, Francisco** [1] **Gutiérrez, Pedro Antonio** [1]

[1] Universidad de Córdoba. Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial. Edif. Albert Einstein (C2)–3ª Planta. Campus de Rabanales Ctra. N-IV km. 396 C.P. 14071, Córdoba, España.

[2] Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática. Edif. Gregor Mendel (C5)–2ª Planta. Campus de Rabanales Ctra. N-IV km. 396 C.P. 14071, Córdoba, España.

ORCID: Morales-Martín 0000-0003-1133-237X Mesas-Carrascosa 0000-0002-5674-1292 Pérez-Porras 0000-0003-4263-2260 Vargas 0000-0002-0700-275X Moreno-Cano 0009-0004-8992-5938 Gutiérrez 0000-0002-2657-776X

Correspondencia: g52momaa@uco.es ig2mecaf@uco.es o12pepof@uco.es vvargas@uco.es i02mocaf@uco.es pagutierrez@uco.es

RESUMEN

La identificación y reconocimiento de especies forestales es crucial en el sector agroforestal para garantizar una gestión adecuada de los recursos naturales, promover la conservación de la biodiversidad, optimizar los servicios ecosistémicos y mejorar la productividad y sostenibilidad de los ecosistemas forestales. Los avances en Deep Learning (DL) han revolucionado esta tarea, permitiendo el procesamiento y el análisis de datos LiDAR aéreos y terrestres. En este contexto, el presente estudio evalúa el potencial de dos redes neuronales, PointNet y PointNet++, para clasificar individuos en áreas forestales donde coexisten principalmente tres géneros: Eucalyptus, Pinus y Quercus. Dos técnicas de muestreo efectivas (FPS y SMOTE) se aplicaron para determinar la densidad de puntos óptima por árbol. Los análisis estadísticos basados en Kolmogorov-Smirnov y la prueba t de Student revelaron que el número de puntos y la metodología óptimas fueron 1.024, 2.048 y 4.096, y PointNet++, respectivamente. Por lo tanto, la metodología propuesta servirá como base para futuros trabajos que requieran una clasificación precisa, tales como cambios en hábitat y ecosistemas, secuestro de carbono e inventarios forestales.

Palabras clave: *nube de puntos LiDAR, Deep Learning, clasificación de árboles, técnicas de muestreo.*

Fecha de recepción: 7 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 7 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación del potencial de los modelos de Deep Learning para la clasificación de árboles a nivel de género utilizando datos LiDAR

Morales-Martín, Alejandro [(1)], Mesas-Carrascosa, Francisco Javier [(2)], Pérez-Porras, Fernando [(2)], Vargas, Víctor Manuel [(1)], Moreno-Cano, Francisco [(1)], Gutiérrez, Pedro Antonio [(1)]

[(1)] Universidad de Córdoba. Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial., España.
0000-0003-1133-237X, g52momaa@uco.es ; 0000-0002-0700-275X, vvargas@uco.es.
0009-0004-8992-5938, i02mocaf@uco.es ; 0000-0002-2657-776X, pagutierrez@uco.es.

[(2)] Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática., España.
0000-0002-5674-1292, ig2mecaf@uco.es ; 0000-0003-4263-2260, o12pepof@uco.es.

Resumen: La identificación y reconocimiento de especies forestales es crucial en el sector agroforestal para garantizar una gestión adecuada de los recursos naturales, promover la conservación de la biodiversidad, optimizar los servicios ecosistémicos y mejorar la productividad y sostenibilidad de los ecosistemas forestales. Los avances en *Deep Learning* (DL) han revolucionado esta tarea, permitiendo el procesamiento y el análisis de datos LiDAR aéreos y terrestres. En este contexto, el presente estudio evalúa el potencial de dos redes neuronales, PointNet y PointNet++, para clasificar individuos en áreas forestales donde coexisten principalmente tres géneros: *Eucalyptus*, *Pinus* y *Quercus*. Dos técnicas de muestreo efectivas (FPS y SMOTE) se aplicaron para determinar la densidad de puntos óptima por árbol. Los análisis estadísticos basados en Kolmogorov-Smirnov y la prueba *t* de Student revelaron que el número de puntos y la metodología óptimas fueron 1.024, 2.048 y 4.096, y PointNet++, respectivamente. Por lo tanto, la metodología propuesta servirá como base para futuros trabajos que requieran una clasificación precisa, tales como cambios en hábitat y ecosistemas, secuestro de carbono e inventarios forestales.

Palabras clave: nube de puntos LiDAR, *Deep Learning*, clasificación de árboles, técnicas de muestreo.

Assessment of the potential of Deep Learning models for tree classification at genus level using LiDAR data

***Abstract**: Identifying and recognizing forest tree species is important in the agroforestry sector to ensure proper management of natural resources, promote biodiversity conservation, optimize ecosystem services, and ameliorate productivity and sustainability of forest ecosystems. Advances in Deep Learning (DL) have revolutionized this task, allowing the processing and analysis of aerial and terrestrial LiDAR data. In this context, this study assesses the potential of two neural networks, PointNet and PointNet++, to classify trees in forest areas where three main genera coexist: Eucalyptus, Pinus, and Quercus. Two effective sampling techniques (FPS and SMOTE) were applied to determine the optimal point density per tree. Statistical analyses based on Kolmogorov-Smirnov and Student's t-test revealed that the optimal number of points and methodology were 1,024, 2,048, and 4,096, and PointNet++, respectively. Thus, the proposed methodology will serve as a basis for future work requiring accurate classification, such as changes in habitat and ecosystems, carbon sequestration, and forest inventories.*

***Keywords**: LiDAR point cloud, Deep Learning, tree classification, sampling techniques.*

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de detección y rango de luz (LiDAR) se ha consolidado como una herramienta clave para la adquisición precisa de información tridimensional del entorno. En paralelo, los avances recientes en el campo de la Inteligencia Artificial, y en particular del *Deep Learning* (DL), han proporcionado metodologías eficaces para la clasificación y segmentación automática de nubes de puntos 3D (Qi *et al*., 2017a; Qi *et al*., 2017b). En el sector agroforestal, el LiDAR permite caracterizar los ecosistemas forestales, su estructura y composición, gracias a su despliegue desde plataformas terrestres, móviles y aéreas (Wang & Menenti, 2021). Estos sistemas permiten una descripción precisa de la geometría de las copas, la distribución vertical de la vegetación y la estructura forestal interna, constituyendo una herramienta importante para la gestión forestal, la estimación de la biomasa, el inventario forestal y el monitoreo ecológico (Allen *et al*., 2023). La creciente disponibilidad del escáner láser aerotransportado (ALS) ha permitido la expansión de estos análisis a áreas de gran escala, manteniendo la suficiente resolución como para llevar a cabo estudios a nivel de árbol individual y la caracterización de sus atributos estructurales individuales.

A pesar de los avances en esta línea de investigación, la clasificación de árboles en áreas forestales sigue siendo un desafío ya que tradicionalmente se ha hecho por métodos geométricos y estadísticos diseñados para caracterizar masas forestales o estructuras globales, los cuales resultan limitados cuando se pretende discriminar y clasificar árboles a nivel individual (Fassnacht *et al*., 2016). La alta heterogeneidad en la densidad de puntos LiDAR presente en cada árbol dificulta la extracción de características y patrones complejos en los modelos de DL de forma estandarizada. Por ello, es indispensable el uso de diferentes técnicas de muestreo que, sin alterar la información geométrica y espacial de la muestra, solucionen este problema para el uso y aplicación de DL.

Por tanto, los objetivos de este trabajo son: (1) evaluar el potencial de las redes neuronales PointNet y PointNet++ en la clasificación de árboles a nivel de género y (2) determinar y validar la densidad de puntos sintéticos óptima por árbol requerida en dichas redes neuronales mediante dos técnicas de muestreo: *Farthest Point Sampling* (FPS) y *Synthetic Minority Oversampling Technique* (SMOTE).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y adquisición datos LiDAR

Las nubes de puntos LiDAR empleadas fueron generadas a partir del vuelo realizado el 18 de febrero de 2018 en la provincia de Lugo, España (Fig. 1). Para ello, se utilizó un helicóptero tripulado (Eurocopter AS-350 B2), equipado con un escáner láser terrestre de alto rendimiento (RIEGL modelo VQ-480i) y una cámara óptica (Phase One).

La Figura 2 ilustra a modo de esquema el flujo de trabajo seguido en este estudio. Tras adquirir las nubes de puntos 3D, se delimitaron las áreas de interés correspondientes a los géneros objeto de estudio (*Eucalyptus*, *Pinus* y *Quercus*) mediante fotointerpretación gracias a las ortofotos generadas en el mismo vuelo. Posteriormente, se realizó la segmentación de árboles, un paso esencial porque PointNet y PointNet++ están diseñados para procesar objetos discretos individuales.

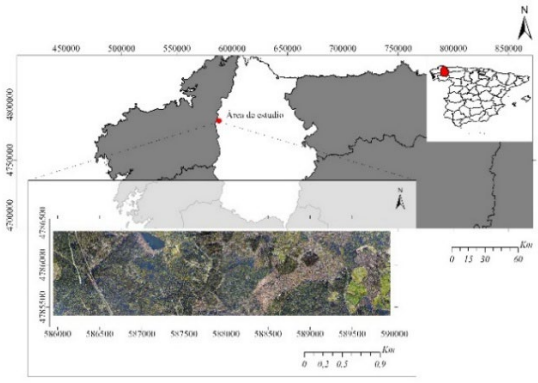


Figura 1. Área de estudio (ETRS89/UTM zona 29N).

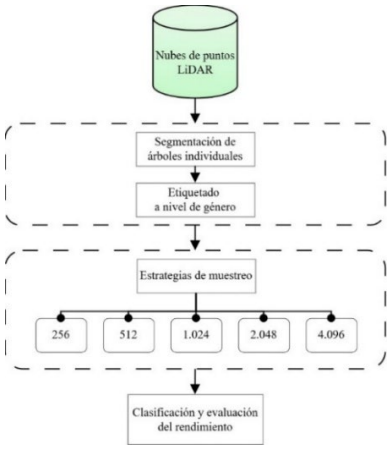


Figura 2. Proceso para la clasificación de árboles a nivel de género.

En primer lugar, los datos LiDAR fueron sometidos a un preprocesado (eliminación de ruido, filtrado de puntos de suelo y normalización) y, posteriormente, una segmentación de árboles individuales mediante el paquete *lidR* de R (Roussel *et al*., 2020). Para la segmentación de los árboles se usó algoritmo de Dalponte y Coomes (2016), los cuales se refinaron y etiquetaron manualmente con CloudCompare (https://www.cloudcompare.org/).

Una vez aisladas las copas de los árboles individuales para disponer de ellas como verdad terreno, cada árbol segmentado recibió una etiqueta taxonómica a nivel de género mediante clasificación supervisada. En total, se extrajeron 2.849 árboles del área de estudio, incluyendo cada uno de los géneros dominantes: *Eucalyptus* (779 árboles), *Pinus* (1.134 árboles) y *Quercus* (937 árboles). En el caso de *Quercus*, en la zona de vuelo sólo había presencia de especies dominantes caducifolias. Este conjunto de datos se dividió de manera estratificada en entrenamiento (60%), validación (20%) y test (20%), respectivamente.

2.2. Estrategias de muestreo

Dado que PointNet y PointNet++ (Qi *et al*., 2017a; Qi *et al*., 2017b) requieren un número fijo de puntos por árbol, se emplearon dos técnicas de muestreo, FPS (Qi *et al*., 2017b) y SMOTE (Kovács, 2019). Las densidades medias de puntos por árbol fueron 350 (*Eucalyptus*), 2.500 (*Pinus*) y 3.000 (*Quercus*). Se usó SMOTE para incrementar la densidad y FPS en los casos que hubo que reducir dicha métrica. Para evaluar cómo las variaciones en el tamaño de la muestra afectan la precisión y confiabilidad de la clasificación, este estudio probó cinco densidades diferentes: 256, 512, 1.024, 2.048 y 4.096 puntos por árbol. Mientras que el algoritmo FPS reduce uniformemente el número de puntos, el algoritmo SMOTE lo aumenta mediante la selección de los puntos vecinos más cercanos de cada punto minoritario y la interpolación de nuevas coordenadas en el espacio tridimensional (Fig. 3).

Estos conjuntos se utilizaron como entradas de los dos modelos de DL basados en puntos. Finalmente, se evaluó el rendimiento de cada uno para determinar qué combinación de modelo y tamaño de muestreo logra los mejores resultados de clasificación.

La metodología propuesta se implementó en PyTorch Lightning utilizando el método de retención, con 20 ejecuciones independientes y 20 semillas distintas. El proceso de entrenamiento consistió en 100 épocas, con un tamaño de lote de 32. Además, se empleó el método de optimización Adam con una tasa de aprendizaje de 0,001 (Kingma & Ba, 2015).

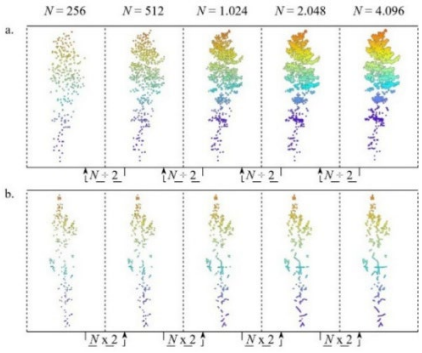


Figura 3. Resultado de la aplicación de los algoritmos de muestreo FPS (a) y SMOTE (b).

Finalmente, se aplicaron distintas métricas de evaluación con el fin de comparar y analizar cuantitativamente el rendimiento de cada modelo:

$$Accuracy = \frac{\mathrm{TP} + \mathrm{TN}}{\mathrm{TP} + \mathrm{FP} + \mathrm{FN} + \mathrm{TN}} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP} + \mathrm{FP}} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP} + \mathrm{FN}} \quad (3)$$

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

donde TP representa los verdaderos positivos, TN los verdaderos negativos, FP los falsos positivos y FN los falsos negativos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se emplearon los análisis estadísticos de Kolmogorov-Smirnov y la prueba *t* de Student para evaluar el efecto de la densidad de puntos en PointNet y PointNet++. Como se muestra en la Figura 4, se observaron diferencias significativas en el rendimiento promedio de todas las métricas descritas, influenciadas por el número de puntos (256, 512, 1.024, 2.048 y 4.096) y la metodología escogida (PointNet y PointNet++). Como resultado, el número de puntos y la metodología óptimos resultaron ser 1.024, 2.048 y 4.096 y PointNet++, respectivamente, en los cuales no se observaron diferencias significativas entre ellos.

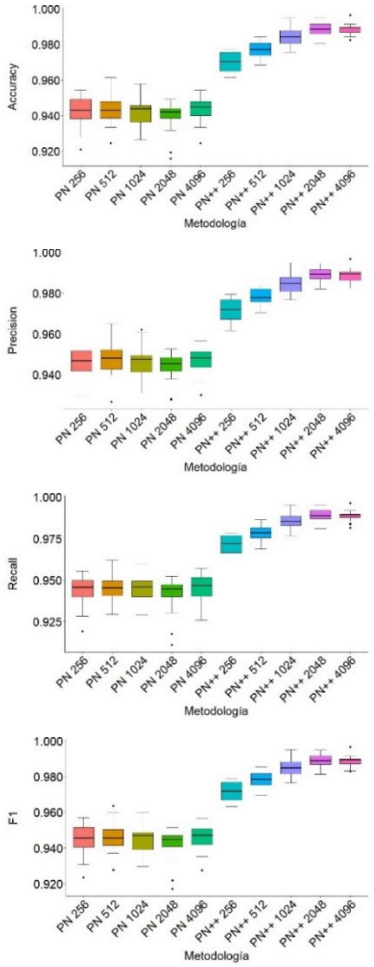


Figura 4. Efecto de la densidad de puntos en PointNet (PN) y PointNet++ (PN++).

Asimismo, en la Figura 5 se muestran las matrices de confusión de PointNet y PointNet++ para 1.024 puntos. Al utilizar la red neuronal de PointNet++, se predijeron con alta fiabilidad las tres clases (*Eucalyptus*, *Pinus* y *Quercus*), obteniendo una exactitud global del 98,7%. Esto demuestra que las técnicas de generación de datos sintéticos, son óptimas para un uso previo a la clasificación con redes neuronales basadas en nubes de puntos.

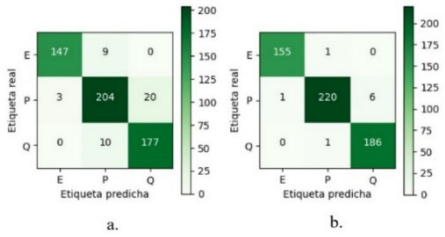


Figura 5. Matrices de confusión de las redes neuronales PointNet (a) y PointNet++ (b).

Otros autores han empleado diversas técnicas de submuestreo en datos LiDAR, *e.g.*, FPS, K-means, muestreo aleatorio, muestreo en cuadrículas uniformes y muestreo en cuadrículas no uniformes, siendo FPS la opción más adecuada según Liu *et al*. (2022). No obstante, el uso de técnicas de sobremuestreo es poco frecuente, ya que la mayoría de los estudios previos trabajan con nubes de puntos LiDAR de alta densidad o con otros algoritmos que no necesitan una densidad fija de puntos por árbol. Por lo tanto, si la densidad de la nube de puntos LiDAR es baja, conviene utilizar la metodología propuesta para aumentarla y disponer de un número mínimo de puntos para la clasificación de especies.

En relación con el tamaño de la muestra, para este tipo de problema es innecesario considerar más de 1.024 puntos. Estos resultados contrastan con los reportados en otros estudios, que recomiendan el muestreo de 2.048 puntos por árbol (Liu *et al*., 2022; Fan *et al*., 2023). Esta discrepancia podría explicarse por la baja densidad observada en los árboles del género *Eucalyptus*, lo que hizo necesario aplicar técnicas de sobremuestreo para generar puntos sintéticos. Según estos investigadores, el incremento del número de puntos en la muestra no conlleva una mejora significativa en la precisión de clasificación del modelo y, en la mayoría de los casos, conduce al sobreajuste. Por todo ello, la selección de un tamaño de muestra óptimo permite preservar la geometría del árbol, al tiempo que se controlan los requisitos computacionales y de memoria.

4. CONCLUSIONES

Gracias a la utilización de las técnicas de muestreo, se optimizaron las redes neuronales de PointNet y PointNet++ para la clasificación de árboles en entornos complejos como son las áreas forestales. La metodología propuesta sirve como base de futuros trabajos forestales que requieran una clasificación precisa del arbolado.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Estatal de Investigación (AEI), del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (PID2023-150663NB-C22/AEI/10.13039/501100011033); la Comisión Europea, proyecto *Test and Experiment Facilities for the Agri-Food Domain*, AgriFoodTEF (DIGITAL-2022-CLOUD-AI-02, 101100622) y la Cátedra Internacional ENIA de Inteligencia Artificial y Agricultura (TSI-100921-2023-3). Alejandro Morales es investigador pre-doctoral FPU (FPU21/03433).

6. REFERENCIAS

Allen, M. J., Grieve, S. W., Owen, H. J., & Lines, E. R. (2023). Tree species classification from complex laser scanning data in Mediterranean forests using deep learning. *Methods in Ecology and Evolution*, *14*(7), 1657-1667. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13981.

Dalponte, M., Coomes, D.A. (2016). Tree-centric Mapping of Forest Carbon Density from Airborne Laser Scanning and Hyperspectral Data. *Methods in Ecology and Evolution*, *7*, 1236-1245. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12575.

Fan, Z., Wei, J., Zhang, R., & Zhang, W. (2023). Tree Species Classification Based on PointNet++ and Airborne Laser Survey Point Cloud Data Enhancement. *Forests*, *14*(6), 1246. https://doi.org/10.3390/f14061246.

Fassnacht, F. E., Latifi, H., Stereńczak, K., Modzelewska, A., Lefsky, M., Waser, L. T., ... & Ghosh, A. (2016). Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, *186*, 64-87 https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.013.

Kingma, D. P., Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. En *3rd International Conference for Learning Representations*. San Diego.

Kovács, G. (2019). An empirical comparison and evaluation of minority oversampling techniques on a large number of imbalanced datasets. *Applied Soft Computing*, *83*, 105662. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105662.

Liu, B., Chen, S., Huang, H., & Tian, X. (2022). Tree Species Classification of Backpack Laser Scanning Data Using the PointNet++ Point Cloud Deep Learning Method. Remote Sensing, 14(15), 3809. https://doi.org/10.3390/rs14153809.

Qi, C.R., Su, H., Mo, K., Guibas, L. (2017a). PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation. En 2017 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 77-85). Honolulu, HI, USA.

Qi, C.R., Yi, L., Su, H., Guibas, L.J. (2017b). PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space. En I. Guyon., U. Von Luxburg., S. Bengio., H. Wallach., R. Fergus., S. Vishwanathan., R. Garnett., (Eds), *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)* (pp. 5099-5108).

Roussel, J.R., Auty, D., Coops, N.C., Tompalski, P., Goodbody, T.R., Meador, A.S., Bourdon, J.F.,de Boissieu, F., Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*, *251*, 112061. http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061.

Wang, Z., & Menenti, M. (2021). Challenges and opportunities in Lidar remote sensing. Frontiers in *Remote Sensing*, *2*, 641723. https://doi.org/10.3389/frsen.2021.641723.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.136

Evaluación de la combinación de variables dasométricas y de teledetección en la predicción de la vecería en Pinus pinea L. mediante Machine Learning

Morales-Martín, Alejandro [1] **Torres-Sánchez, Jorge** [2] **Vázquez-Piqué, Javier** [3] **Mesas-Carrascosa, Francisco Javier** [2] **Gutiérrez, Pedro Antonio** [1] **Montoro Girona, Miguel** [3,4] **Pardos, Marta** [5] **Calama, Rafael** [5]

[1] Universidad de Córdoba. Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial. Edif. Albert Einstein (C2)–3ª Planta. Campus de Rabanales Ctra. N-IV km. 396 C.P. 14071, Córdoba, España.

[2] Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática. Edif. Gregor Mendel (C5)–2ª Planta. Campus de Rabanales Ctra. N-IV km. 396 C.P. 14071, Córdoba, España.

[3] Universidad de Huelva. Departamento de Ciencias Agroforestales. Avda. Fuerzas Armadas S/N. C.P. 21007, Huelva, España.

[4] Groupe de Recherche en Écologie de la MRC Abitibi (GREMA), Forest Research Institute (IRF), Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), 341 Rue Principale Nord, Amos, Québec J9T 2L8, Canada.

[5] Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR-INIA), CSIC, Ctra. de la Coruña km 7,5 C.P. 28040, Madrid, España.

ORCID: Morales-Martín 0000-0003-1133-237X Torres-Sánchez 0000-0003-1420-0145 Vázquez-Piqué 0000-0002-7133-4142 Mesas-Carrascosa 0000-0002-5674-1292 Gutiérrez 0000-0002-2657-776X Montoro Girona 0000-0002-6916-3639 Pardos 0000-0002-5567-5406 Calama 0000-0002-2598-9594

Correspondencia: g52momaa@uco.es o22tosaj@uco.es jpique@uhu.es ig2mecaf@uco.es pagutierrez@uco.es miguel.montoro@uqat.ca pardos@inia.csic.es rcalama@inia.csic.es

RESUMEN

Uno de los principales desafíos en la estimación cuantitativa de la producción de fruto es la elevada variabilidad interanual que presentan numerosas especies leñosas, como el pino piñonero (Pinus pinea L.). Discriminar entre parcelas en producción y sin producción de piña a lo largo de los años resulta complejo, ya que los factores que intervienen no están completamente esclarecidos. Este estudio analiza la influencia de incorporar variables obtenidas mediante teledetección a las variables dasométricas tradicionalmente empleadas en la modelización de la producción de piña. Para ello, se evaluaron tres combinaciones de variables: dasométricas (SD), índices de vegetación (SIV) y su combinación (ST). Con dichos conjuntos de datos se desarrollaron modelos de clasificación binaria usando Random Forest (RF) y XGBoost (XGB). Los resultados muestran que ST con XGB ofrece el mejor rendimiento, alcanzando un F1 (media armónica de Precision y Recall) del 67,6%. En futuros estudios es conveniente incorporar los índices de vegetación como predictores relevantes en la clasificación de parcelas en producción de piña.

Palabras clave: *imágenes de satélite, índices de vegetación, modelo predictivo, clasificación binaria.*

Fecha de recepción: 7 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 7 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación de la combinación de variables dasométricas y de teledetección en la predicción de la vecería en Pinus pinea L. mediante Machine Learning

Morales-Martín, Alejandro [(1)], Torres-Sánchez, Jorge [(2)], Vázquez-Piqué, Javier [(3)], Mesas-Carrascosa, Francisco Javier [(2)], Gutiérrez, Pedro Antonio [(1)], Montoro Girona, Miguel [(3,4)], Pardos, Marta [(5)], Calama, Rafael [(5)]

[(1)] Universidad de Córdoba. Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial, España.
0000-0003-1133-237X, g52momaa@uco.es; 0000-0002-2657-776X, pagutierrez@uco.es.

[(2)] Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática., España.
0000-0003-1420-0145, o22tosaj@uco.es; 0000-0002-5674-1292, ig2mecaf@uco.es

[(3)] Universidad de Huelva. Departamento de Ciencias Agroforestales., España.
0000-0002-7133-4142, jpique@uhu.es

[(4)] Groupe de Recherche en Écologie de la MRC Abitibi (GREMA), Forest Research Institute (IRF), Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) Nord, Amos, Québec J9T 2L8, Canada.
0000-0002-6916-3639, miguel.montoro@uqat.ca

[(5)] Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR-INIA), CSIC, 5 C.P. 28040, España.
0000-0002-5567-5406, pardos@inia.csic.es; 0000-0002-2598-9594, rcalama@inia.csic.es

Resumen: Uno de los principales desafíos en la estimación cuantitativa de la producción de fruto es la elevada variabilidad interanual que presentan numerosas especies leñosas, como el pino piñonero (*Pinus pinea* L.). Discriminar entre parcelas en producción y sin producción de piña a lo largo de los años resulta complejo, ya que los factores que intervienen no están completamente esclarecidos. Este estudio analiza la influencia de incorporar variables obtenidas mediante teledetección a las variables dasométricas tradicionalmente empleadas en la modelización de la producción de piña. Para ello, se evaluaron tres combinaciones de variables: dasométricas (S_D), índices de vegetación (S_{IV}) y su combinación (S_T). Con dichos conjuntos de datos se desarrollaron modelos de clasificación binaria usando *Random Forest* (RF) y *XGBoost* (XGB). Los resultados muestran que S_T con XGB ofrece el mejor rendimiento, alcanzando un *F1* (media armónica de *Precision* y *Recall*) del 67,6%. En futuros estudios es conveniente incorporar los índices de vegetación como predictores relevantes en la clasificación de parcelas en producción de piña.

Palabras clave: imágenes de satélite, índices de vegetación, modelo predictivo, clasificación binaria.

Evaluation of the combination of dasometric and remote sensing variables in the prediction of Pinus pinea L. plots with cone production using Machine Learning

***Abstract**: One of the main challenges in the quantitative estimation of fruit production is the high interannual variability exhibited by numerous woody species, such as stone pine (Pinus pinea L.). Discriminating between plots in production and without cone production over the years is complex, as the factors involved are not completely understood. This study analyzes the influence of incorporating variables obtained through remote sensing to the dasometric variables traditionally used in modeling cone production. To this end, three combinations of variables were evaluated: dasometric (S_D), vegetation indices (S_{IV}), and their combination (S_T). With these datasets, binary classification models were developed using Random Forest (RF) and XGBoost (XGB). The results show that S_T with XGB offers the best performance, achieving an F1 (harmonic mean of Precision and Recall) of 67.6%. In future studies, it is advisable to incorporate vegetation indices as relevant predictors in the classification of plots in cone production.*

***Keywords**: satellite images, vegetation indices, predictive model, binary classification.*

1. INTRODUCCIÓN

La producción de fruto en numerosas especies leñosas se caracteriza por episodios de fructificación altamente variables. En particular, el pino piñonero (*Pinus pinea* L.), especie característica de la cuenca mediterránea, muestra una marcada irregularidad en la producción anual de piña, alternando años de alta producción y años con escasa o nula fructificación (Montero *et al*., 2008). Esta variabilidad se ve además acentuada por su capacidad para crecer bajo condiciones ambientales limitantes, como suelos arenosos y climas continentales extremos (Calama *et al*., 2011). Como consecuencia, se genera una elevada incertidumbre en la planificación y gestión de este recurso forestal no maderero de alto valor económico, lo que hace necesario disponer de herramientas que permitan anticipar la ocurrencia de la producción a una escala espacial y temporal relevantes para su gestión (Scarascia-Mugnozza *et al*., 2000). Así, discernir entre parcelas en producción y sin producción de piñas es un paso inicial fundamental para la estimación cuantitativa de la producción anual.

Aunque en las últimas décadas se han desarrollado numerosos modelos para explicar la variabilidad espacial de la producción de piña a distintas escalas (Calama *et al.*, 2008; Calama *et al.*, 2011), integrándose incluso en modelos de crecimiento y producción como PINEA2 (Calama *et al.*, 2007), la descripción y modelización explícita de los patrones que afectan a la producción sigue siendo un desafío.

Paralelamente, la integración de imágenes Landsat con mediciones en campo ha demostrado ser una herramienta muy eficaz para estudiar los ecosistemas forestales, al proporcionar información única y objetiva a múltiples escalas, difícil de alcanzar por otros medios. Índices de vegetación (IV) como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI), y los índices normalizados de áreas quemadas (NBR y NBR_2) (Henrich *et al*., 2012) permiten capturar las variaciones en la actividad fotosintética, el contenido hídrico y el estado estructural de la vegetación, aspectos estrechamente relacionados con los procesos productivos y reproductivos de las especies forestales (Long *et al*., 2023).

Este estudio pretende analizar el comportamiento de estos cuatro IVs en la clasificación de parcelas con y sin producción de piña y evaluar el rendimiento de dos algoritmos de *Machine Learning* (ML) utilizando como datos de entrada los datos de campo (variables dasométricas), los IVs y su combinación. La hipótesis de partida es que el uso de IVs derivados de imágenes Landsat permiten clasificar entre parcelas en producción y sin producción de piña con buenos niveles de precisión.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

En otoño de 1995 se instaló en la provincia de Valladolid, España (Fig.1) una red de 140 parcelas de muestreo en rodales coetáneos de pino piñonero para desarrollar modelos de crecimiento y rendimiento de madera y piña (Calama *et al*., 2008). Estas parcelas son circulares, de tamaño variable, con 20 árboles cada una.

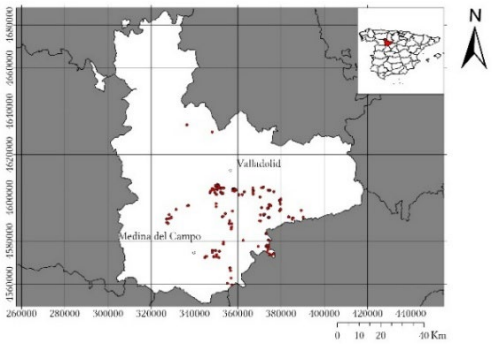


Figura 1. Localización de las parcelas de muestreo de *Pinus pinea* L. en la provincia de Valladolid (ETRS89/UTM zona 30N).

2.2. Compilación de datos

La Figura 2 ilustra a modo de esquema el flujo de trabajo seguido en este estudio.

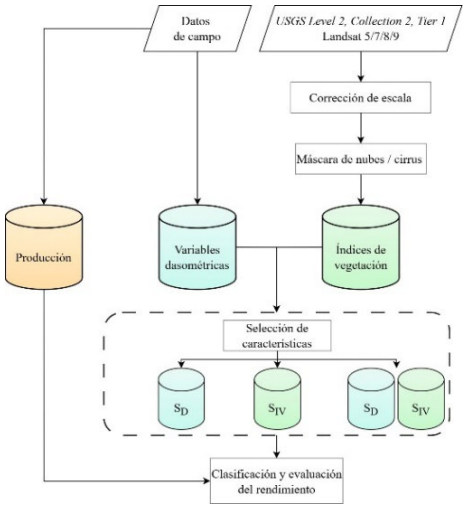


Figura 2. Proceso para la clasificación de parcelas en producción y sin producción de piña.

Se utilizaron dos tipos de datos: las variables dasométricas obtenidas de mediciones *in situ* y los IVs derivados de imágenes Landsat. Para evaluar la influencia de los IVs en la clasificación de parcelas con y sin producción de piña, se utilizaron tres combinaciones de variables: (i) exclusivamente variables dasométricas (S_D), (ii) exclusivamente IVs (S_{IV}) y (iii) fusión de las variables dasométricas y los IVs (S_T). Para hacer una clasificación supervisada es necesario definir las clases presentes, en este caso «no producción» y «producción»; para ello, se etiquetaron las parcelas de acuerdo con los datos de producción como verdad terreno: «producción», cuando al menos un árbol dentro de la parcela produce piña, y «no producción», si ningún árbol presenta producción. Una vez etiquetadas las parcelas, se clasificaron mediante dos algoritmos de ML: *Random Forest* (RF) y *XGBoost* (XGB). Finalmente, se calculó la matriz de confusión y sus métricas derivadas

de evaluación (*Precision*, *Recall* y *F1*) con el fin de comparar y analizar cuantitativamente el rendimiento de cada modelo de clasificación.

2.2.1. Datos de campo

Entre 1996 y 2023, se recolectaron manualmente las piñas de los cinco árboles más próximos al centro de cada parcela. Se registraron las alturas y los diámetros medios de los árboles muestreados. Asimismo, la edad de la parcela se estimó a partir del valor medio del conteo de anillos de crecimiento en muestras extraídas de entre tres y cinco árboles, tomadas a la altura del tocón usando una barrena de Pressler. La Tabla 1 recoge todas las variables dasométricas empleadas en el estudio.

Tabla 1. Definición de las variables dasométricas utilizadas.

Atributos	Variables	Unidades
dbh	Diámetro normal del árbol.	*cm*
h	Altura del árbol.	*m*
cw	Diámetro de la copa.	*m*
T	Edad del árbol.	*años*
ABHA	Área basimétrica por hectárea.	m^2/ha
dg	Diámetro medio cuadrático.	*cm*
SDI	Índice de Densidad de Masa (Reineke).	-
SI	Índice de sitio.	*m*
Hdom	Altura dominante.	*m*

2.2.2. Datos de imágenes de satélite

Se utilizaron las colecciones USGS Landsat Level 2, Collection 2, Tier 1 de Landsat 5, 7, 8 y 9 disponibles en Google Earth Engine, con una resolución espacial de 30 m y una resolución temporal de 16 días. Adicionalmente, se aplicó el factor de escala proporcionado por la USGS para convertir los valores digitales (DN) de las bandas multiespectrales a valores físicos reales de reflectancia superficial (SR):

$$SR = (DN \times 0{,}0000275) - 0{,}2 \quad (1)$$

Por último, se aplicó una máscara de nubes para excluir aquellos píxeles que impiden la observación de la superficie terrestre.

Dado que el pino piñonero tiene un periodo de tres años desde el momento de la floración hasta la apertura de las piñas, es necesario tener en cuenta el vigor de los árboles a lo largo de este periodo. Para filtrar las imágenes de Landsat, se definió el año de referencia (Y_{ref}) como el año en el que se evalúa la producción de piña. Una vez definido, se establecieron cuatro intervalos temporales (Y_0, Y_1, Y_2 y Y_3) con inicio en el mes de abril para capturar el ciclo fenológico al completo: (i) Y_0, desde abril de Y_{ref} hasta abril de Y_{ref+1}; (ii) Y_1, desde abril de Y_{ref-1} hasta abril de Y_{ref}; (iii) Y_2, desde abril de Y_{ref-2} hasta abril de Y_{ref-1}; y (iv) Y_3, desde abril de Y_{ref-3} hasta abril de Y_{ref-2}.

Una vez filtradas, corregidas y enmascaradas las imágenes, se calcularon la media y la mediana anual de cada uno de los IVs (Eq. 2-5) estudiados en cada uno de los intervalos temporales y la desviación típica de los cuatro intervalos analizados.

$$NDVI = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{R}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{R}} \quad (2)$$

$$NDMI = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{SWIR}_1}{\mathrm{NIR} + \mathrm{SWIR}_1} \quad (3)$$

$$NBR = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{SWIR}_2}{\mathrm{NIR} + \mathrm{SWIR}_2} \quad (4)$$

$$NBR_2 = \frac{\mathrm{SWIR}_1 - \mathrm{SWIR}_2}{\mathrm{SWIR}_1 + \mathrm{SWIR}_2} \quad (5)$$

Donde R es la banda del rojo, NIR es la banda del infrarrojo cercano y SWIR es la banda del infrarrojo medio.

2.3. Clasificación y evaluación

El enfoque adoptado es de carácter predictivo y estático a nivel de parcela-año, donde cada observación se considera independiente. No obstante, se incorpora información multitemporal de los IVs que resumen el estado de la vegetación en los tres años previos, permitiendo capturar indirectamente la dinámica temporal del proceso reproductivo. Este problema se planteó como una clasificación binaria, donde el modelo predice entre dos clases: «no producción» y «producción».

Los datos de entrada de los algoritmos de RF y XGB fueron los vectores de características asociados a cada parcela (S_D, S_{IV} y S_T). Cada uno de estos sets se dividió de manera estratificada en entrenamiento (80%) y test (20%). Adicionalmente, se ajustaron los pesos en el conjunto de entrenamiento, asegurando el balanceo entre ambas clases. El ajuste de los hiperparámetros de dichos algoritmos de ML fue mediante una búsqueda en cuadrícula a través de una validación cruzada estratificada. La metodología propuesta utilizó el método de validación cruzada de 5 iteraciones, con 10 ejecuciones independientes y 10 semillas distintas.

Se aplicaron distintas métricas de evaluación, tales como *Precision*, *Recall* y *F1* (media armónica de *Precision* y *Recall*), con el fin de comparar y analizar cuantitativamente el rendimiento de cada modelo:

$$Precision = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP} + \mathrm{FP}} \quad (6)$$

$$Recall = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP} + \mathrm{FN}} \quad (7)$$

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (8)$$

donde TP representa los verdaderos positivos, TN los verdaderos negativos, FP los falsos positivos y FN los falsos negativos.

Finalmente, se emplearon los análisis estadísticos de Kolmogorov-Smirnov y la prueba *t* de Student para evaluar el efecto de los IVs en la clasificación de parcelas con y sin producción de piñas basada en los algoritmos de ML.

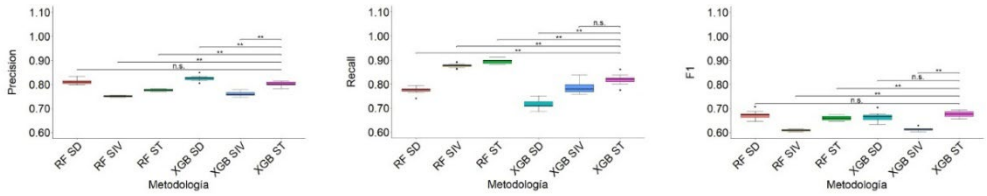


Figura 3. Efecto de los índices de vegetación en dos algoritmos de ML.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este estudio se observaron diferencias significativas en el rendimiento promedio de todas las métricas descritas, influenciadas por el tipo de datos de entrada y la metodología escogida (Fig. 3).

Basándonos en la métrica *Precision*, los modelos entrenados con el conjunto de datos S_D mostraron el mejor rendimiento en ambos algoritmos de ML, alcanzando valores del 81,1% para RF y del 82,5% para XGB. En cuanto a la métrica *Recall*, los mejores resultados se obtuvieron al utilizar los datos S_T, con valores del 89,6% para RF y del 81,8% para XGB. Respecto a la métrica *F1*, la combinación de los datos S_T y con el algoritmo XGB presentó el mejor desempeño, con un valor del 67,6%; mientras que para el algoritmo RF, el mejor desempeño se observó utilizando los datos S_D, con una puntuación del 67,2%. Adicionalmente, la combinación S_D y XGB obtuvo una puntuación *F1* del 66,5%, mientras que la combinación S_{IV} y XGB fue del 60,7%.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la complejidad inherente a la clasificación de parcelas en producción. Si bien la combinación de las variables dasométricas y los IVs contribuye a la mejora de la capacidad predictiva de los modelos, se evidencia la necesidad de incorporar nuevas variables que permitan capturar de forma más completa los factores que condicionan la elevada variabilidad interanual en la producción de piña. Según Calama *et al*. (2011), la inclusión de los factores climáticos resulta fundamental, ya que estos explican entre un 60 y un 80% de la variación temporal en la producción de piñas a escala regional, al influir directamente en los procesos de floración y fructificación. Por tanto, futuros trabajos abordarán la inclusión de variables climáticas, el uso de la mediana del periodo de mayor crecimiento vegetativo y la estimación cuantitativa de la producción de piñas.

4. CONCLUSIONES

El uso combinado de los IVs y las variables dasométricas permitió mejorar el rendimiento de los algoritmos de ML en la clasificación de parcelas con y sin producción de piña. No obstante, para incrementar la robustez y precisión de los modelos, resulta necesario incorporar nuevas variables (*i.e.*, datos climáticos) que capturen de forma más completa los factores que condicionan la producción. En este marco, la contribución científica de esta investigación radica en la incorporación de los IVs como predictores relevantes para la modelización de la producción en especies leñosas, estableciéndose como base metodológica de futuros estudios.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es parte del proyecto PID2022-136906OB-C21/C22, financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/ y FEDER/UE; la Comisión Europea, proyecto *Test and Experiment Facilities for the Agri-Food Domain*, AgriFoodTEF (DIGITAL-2022-CLOUD-AI-02, 101100622) y la Cátedra Internacional ENIA de Inteligencia Artificial y Agricultura (TSI-100921-2023-3). Alejandro Morales es investigador pre-doctoral FPU (FPU21/03433) y beneficiario de la ayuda de movilidad FPU 2025 (EST25/00144). Los autores agradecen a Javier Gordo y al Servicio Territorial de Medio Ambiente de Valladolid todo el apoyo prestado en el mantenimiento y seguimiento anual de la red de parcelas de producción de piña.

6. REFERENCIAS

Calama, R., Sánchez-González, M., & Montero, G. (2007). Integrated management models for Mediterranean multifunctional forests: the case of stone pine (*Pinus pinea* L.). *EFI Proceedings*, *56*, 57-69.

Calama, R., Gordo, F. J., Mutke, S., & Montero, G. (2008). An empirical ecological-type model for predicting stone pine (*Pinus pinea* L.) cone production in the Northern Plateau (Spain). *Forest Ecology and Management*, *255*(3-4), 660-673. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.079.

Calama, R., Mutke, S., Tomé, J., Gordo, J., Montero, G., & Tomé, M. (2011). Modelling spatial and temporal variability in a zero-inflated variable: the case of stone pine (*Pinus pinea* L.) cone production. *Ecological Modelling*, *222*(3), 606-618. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.09.020.

Henrich, V., Krauss, G., Götze, C., Sandow, C. (2012). IDB - www.indexdatabase.de, Entwicklung einer Datenbank für Fernerkundungsindizes. AK Fernerkundung, Bochum, 4.-5. 10. 2012.

Long, L., Chen, Y., Song, S., Zhang, X., Jia, X., Lu, Y., & Liu, G. (2023). Remote Sensing Monitoring of Pine Wilt Disease Based on Time-Series Remote Sensing Index. *Remote Sensing*, *15*(2), 360. https://doi.org/10.3390/rs15020360.

Montero, G., Calama, R., & Ruiz-Peinado, R. (2008). Selvicultura de *Pinus pinea* L. In: Montero, G., Serrada, R., & Reque, J. (Eds.), *Compendio de Selvicultura de Especies*. Madrid, INIA – Fundación Conde del Valle de Salazar, pp. 431–470.

Scarascia-Mugnozza, G., Oswald, H., Piussi, P., & Radoglou, K. (2000). Forests of the Mediterranean region: gaps in knowledge and research needs. *Forest Ecology and management*, *132*(1), 97-109. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00383-2.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.138

Análisis comparativo de modelos de distribución espacial para Hemiberlesia rapax (Hemiptera: Diaspididae) en Chile

Zambrano, Zahylis [1] **Torralba, Jesús** [2] **Rivera, Daniela** [3] **Briceño de Urbaneja, Idania** [1,2,4] **Amouroux, Paul** [1,4]

[1] Magíster en Teledetección, Escuela de Agronomía, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Chile

[2] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, España

[3] Centro GEMA: Genómica, Ecología y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Chile

[4] Hémera Centro de Observación de la Tierra, Escuela de Agronomía. Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Chile

ORCID: Torralba 0000-0001-8644-8604 Rivera 0000-0002-1725-423X Briceño de Urbaneja 0000-0002-1722-636X Amouroux 0000-0002-3321-7842

Correspondencia: zahylis.zambrano@mayor.cl jetorpe@upv.es daniela.rivera@umayor.cl idania.briceno@umayor.cl paul.amouroux@umayor.cl

RESUMEN

La escama Hemiberlesia rapax es un insecto de distribución mundial, reconocido como plaga agrícola en diversos cultivos de importancia económica. En Chile, ha sido registrada desde Arica hasta La Araucanía, lo que evidencia su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales y plantas hospederas. Ante su impacto ecológico y productivo, resulta esencial disponer de herramientas predictivas que orienten estrategias de monitoreo y manejo fitosanitario. Por ello, el objetivo del presente trabajo es comparar la capacidad predictiva de cinco algoritmos de distribución espacial (MaxEnt, RF, GAM, GLM, CTA) y un modelo de ensamblaje usando el paquete de BIOMOD2 en R. Se emplearon 329 registros de presencia y 659 seudoausencias. Las variables predictoras incluyeron 27 factores relacionados con información bioclimática, topográfica y de vegetación, que tras un análisis de colinealidad se redujeron a ocho. La validación se realizó mediante pruebas cruzadas y métricas de desempeño (ROC/AUC, TSS y KAPPA). Los resultados obtenidos evidencian que los modelos MaxEnt y RF alcanzaron los mayores valores de TSS y AUC, mientras que GAM y CTA presentaron desempeños más bajos. Sin embargo, el modelo ensamblado integró la información de los algoritmos individuales, logrando un mejor equilibrio predictivo y reduciendo la incertidumbre. El análisis espacial identificó tres núcleos principales de idoneidad: zonas costeras y valles del Norte Grande, la franja central entre Coquimbo y Biobío, y sectores fragmentados en La Araucanía. En conclusión, el enfoque de ensamblaje constituye una herramienta robusta para predecir la distribución potencial de H. rapax, aportando insumos clave para la gestión agrícola y la planificación de estrategias de control de esta especie en ecosistemas naturales y productivos.

Palabras clave: *BIOMOD2, ensamblaje de modelos, nicho ecológico, teledetección, Coccomorpha.*

Fecha de recepción: 8 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 8 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis comparativo de modelos de distribución espacial para Hemiberlesia rapax (Hemiptera: Diaspididae) en Chile

Zambrano, Zahylis [(1)], Torralba, Jesús [(2)], Rivera, Daniela [(3)], Briceño de Urbaneja, Idania [(1,2,4)], Amouroux, Paul [(1,4)]

[(1)] Magíster en Teledetección, Escuela de Agronomía, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Chile.

zahylis.zambrano@mayor.cl.

[(2)] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, España.

0000-0001-8644-8604, jetorpe@upv.es.

[(3)] Centro GEMA: Genómica, Ecología y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Chile.

0000-0002-1725-423X, daniela.rivera@umayor.cl.

[(4)] Hémera Centro de Observación de la Tierra, Escuela de Agronomía. Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Chile.

0000-0002-1722-636X, idania.briceno@umayor.cl ; 0000-0002-3321-7842, paul.amouroux@umayor.cl.

Resumen: La escama *Hemiberlesia rapax* es un insecto de distribución mundial, reconocido como plaga agrícola en diversos cultivos de importancia económica. En Chile, ha sido registrada desde Arica (18°S) hasta La Araucanía (38°S), lo que evidencia su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales. Ha sido registrada en 16 familias de plantas hospederas. Ante su impacto productivo, resulta esencial disponer de herramientas predictivas que orienten estrategias de monitoreo y manejo fitosanitario. Por ello, el objetivo del presente trabajo es comparar la capacidad predictiva de cinco algoritmos de distribución espacial (MaxEnt, RF, GAM, GLM, CTA) y un modelo de ensamblaje usando el paquete de BIOMOD2 en R. Se emplearon 329 registros de presencia y 659 pseudoausencias. Las variables predictoras incluyeron 27 factores relacionados con información bioclimática, topográfica y de vegetación, que tras un análisis de colinealidad se redujeron a ocho. La validación se realizó mediante pruebas cruzadas y métricas de desempeño (ROC/AUC, TSS y KAPPA). Los resultados obtenidos evidencian que los modelos MaxEnt y RF alcanzaron los mayores valores de TSS y AUC, mientras que GAM y CTA presentaron desempeños más bajos. Sin embargo, el modelo ensamblado integró la información de los algoritmos individuales, logrando un mejor equilibrio predictivo y reduciendo la incertidumbre. El análisis espacial identificó tres núcleos principales de idoneidad: zonas costeras y valles del Norte Grande, la franja central entre Coquimbo y Biobío, y sectores fragmentados en La Araucanía. En conclusión, el enfoque de ensamblaje constituye una herramienta robusta para predecir la distribución potencial de *H. rapax,* aportando insumos clave para la gestión agrícola y la planificación de estrategias de control de esta especie en ecosistemas naturales y productivos.

Palabras clave: BIOMOD2, ensamblaje de modelos, nicho ecológico, teledetección, Coccomorpha.

Comparative Analysis of Spatial Distribution Models for Hemiberlesia rapax (Hemiptera: Diaspididae) in Chile

Abstract: *Hemiberlesia rapax is a globally distributed scale insect recognized as an agricultural pest affecting a wide range of economically important crops. In Chile, it has been recorded from Arica (18°S) to La Araucanía (38°S), demonstrating a high capacity to adapt to diverse environmental conditions. Moreover, it was registered in 16 host plant families. Given its ecological and productive impact, predictive tools are essential to support monitoring programs and phytosanitary management strategies. Therefore, the aim of this study was to compare the spatial distribution predictions generated by five species distribution algorithms (MaxEnt, Random Forest, GAM, GLM, and CTA) and an ensemble model, implemented using the BIOMOD2 package in R. A total of 329 presence records and 659 pseudo-absence were used. Predictor variables included 27 bioclimatic, topographic, and vegetation-related factors, which were reduced to eight after a*

collinearity analysis. Model validation was performed using cross-validation and performance metrics (ROC/AUC, TSS, and Kappa). The results indicate that MaxEnt and Random Forest achieved the highest TSS and AUC values, whereas GAM and CTA showed lower predictive performance. However, the ensemble model integrated the outputs of individual algorithms, providing a more balanced prediction and reducing overall uncertainty. Spatial analysis identified three main suitability cores: coastal areas and valleys of northern Chile, the central zone between Coquimbo and Biobío, and fragmented sectors in La Araucanía. Overall, the ensemble approach represents a robust framework for predicting the potential distribution of H. rapax and provides valuable inputs for agricultural management and control planning in both natural and productive ecosystems.

Keywords: *BIOMOD2, Ensemble modeling, Ecological niche, Remote sensing, Coccomorpha.*

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de distribución de especies (MDE) son una herramienta clave para analizar y predecir la presencia geográfica de un organismo basándose en variables bióticas y abióticas (Beery *et al*., 2021). Para ello, es necesario integrar datos de teledetección y algoritmos de aprendizaje automático. La aplicación de estos enfoques a insectos sigue siendo limitada, debido a la escasez de datos sobre su ocurrencia y a la dificultad de capturar procesos ecológicos que operan a escalas espaciales finas y que puedan compararse con la biología de estos organismos (Senf *et al*. 2017).

Los insectos de la familia *Diaspididae* incluyen numerosas especies fitófagas de importancia económica, como *Hemiberlesia rapax* (Comstock, 1881). Esta especie corresponde a una escama armada polífaga y cosmopolita, registrada en más de 80 familias de plantas hospederas (García Morales *et al*., 2016). En Chile, la especie se distribuye desde la Región de Arica y Parinacota (18°S) hasta La Araucanía (39°S), en algunos casos afectando cultivos y plantas ornamentales y es una de las más polífaga (Amouroux *et al*., 2017, Normark *et al*. 2025). Su carácter sésil, en la mayor parte del ciclo de vida, hace que su distribución esté fuertemente condicionada por factores ambientales locales y por la disponibilidad de vegetación adecuada.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es comparar la capacidad predictiva de cinco algoritmos de modelización: máxima entropía (MaxEnt), *Random Forest* (RF), modelo lineal generalizado (GLM), modelo aditivo generalizado (GAM), árboles de clasificación (CTA) y un modelo ensamblado, para estimar la distribución espacial potencial de *H. rapax* en Chile continental a partir de la integración de variables bioclimáticas, topográficas y de vegetación derivadas de productos de teledetección. Se pretende identificar áreas de alta idoneidad ambiental aportando información relevante para la gestión agrícola y el monitoreo fitosanitario.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio corresponde al territorio continental de Chile (Fig. 1), caracterizado por un marcado gradiente latitudinal y climático, que abarca desde zonas desérticas en el norte hasta condiciones templadas y frías en el sur. La combinación de diferentes temperaturas y precipitaciones ha dado origen a una variedad de gradientes ambientales que han favorecido el desarrollo de distintos ecosistemas.

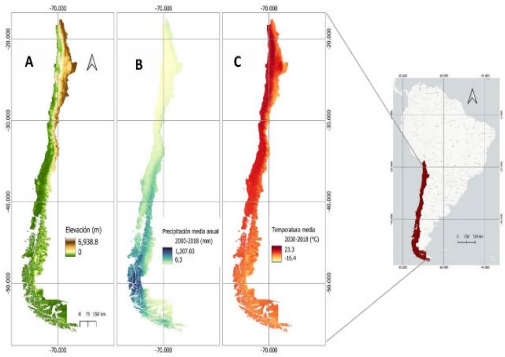


Figura 1. Territorio continental de Chile. Ejemplo de tres variables predictoras utilizadas en los modelos: (A) elevación, (B) precipitación media anual y (C) temperatura.

2.1. Variables bióticas

Se usaron registros de presencia de *H. rapax* recopilados entre 2015 y 2024, provenientes de muestreos de campo y bases de datos institucionales. Para reducir el sesgo de muestreo, los datos fueron filtrados espacialmente con una grilla de 250 m^2, dejando un único registro por celda para disminuir la sobrerrepresentación de áreas muy muestreadas, lo que permitió seleccionar un total de 329 presencias. Las pseudoausencias, generadas en una relación presencia/ausencia de 1: 2 (n=659), se obtuvieron mediante el método *Surface Range Envelope* (SRE), que permite delimitar el nicho ambiental de la especie y evitar su asignación en áreas potencialmente adecuadas.

2.2. Variables abióticas

Se consideraron 27 variables ambientales relacionadas con factores bioclimáticos, topográficos y de vegetación, seleccionadas en función de la ecología y el ciclo de vida de la especie. Las variables bioclimáticas se obtuvieron del conjunto CHELSA (2000-2018), mientras que la información topográfica se derivó del modelo SRTM. Se estimaron los índices de vegetación normalizada (NDVI), el índice de vegetación mejorada (EVI) y el índice de humedad (NDMI) a partir de datos del sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) procesados en *Google Earth Engine* (GEE). La

información del hábitat potencial de *H. rapax* se obtuvo del proyecto MapBiomas Chile. Todas las capas fueron reproyectadas, alineadas espacialmente y reescaladas a 250 m. Para reducir la colinealidad entre predictores se aplicaron análisis de correlación de Spearman y el factor de inflación de la varianza (VIF), seleccionando finalmente 8 variables con valores de correlación <0,7 y VIF <10 (Dormann *et al*., 2013).

2.3. Modelización y validación

La distribución espacial potencial de *H. rapax* se modeló con el paquete Biomod2 en R (Thuiller *et al*., 2024), utilizando 5 algoritmos: MaxEnt, RF, GLM, GAM y CTA, con los parámetros por defecto de cada modelo. Adicionalmente, se construyó un modelo ensamblado que combinó las predicciones de los algoritmos individuales mediante la media ponderada de las probabilidades de los modelos seleccionados (EMmean) y el promedio por comité de dichos modelos (EMca). La evaluación del desempeño se realizó mediante validación cruzada utilizando las métricas AUC, TSS y Kappa. Solo los modelos con valores de AUC > 0,8 y TSS > 0,7 fueron considerados en el modelo ensamblado (Li *et al*., 2024).

3. RESULTADOS

Los cinco algoritmos individuales mostraron un alto desempeño predictivo en la modelización de la distribución potencial de *H. rapax*. RF y MaxEnt (aunque este último fue el más restrictivo) presentaron las métricas con los mejores desempeños, con valores promedio de AUC superiores a 0,95 y TSS mayores a 0,85, lo que indica una elevada capacidad para discriminar áreas adecuadas y no adecuadas para la presencia de la especie. Los modelos GLM, GAM y CTA mostraron desempeños ligeramente inferiores, aunque dentro del rango aceptable para los MDE (Tabla 1).

Tabla 1. Promedio y desviación estándar de las tres métricas principales evaluadas en los cinco modelos individuales (MaxEnt, RF, GLA, GAM y CTA) y el ensamblado.

Modelo	Métrica	Promedio	Desviación estándar
MaxEnt	TSS	0.886	0.037
	ROC	0.99	0.004
	Kappa	0.872	0.041
RF	TSS	0.858	0.036
	ROC	0.991	0.003
	Kappa	0.873	0.032
GLM	TSS	0.841	0.036
	ROC	0.985	0.005
	Kappa	0.847	0.038
GAM	TSS	0.789	0.05
	ROC	0.973	0.009
	Kappa	0.745	0.044
CTA	TSS	0.804	0.042
	ROC	0.916	0.014
	Kappa	0.785	0.037
Ensamblado	TSS	**0.889**	0.035
	ROC	**0.981**	0.008
	Kappa	0.876	0.039

Con respecto a la importancia de las variables ambientales, se observó un patrón consistente entre los modelos. La temperatura media del trimestre más seco (bio9) fue el predictor más influyente en todos los algoritmos, concentrando entre el 45% y el 75% de la contribución total. Variables como la elevación y el índice EVI contribuyeron de manera secundaria. Cabe destacar que el modelo de RF asignó pesos más equilibrados a las demás variables seleccionadas (Fig. 2).

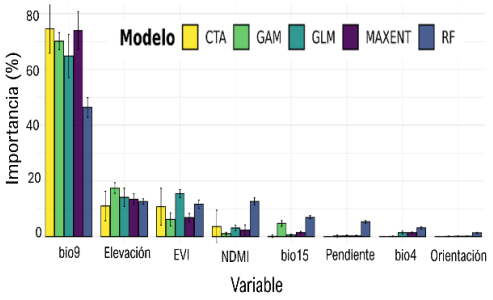


Figura 2. Importancia relativa, en porcentaje, de los ocho predictores utilizados en los modelos.

El modelo ensamblado (combinación de los cinco algoritmos individuales) integró las fortalezas de cada método y generó una proyección espacial más estable y coherente (Fig. 3). La distribución potencial de *H. rapax* mostró tres núcleos principales de idoneidad ambiental: (i) zonas costeras y valles del Norte Grande, (ii) una franja continua entre las regiones de Coquimbo y Biobío, y (iii) áreas fragmentadas en la región de La Araucanía. En contraste, las regiones más australes del país presentaron condiciones predominantemente inadecuadas para la especie. En comparación con los modelos individuales, el modelo ensamblado redujo la sobreestimación o la subestimación de las áreas idóneas observadas en algunos algoritmos, proporcionando una estimación más equilibrada de la distribución potencial de la especie a escala nacional.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Los resultados confirman la utilidad de los MDE y de datos de teledetección para analizar la idoneidad ambiental en insectos fitófagos a escala nacional. Las diferencias observadas entre algoritmos individuales evidencian que cada método responde de manera distinta a la estructura de los datos, a la relación entre las variables ambientales y a la presencia de la especie. En este contexto, RF destacó por su alto desempeño predictivo, lo que concuerda con estudios previos que evidencian su eficacia en sistemas ecológicos complejos y no lineales (Azrag *et al*., 2022; Amiri *et al*., 2020). La importancia de la temperatura media del trimestre más seco (bio9) sugiere que las condiciones térmicas estivales es un factor limitante clave para la distribución

potencial de *H. rapax*. Este resultado es coherente con la biología de la especie, cuyo ciclo de vida y la supervivencia de los estadios juveniles están estrechamente condicionados por el estrés térmico y la disponibilidad hídrica de las plantas hospederas durante los meses más secos del año.

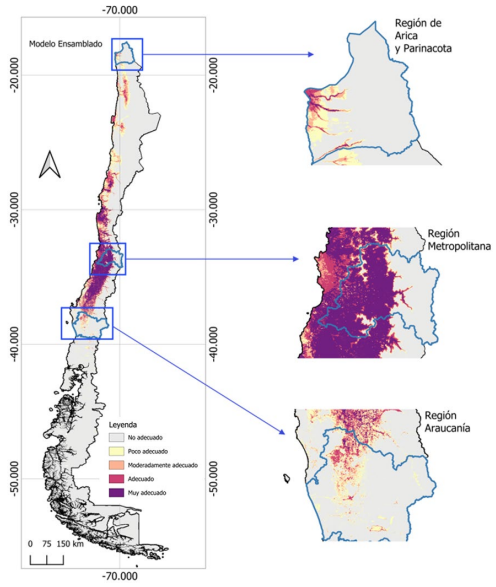


Figura 3. Modelo de distribución espacial potencial de *H. rapax* ensamblado.

El modelo ensamblado permitió integrar las fortalezas de los algoritmos individuales, reduciendo la variabilidad entre predicciones y generando una estimación espacial más equilibrada (Hao *et al*., 2020). La identificación de las áreas con alta idoneidad ambiental, como, por ejemplo, las zonas norte y central de Chile, permite identificar estas áreas como prioritarias para el monitoreo y vigilancia fitosanitaria de *H. rapax*, sobre todo en lugares como la región de Antofagasta, donde no se ha registrado su presencia hasta el momento.

5. AGRADECIMIENTO

Este proyecto fue financiado por ANID FONDECYT Postdoctorado #3180344 y ANID 667 FONDECYT iniciación en investigación 11230859. Asimismo, agradecemos a la Ingeniera Agrónoma Ilania Astorga del Servicio Agrícola y Ganadero del Ministerio de Agricultura, Chile por facilitar datos de *H. rapax* en Chile continental.

6. REFERENCIAS

Amiri, M., Tarkesh, M., Jafari, R., & Jetschke, G. (2020). Bioclimatic variables from precipitation and temperature records vs. remote sensing-based bioclimatic variables: Which side can perform better in species distribution modeling? *Ecological Informatics, 57*. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101060

Amouroux, P., Crochard, D., Germain, J. F., Correa, M., Ampuero, J., Groussier, G., Kreiter, P., Malausa, T., & Zaviezo, T. (2017). Genetic diversity of armored scales (Hemiptera: Diaspididae) and soft scales (Hemiptera: Coccidae) in Chile. *Scientific Reports, 7*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-017-01997-6

Azrag, A. G. A., Mohamed, S. A., Ndlela, S., & Ekesi, S. (2022). Predicting the habitat suitability of the invasive white mango scale, Aulacaspis tubercularis; Newstead, 1906 (Hemiptera: Diaspididae) using bioclimatic variables. *Pest Management Science, 78*(10), 4114–4126. https://doi.org/10.1002/ps.7030

Beery, S., Cole, E., Parker, J., Perona, P., & Winner, K. (2021). Species Distribution Modeling for Machine Learning Practitioners: A Review. Proceedings of 2021 4th ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies, COMPASS 2021, 329–348. https://doi.org/10.1145/3460112.3471966

Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J. R. G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., Mcclean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D., & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography, 36*(1): 27–46. https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x

García Morales, M., Denno, B. D., Miller, D. R., Miller, G. L., Ben-Dov, Y., & Hardy, N. B. (2016). ScaleNet: a literature-based model of scale insect biology and systematics. Database : *The Journal of Biological Databases and Curation*, 2016. https://doi.org/10.1093/database/bav118

Hao, T., Elith, J., Lahoz-Monfort, J. J., & Guillera-Arroita, G. (2020). Testing whether ensemble modelling is advantageous for maximising predictive performance of species distribution models. *Ecography, 43*(4), 549–558. https://doi.org/10.1111/ecog.04890

Li, Q., Cao, S., Wang, L., Hou, R., & Sun, W. (2024). Impacts of Climate Change on the Potential 813 Distribution of Three Cytospora Species in Xinjiang, China. *Forests, 15*(9). 814 https://doi.org/10.3390/f15091617

Normark BB, Normark RD, García Morales M, Claps LE, Amouroux P. Identity of the native South American armored scale insect species (Hemiptera: Coccomorpha: Diaspididae) widely misidentified as the North American species *Diaspidiotus ancylus* Putnam. Annals of the Entomological Society of America. 2025 Jul 7;118(4):358-370. https://doi.org/10.1093/aesa/saaf027

Senf, C., Seidl, R., & Hostert, P. (2017). Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions. In International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (Vol. 60, pp. 49–60). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.004

Thuiller, W., Georges, D., Gueguen, M., Engler, R., Breiner, F., Lafourcade, B., Patin, R., & Blancheteau, H. (2024). Package "biomod2" Ensemble Platform for Species Distribution Modeling (pp. 1–133). https://biomodhub.github.io/biomod2/

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.139

Generación de imágenes sintéticas para mejorar la clasificación de sistemas de plantación del olivar con YOLOV8

Muñoz-Lorite, Juanma [1] **Torres-Sánchez, Jorge** [1] **Mesas-Carrascosa, Francisco Javier** [1] **Pérez-Porras, Fernando** [1]

[1] Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática. España

ORCID: Muñoz-Lorite 0009-0001-8651-9924 Torres-Sánchez 0000-0003-1420-0145 Mesas-Carrascosa 0000-0002-5674-1292 Pérez-Porras 0000-0003-4263-2260

Correspondencia: g92muloj@uco.es o22tosaj@uco.es ig2mecaf@uco.es o12pepof@uco.es

RESUMEN

Para la determinación automática del sistema de plantación del olivar se desarrolló una metodología basada en Deep Learning a partir de imágenes sintéticas generadas para la clasificación de estos olivares usando YOLOV8. Muchas redes neuronales de clasificación presentan como principal requisito técnico un tamaño fijo de entrada de 299×299 píxeles, lo que implica que cada imagen debe representar una superficie mínima de 2,23 ha si se trabaja con imágenes de 0,5 m/píxel como las de PNOA. Como consecuencia, las parcelas de menor tamaño quedan excluidas del análisis, lo que limita la aplicabilidad del método a determinadas explotaciones. Con el fin de superar esta limitación, se ha desarrollado una nueva metodología para la generación de imágenes sintéticas que permite reducir el tamaño efectivo de la imagen de entrada sin perder la información estructural necesaria para la clasificación. Gracias a ello, es posible analizar parcelas con una superficie mínima de 0,13 ha. El modelo entrenado con la arquitectura de YOLOV8 alcanzó un F1-Score de 98.3% y una exactitud media del 98,2 % en validación. Este enfoque amplía el rango de parcelas analizables y sienta las bases para una mejor generalización del modelo, incrementando su potencial de aplicación a escala territorial.

Palabras clave: *Olivar, teledetección, imágenes sintéticas, YOLOV8, data aumentation.*

Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 9 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Generación de imágenes sintéticas para mejorar la clasificación de sistemas de plantación del olivar con YOLOV8

Muñoz-Lorite, Juanma [(1)], Torres-Sánchez, Jorge [(1)], Mesas-Carrascosa, Francisco Javier [(1)], Pérez-Porras, Fernando [(1)]

[(1)] Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática. España.

0009-0001-8651-9924, g92muloj@uco.es.

0000-0003-1420-0145, o22tosaj@uco.es.

0000-0002-5674-1292, ig2mecaf@uco.es.

0000-0003-4263-2260, o12pepof@uco.es.

Resumen: Para la determinación automática del sistema de plantación del olivar se desarrolló una metodología basada en Deep Learning a partir de imágenes sintéticas generadas para la clasificación de estos olivares usando YOLOV8. Muchas redes neuronales de clasificación presentan como principal requisito técnico un tamaño fijo de entrada de 299×299 píxeles, lo que implica que cada imagen debe representar una superficie mínima de 2,23 ha si se trabaja con imágenes de 0,5 m/píxel como las de PNOA. Como consecuencia, las parcelas de menor tamaño quedan excluidas del análisis, lo que limita la aplicabilidad del método a determinadas explotaciones. Con el fin de superar esta limitación, se ha desarrollado una nueva metodología para la generación de imágenes sintéticas que permite reducir el tamaño efectivo de la imagen de entrada sin perder la información estructural necesaria para la clasificación. Gracias a ello, es posible analizar parcelas con una superficie mínima de 0,13 ha. El modelo entrenado con la arquitectura de YOLOV8 alcanzó un F1-Score de 98,3% y una exactitud media del 98,2 % en validación. Este enfoque amplía el rango de parcelas analizables y sienta las bases para una mejor generalización del modelo, incrementando su potencial de aplicación a escala territorial.

Palabras clave: Olivar, teledetección, imágenes sintéticas, YOLOV8, data augmentation.

Synthetic Image Generation to Improve the Indentification of Olive Grove Planting Systems with YOLOV8

Abstract*: For the automatic determination of olive grove planting systems, a methodology based on Deep Learning was developed using synthetic images generated for the classification of these groves with YOLOv8. Many classification neural networks require a fixed input size of 299×299 pixels, which means that each image must represent a minimum area of 2.23 ha when working with 0.5 m/pixel imagery such as that provided by PNOA. As a result, smaller plots are excluded from the analysis, limiting the applicability of the method to certain farms. To overcome this limitation, a new methodology for generating synthetic images has been developed, enabling a reduction in the effective size of the input image without losing the structural information required for classification. This makes it possible to analyse plots with a minimum area of 0.13 ha. The model trained with the YOLOv8 architecture achieved an F1-Score of 98.3% and an average accuracy of 98.2% in validation. This approach broadens the range of plots that can be analysed and lays the foundations for improved model generalisation, increasing its potential for application at territorial scale.*

Keywords: *Olive grove, remote sensing, synthetic images, YOLOV8, data augmentation.*

1. INTRODUCCIÓN

La intensificación del olivar en Andalucía ha transformado los sistemas de plantación, pasando de modelos tradicionales (<200 árboles/ha) a intensivos (200-800 árboles/ha) y superintensivos (>800 árboles/ha) (Pastor *et al*., 2005). Para cuantificar en hectáreas esta evolución del manejo del olivar, se requiere de herramientas objetivas que permitan su caracterización a escala parcela de forma masiva. En trabajos previos, se desarrolló una metodología con clasificadores como InceptionV3 sobre ortoimágenes PNOA (0,5 m/píxel), alcanzando un 85,91 de F1-score (Muñoz-Lorite *et al*., 2024). Sin embargo, su requisito de entrada de uso de imágenes de 299×299 píxeles excluían parcelas <2,23 ha. Debido a la resolución espacial de la fuente de entrada, el análisis territorial se sesga hacia explotaciones grandes, generalmente con manejo intensivo, y excluye a las pequeñas, con mayor variabilidad y, sobre todo, presencia de manejo tradicional. Este tipo de redes neuronales no admite datos de entrada con menos de este número de píxeles.

Para superar esta limitación, se propone generar imágenes sintéticas, una estrategia que se ha demostrado clave para ampliar la representatividad en los conjuntos de datos agrícolas donde existe una limitación en las tomas de muestras (Lu *et al*., 2022), usando el polo de inaccesibilidad que queda definido como el punto interno que maximiza la distancia a los bordes de una geometría (Garcia-Castellanos & Lombardo, 2007), identificando la zona más representativa de esta. Esta novedad geométrica permite analizar parcelas ≥0,13 ha, replicando InceptionV3 pero con otra red neuronal de clasificación como YOLOV8, con gran adaptabilidad a datos sintéticos (Qin *et al*., 2024). El método amplía la representatividad ya que de aproximadamente 1,6 millones de ha de olivar que hay en Andalucía, con este enfoque se podrían analizar 1,54 millones, mientras que con el tamaño fijo solo se llegaría a 0,99 millones de ha.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y datos de entrada

El área de estudio se localiza en el denominado Eje del Olivar en Andalucía, una de las principales regiones productoras de aceite de oliva a escala mundial (Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura, 2025), caracterizada por una elevada heterogeneidad en los sistemas de plantación y marcos de cultivo (Figura 1). Esta diversidad convierte al territorio en un entorno idóneo para evaluar metodologías orientadas a la identificación automática de sistemas de plantación mediante técnicas de teledetección y aprendizaje profundo.

Como fuente principal de información se emplearon ortoimágenes aéreas procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (IGN, n.d.), seleccionándose aquellas campañas con resoluciones espaciales de 0,5 m, las cuales se adaptan mejor para determinar patrones de plantación como ya se demostró (Muñoz-Lorite *et al*., 2026). La delimitación de las parcelas de olivar se realizó a partir de recintos vectoriales proporcionados por SIGPAC (Junta de Andalucía-Spain, n.d.) determinados como olivar, sobre los que se desarrolló un preprocesado espacial orientado a la extracción de información representativa del sistema de plantación.

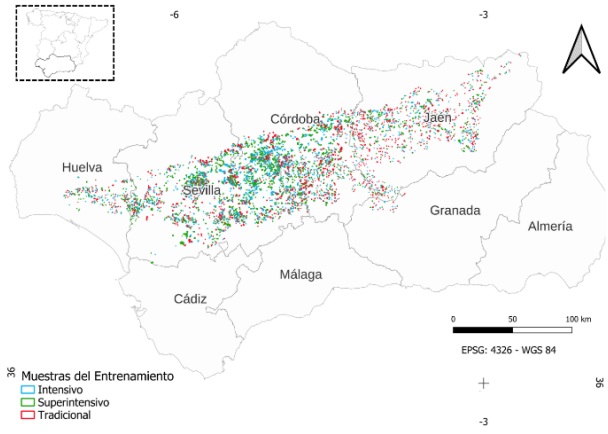


Figura 1 Localización de las muestras para el entrenamiento del modelo.

2.2. Generación de imágenes sintéticas

La generación de imágenes sintéticas constituye una etapa clave del flujo metodológico propuesto. Con el objetivo de evitar el sesgo a grandes plantaciones, maximizar el aprovechamiento de la información espacial disponible y predecir sobre casi el total de las parcelas de olivar de Andalucía, se desarrolló una metodología específica para la generación de imágenes sintéticas, orientada a preservar los patrones estructurales del cultivo independientemente del tamaño de la parcela. El procedimiento se basa en la identificación de la zona más representativa de cada parcela y en la generación automática de un recorte óptimo que pueda ser posteriormente adaptado al tamaño de entrada requerido por los modelos de Deep Learning. En una primera fase, se determinó para cada parcela el denominado polo de inaccesibilidad, este concepto geométrico garantiza que el área seleccionada se sitúe en la zona menos influenciada por los límites parcelarios, maximizando la representatividad del patrón de plantación. El cálculo de este punto '$dist_{pole}$' se realizó sobre geometrías proyectadas en UTM, utilizando métricas euclidianas La distancia euclidiana d entre un punto (Xp, Yp) y el punto más cercano (Xs, Ys) de un segmento del borde se calcula mediante la Ecuación 1.

A partir del polo de inaccesibilidad, se calculó el lado del mayor cuadrado que puede inscribirse dentro de cada parcela y centrarse en dicho punto, generándose un nuevo atributo geométrico denominado **'Side'** (Ecuación 2). Este valor define las dimensiones máximas del recorte espacial que puede obtenerse sin exceder los límites de la parcela. Con el fin de garantizar la calidad del conjunto de datos, se estableció un umbral mínimo de 25 m para el valor 'Side', asegurando que, incluso en los sistemas de plantación más extensivos, cada imagen contuviera al menos 2 copas de olivo. Para sistemas de plantación intensivos, se garantiza que el parche contenga al menos 9 copas de olivo, mientras que para el caso de superintensivo se aseguran al menos 7 filas de árboles. Este criterio se fundamenta en el conocimiento agronómico de los marcos de plantación del olivar, donde las distancias entre árboles rara vez superan los 14–15 metros en sistemas tradicionales (Barranco, 2008).

$$dist_{pole} = \sqrt{((Xp - Xs)^2 + (Yp - Ys)^2)} \quad (1)$$

$$Side = 2 \times dist_{pole} \times \sin(45°) \quad (2)$$

Una vez definido el valor Side, se procedió a la generación automática del cuadrado. Posteriormente, se cortó la imagen PNOA con este cuadrado ofreciendo como resultado una imagen sin un tamaño fijo de pixeles. Esta es la base de la imagen sintética, la cual sirve como tesela para generar la imagen final de 299x299, uniendo consecutivamente tesela tras tesela hasta completar una imagen del tamaño requerido. Las que eran mayores a 299x299 píxeles se recortaron, garantizando así la homogeneidad dimensional del conjunto de datos sin pérdida de coherencia espacial. Este enfoque permitió ampliar significativamente el número de parcelas analizadas. El proceso se describe en la Figura 2.

2.3. Entrenamiento del modelo YOLOV8

Para la detección del sistema de plantación en el olivar, se entrenó YOLOV8 de Ultralytics utilizando un dataset compuesto por 6.000 imágenes pertenecientes cada una a una parcela diferente (2.000 muestras por clase: i) Tradicional, ii) Intensivo y iii) Superintensivo) procedentes de la ortofotografía del PNOA con una resolución de 0,5m píxel y mediante el proceso de generación de imágenes sintéticas generadas mediante el proceso anteriormente descrito.

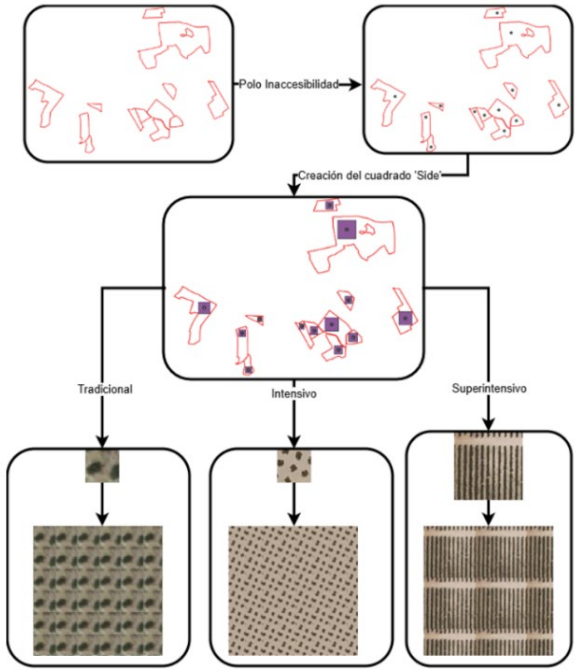


Figura 2 Proceso de obtención de la imagen sintética.

El dataset se particionó en 3 conjuntos elegidos aleatoriamente, para entrenamiento, validación y testeo con una proporción del 70/20/10.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados para la validación del modelo ofrecieron unos resultados en Precisión de 98,5%, Recall 98,1% y F1-score 98,3%, métrica utilizada como referencia para la comparativa de modelos (Figura 3). Se observa que el F1-score en validación aumenta rápidamente, alcanzando su máximo en la época 3 después del fine tunning dónde posteriormente disminuye ligeramente y aumentando hasta estabilizarse. Otras arquitecturas con YOLOv8 con objetivos similares en agricultura los resultados son similares a los de otros autores (Zhu *et al*., 2025) y se obtienen métricas parecidas a las obtenidas con la anterior metodología usando imágenes con una extensión mínima de 2,23 ha en vez de 0,13 ha (Muñoz-Lorite *et al*., 2026). En cuanto a la exactitud en validación, se obtuvo un resultado del 98,2%.

La aplicación de la metodología propuesta para la generación de imágenes sintéticas tendrá un impacto directo y significativo en la escala y representatividad del análisis territorial de los sistemas de plantación del olivar a escala Andalucía (Tabla 1). Para esta Comunidad Autónoma, las parcelas menores de 2,23 ha representan 1.277.067 parcelas y 649.196,94 ha, es decir, el 39,59% de la superficie total olivarera considerada. De las parcelas que se podrán clasificar, 130.775 parcelas concentran el 60,41% de la superficie (990.423,50 ha). La exclusión sistemática de las parcelas pequeñas, derivada de los requisitos geométricos de los modelos de Deep Learning, habría supuesto descartar casi el 40% de la superficie de olivar analizable en Andalucía, lo que dificultaría calcular una evaluación precia del manejo del olivar en los últimos 10 años. Mediante la metodología basada en las imágenes sintéticas, será posible analizar 769.202 parcelas, que suman 1.540.326,61 ha, aumentando unas quinientas cincuenta mil hectáreas respecto a la solución anterior. En total, quedarán unas cien mil hectáreas, un 6,06% del total sin predecir, debido a que son unas parcelas muy pequeñas o con formas tan irregulares que no permiten recortar una imagen con al menos 25 metros de lado para contener la mínima información exigida sobre la parcela.

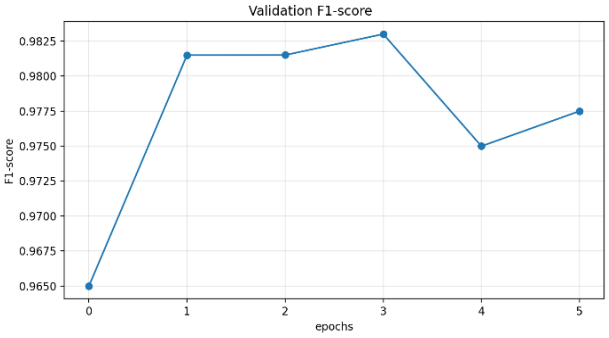


Figura 3. F1-score en el entrenamiento del modelo YOLOv8.

En términos relativos, la propuesta conserva aproximadamente el 94% de la superficie total inicial de Andalucía, reduciendo el impacto de las limitaciones geométricas sobre el conjunto de datos. La incorporación masiva de parcelas de menor tamaño, especialmente relevantes en el olivar tradicional, mejorará de forma notable la representatividad espacial y tipológica de los análisis evolutivos, reforzando la validez de los resultados obtenidos en estudios de carácter regional y territorial. Desde el punto de vista metodológico, la principal innovación del trabajo radica en el enfoque adoptado para la generación de imágenes sintéticas.

Tabla 1. Distribución de las superficies en Andalucía bajo los dos enfoques distintos

Escenario	Parcelas	Superficie (ha)	% Total
TOTAL	1.407.842	1.639.620,44	100%
Metodología imágenes sintéticas			
Side≥25m	769.202	1.540.326,61	93,94%
Side<25m	638.640	99.293,83	6,06%
Resumen parcelas por tamaño anterior/actual			
≥2,23 ha	130.775	990.423,50	60,41%
<2,23 ha	1.277.067	649.196,94	39,59%

En el contexto agrícola, diversas investigaciones han explorado la generación de imágenes sintéticas porque no se disponen de datos suficientes. Usando imágenes sintéticas se han resuelto problemas para la detección de plantas de pimiento, identificar flores, segmentar raíces o lesiones foliares (Afonso & Giufrida, 2023). Otros estudios como el de Giakoumoglou *et al*. (2023) emplean modelos de difusión para generar artificialmente instancias de insectos plaga (como la mosca blanca) y las insertan en posiciones arbitrarias sobre fondos de hojas para entrenar algoritmos de detección. A diferencia de estos enfoques y de los métodos tradicionales basados en estrategias de colocación aleatoria (random crop-and-paste) (Ghiasi, 2022), la metodología propuesta se apoya en criterios geométricos avanzados teniendo en cuenta el sistema de plantación. Aunque en la literatura se subraya la constante necesidad de generar datos sintéticos de mayor realismo (Afonso & Giufrida, 2023), las aproximaciones previas no incorporan de forma explícita la estructura espacial ni las restricciones geométricas propias de los sistemas de cultivo reales. La selección óptima de imágenes para garantizar la identificación precisa del sistema de plantación ha sido el mayor reto técnico del procedimiento necesitando conocer correctamente mediante fotointerpretación todos los sistemas de cultivo. En contraste, el presente trabajo integra métricas geométricas avanzadas permitiendo identificar posiciones internas óptimas dentro de cada parcela.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una metodología basada en la generación de imágenes sintéticas que permite superar las limitaciones geométricas de tamaño de los modelos de aprendizaje profundo aplicados al análisis de sistemas de plantación del olivar. Este enfoque posibilita la incorporación de parcelas de pequeño tamaño a la clasificación de imágenes, tradicionalmente excluidas, eliminando sesgos y mejorando la representatividad territorial del análisis.

La principal contribución del trabajo reside en la integración del polo de inaccesibilidad, y en la generación de datos sintéticos, frente a enfoques aleatorios predominantes en la literatura. La metodología propuesta es escalable y transferible a otros cultivos leñosos y contextos agrícolas fragmentados, constituyendo una base sólida para futuros análisis territoriales a gran escala. Como futuros trabajos se propone hacer un estudio para la predicción de los sistemas de plantación a nivel regional con el 100% de las parcelas de olivar en Andalucía, para estudiar la evolución multitemporal de la intensificación del olivar en Andalucía y su relación con el consumo de agua.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se enmarca en la Cátedra Internacional ENIA en Agricultura de la Universidad de Córdoba (TSI-100921-2023-3), financiada por la Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial y por la Unión Europea – Next Generation EU, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

6. REFERENCIAS

Barranco, D. F.-E. R. R. L. (2008). El cultivo del olivo (6th ed.). Mundi-Prensa.

Garcia-Castellanos, D., & Lombardo, U. (2007). Poles of inaccessibility: A calculation algorithm for the remotest places on earth. *Scottish Geographical Journal, 123*(3), 227–233. https://doi.org/10.1080/14702540801897809

IGN. (n.d.). PNOA IGN. Retrieved April 15, 2025, from https://surl.li/npynbj

Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura, P. A. y D. R. (CAPADR). (2025). Primera Estrategia Andaluza para el Sector del Olivar: Horizonte 2027, from https://surl.lt/bftsxh

Junta de Andalucía-Spain. (n.d.). SIGPAC. Retrieved https://surl.li/gmiitb

Lu, Y., Chen, D., Olaniyi, E., & Huang, Y. (2022). Generative adversarial networks (GANs) for image augmentation in agriculture: A systematic review. *Computers and Electronics in Agriculture, 200*. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107208

Muñoz-Lorite, J., Torres-Sánchez, J., Cantón-Martínez, S., Mesas, F. J., & Pérez Porras, F. (2026). Automatic detection of olive grove planting systems using Deep Learning algorithms. https://doi.org/10.2139/ssrn.6183764

Muñoz-Lorite, J., Torres-Sánchez, J., Mesas-Carrascosa, F. J., & Pérez-Porras, F. (2024). Clasificación de sistemas de plantación del olivar en Andalucía mediante ortoimágenes y modelos de aprendizaje profundo En Teledetección y Cambio Global: Retos y Oportunidades para un Crecimiento Azul, Actas del XX Congreso de la Asociación Española de Teledetección. http://www.aet.org.es/?q=congresos

Pastor, M., Vega, V., & Hidalgo, J. C. (2005). Trials in super-intensive and intensive olive groves. *Vida Rural, 218*, 30–34.

Qin, R., Wang, Y., Liu, X., & Yu, H. (2024). Advancing precision agriculture with deep learning enhanced SIS-YOLOv8 for Solanaceae crop monitoring. *Frontiers in Plant Science, 15*. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1485903

Zhu, H., Wang, D., Wei, Y., Wang, P., & Su, M. (2025). YOLOV8-CMS: a high-accuracy deep learning model for automated citrus leaf disease classification and grading. *Plant Methods, 21*(1). https://doi.org/10.1186/s13007-025-01396-3

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.145

Caracterización de la madurez forestal utilizando LiDAR

Velasco, Ayanta [1] **Barquín, Jose** [1] **Concostrina-Zubiri, Laura** [1]

[1] Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, España

ORCID: Velasco 0009-0007-0001-2270 Barquín 0000-0003-1897-2636 Concostrina-Zubiri 0000-0001-7781-6030

Correspondencia: ayanta.velasco@unican.es jose.barquin@unican.es laura.concostrina@unican.es

RESUMEN

Los bosques maduros tienen un papel crucial en la mitigación del cambio climático, el ciclo del agua, la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos. Esto está relacionado con la mayor complejidad estructural y diversidad funcional asociada a la madurez del bosque. Por lo tanto, la madurez forestal debe considerarse una característica clave para desarrollar políticas de conservación y gestión forestal; sin embargo, su definición y cuantificación siguen siendo complejas. En este estudio proponemos la caracterización de la madurez del bosque usando métricas estructurales derivadas de LiDAR, algoritmos de clasificación no supervisada y segmentación por formaciones forestales. Para ello, se calcularon diversas métricas estructurales relacionadas con la estructura 3D del bosque. La clasificación se aplicó, por separado, a las formaciones forestales naturales con mayor extensión en la región de Cantabria: hayedos, robledales, melojares y encinares. El número de componentes principales necesarios para explicar el 80 % de la varianza y las métricas más relevantes en su diferenciación varió entre formaciones. No obstante, hubo un patrón consistente para todas ellas, donde el primer componente principal estuvo asociado a métricas relacionadas con mayores alturas de copa, mientras que el segundo componente se relacionaba más con la heterogeneidad y complejidad vertical. La interpretación de las clases de madurez obtenidas se llevó a cabo combinando la interpretación de las distribuciones de cada una de las métricas estructurales y fotointerpretación, encontrándose diferentes patrones entre formaciones. Los resultados muestran que la metodología propuesta es capaz de discriminar de forma robusta grupos de madurez forestal y presenta un elevado potencial para su aplicación en planificación y gestión forestal y territorial.

Palabras clave: *madurez forestal, airborne laser scanning, métricas estructurales, conservación forestal*

Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 9 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Caracterización de la madurez forestal utilizando LiDAR

Velasco, Ayanta [(1)], Barquín, Jose [(1)], Concostrina-Zubiri, Laura [(1)]
[(1)] Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, España.
0009-0007-0001-2270, ayanta.velasco@unican.es.
0000-0003-1897-2636, jose.barquin@unican.es.
0000-0001-7781-6030, laura.concostrina@unican.es.

Resumen: Los bosques maduros tienen un papel crucial en la mitigación del cambio climático, el ciclo del agua, la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos. Esto está relacionado con la mayor complejidad estructural y diversidad funcional asociada a la madurez del bosque. Por lo tanto, la madurez forestal debe considerarse una característica clave para desarrollar políticas de conservación y gestión forestal; sin embargo, su definición y cuantificación siguen siendo complejas. En este estudio proponemos la caracterización de la madurez del bosque usando métricas estructurales derivadas de LiDAR, algoritmos de clasificación no supervisada y segmentación por formaciones forestales. Para ello, se calcularon diversas métricas estructurales relacionadas con la estructura 3D del bosque. La clasificación se aplicó, por separado, a las formaciones forestales naturales con mayor extensión en la región de Cantabria: hayedos, robledales, melojares y encinares. El número de componentes principales necesarios para explicar el 80 % de la varianza y las métricas más relevantes en su diferenciación varió entre formaciones. No obstante, hubo un patrón consistente para todas ellas, donde el primer componente principal estuvo asociado a métricas relacionadas con mayores alturas de copa, mientras que el segundo componente se relacionaba más con la heterogeneidad y complejidad vertical. La interpretación de las clases de madurez obtenidas se llevó a cabo combinando la interpretación de las distribuciones de cada una de las métricas estructurales y fotointerpretación, encontrándose diferentes patrones entre formaciones. Los resultados muestran que la metodología propuesta es capaz de discriminar de forma robusta grupos de madurez forestal y presenta un elevado potencial para su aplicación en planificación y gestión forestal y territorial.

Palabras clave: madurez forestal, airborne laser scanning, métricas estructurales, conservación forestal

Characterisation of forest maturity using LiDAR

***Abstract**: Mature forests play a crucial role in climate change mitigation, the water cycle, biodiversity conservation, and the provision of ecosystem services. This is related to the greater structural complexity and functional diversity associated with forest maturity. Therefore, forest maturity should be considered a key characteristic for developing forest conservation and management policies; however, its definition and quantification remain complex. In this study, we propose the characterisation of forest maturity using structural metrics derived from LiDAR, unsupervised classification algorithms, and segmentation by forest formations. To this end, various structural metrics related to the 3D structure of the forest were calculated. Classification was applied separately to the most extensive natural forest formations in the region of Cantabria: beech, oak, Pyrenean oak, and holm oak forests. The number of principal components needed to explain 80% of the variance and the most relevant metrics in their differentiation varied between formations. However, there was a consistent pattern for all of them, where the first principal component was associated with metrics related to greater canopy heights, while the second component was more related to vertical heterogeneity and complexity. The interpretation of the maturity classes obtained was carried out by combining the interpretation of the distributions of each of the structural metrics and photo interpretation, finding different patterns between formations. The results show that the proposed methodology is able to robustly discriminate between forest maturity groups and has high potential for application in forest and land-use planning and management.*

***Keywords:** forest maturity, airborne laser scanning, structural metrics, forest conservation*

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques maduros desempeñan un papel crucial en la regulación de los flujos de agua y energía entre la atmósfera y el suelo (Belmar *et al*., 2018; Frey *et al*., 2016). Su complejidad estructural y diversidad funcional, que generalmente aumentan con la sucesión ecológica (Chazdon *et al*., 2016), modulan estos intercambios e influyen en múltiples procesos hidrológicos. La conservación de estos bosques resulta especialmente interesante, pues contribuyen a la mitigación del cambio climático, la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos (Watson *et al*., 2018), incluyendo aquellos relacionados con la regulación hidrológica. Sin embargo, la falta de consenso en una definición concreta y común de madurez forestal, generada principalmente por la cantidad de métodos disponibles para estimarla, hace que su aplicación a grandes escalas espaciales sea todavía compleja. Además, las limitaciones asociadas a estas metodologías (e.g., campañas de campo intensivas o disponibilidad de datos precisos de la edad o la historia de la masa) dificultan todavía más la caracterización de la madurez forestal y, por tanto, la diferenciación de los bosques maduros. En este contexto, la estructura de los bosques constituye un conjunto de rasgos que evolucionan gradualmente a lo largo del desarrollo del ecosistema, reflejando sus dinámicas naturales. La teledetección se ha consolidado como una herramienta clave para la caracterización estructural del bosque, al permitir su estimación de manera relativamente sencilla, replicable y escalable. No obstante, la mayoría de los estudios existentes combinan datos LiDAR con información procedente de sensores ópticos, inventarios forestales o muestreos de campo, no suelen discriminar en función de la composición específica de las masas forestales o se apoyan mayoritariamente en algoritmos de clasificación supervisada, lo que exige la disponibilidad de conjuntos de datos para la generación de grupos de entrenamiento y validación (de Assis Barros & Elkin, 2021; Martin *et al*., 2021, entre otros).

En este estudio proponemos una metodología basada exclusivamente en datos LiDAR aerotransportados y clasificación no supervisada, con segmentación por formaciones forestales. Este enfoque permite que las categorías y patrones de madurez emerjan de la propia estructura del bosque y de forma específica para cada formación, evitando un sesgo inicial dado por etiquetas o umbrales establecidos *a priori*.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se ha llevado a cabo en la región de Cantabria, situada en el norte de la Península Ibérica y que cuenta con una superficie forestal total de *ca.* 69%, según el Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4). La cartografía de madurez se ha realizado para las cuatro formaciones forestales naturales con mayor extensión en la región de estudio (Fig. 1): hayedos (*Fagus sylvatica,* 15%), robledales (*Quercus robur* y *Quercus petraea,* 13%), melojares (*Quercus pyrenaica,* 13%) y encinares (*Quercus ilex,* 7%).

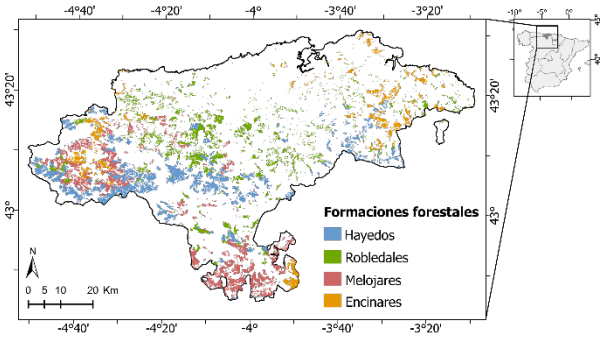


Figura 1. Área de estudio y distribución de las formaciones forestales de interés según el IFN4.

2.2. Datos LiDAR

Los datos LiDAR utilizados corresponden a las nubes de puntos generadas en los vuelos del Plan Nacional de Ortofoto Aérea (PNOA-LiDAR) de primera, segunda y tercera cobertura (Tabla 1). Todo el procesamiento y cálculo de las métricas estructurales se ha llevado a cabo a través del paquete lidR (Roussel *et al*., 2020) en el programa Rstudio (versión R 4.5.1).

Tabla 1. Especificaciones de los vuelos LiDAR

Vuelo	Año adquisición	Densidad puntos
1º cobertura	2012	0.5 puntos/m^2
2º cobertura	2018	0.5 -2 puntos/m^2
3º cobertura	2023	5 puntos/m^2

2.2.1. Cálculo de métricas estructurales

La caracterización estructural de los bosques se basó en un conjunto de métricas estructurales descritas en la literatura, representativas tanto de la estructura vertical como horizontal del dosel forestal (Tabla 2), junto con otras asociadas a la distribución de alturas. Estas métricas se calcularon a partir de los datos LiDAR de 2023 normalizados, en formato ráster y con una resolución espacial de 10x10 m. Se calcularon también la media, máxima y moda de las alturas para las nubes de puntos LiDAR de 2012 y 2018, así como el cambio en la altura de la vegetación arbórea entre los distintos años de adquisición del LiDAR. Finalmente, se aplicó una máscara que delimita la extensión de cada formación forestal en el área de estudio, para segmentar el análisis por tipo de formación.

2.3. Análisis estadístico

Todas las métricas estructurales se apilaron en un stack multivariante. Se espera una alta correlación entre todas las variables estructurales, por ello, se aplicó un análisis de reducción de dimensionalidad (análisis de componentes principales, PCA, por sus siglas en inglés) sobre las variables previamente centradas y escaladas. Previamente, se calculó la correlación de Spearman entre las métricas y se eliminaron aquellas con ρ >±0,95 con el objetivo de reducir la redundancia. A continuación, se llevó a cabo un análisis de clasificación no supervisada mediante el algoritmo K-means, empleando los componentes principales que explicaban más del 80 % de la varianza total. La determinación del

número óptimo de clústeres o grupos para cada formación se realizó mediante el método del codo. La diferenciación estructural entre los grupos se evaluó mediante un análisis de varianza (ANOVA) y la inspección visual de las métricas más relevantes. La asignación final de las categorías de madurez se apoyó en los resultados estadísticos y en la fotointerpretación. El PCA y el análisis de agrupación se llevaron a cabo utilizando la librería Sklearn en Python (versión 3.13.5).

Tabla 2. Métricas estructurales LiDAR basadas en la literatura.

Métrica	Referencia
CC (canopy cover); CRR (canopy relief ratio); MOCH (mean outer canopy height); FHD (foliar height diversity); Rugorsity; LAI (leaf area index)	Atkins *et al.*, 2023
DA (canopy density index A); DB(canopy density index B); VDR (vertical distribution ratio); VCI (vertical complexity index); sdHeight; cvHeight	Van Ewijk *et al.*, 2011
Gap fraction; sdCC	Martin *et al.*, 2021
Intensity mean; sdIntensity	Fuhr *et al.*, 2022

3. RESULTADOS

3.1. Características distintivas de las clases de madurez forestal

Por limitación de espacio, se muestran únicamente los resultados para los hayedos, que representan la formación forestal natural de mayor extensión en la región de estudio.

Se seleccionaron cinco componentes principales para la agrupación, explicando las dos primeras el 58% de la varianza total. El PC1 estuvo principalmente asociado a métricas relacionadas con la altura (e.g., alturas máximas y medias) y la cobertura del dosel, mientras que el PC2 estuvo dominado por métricas relacionadas con la heterogeneidad vertical del dosel (e.g., desviación estándar de los primeros retornos, rango intercuartílico), y por las distribuciones más bajas de las alturas (p5; Fig. 2).

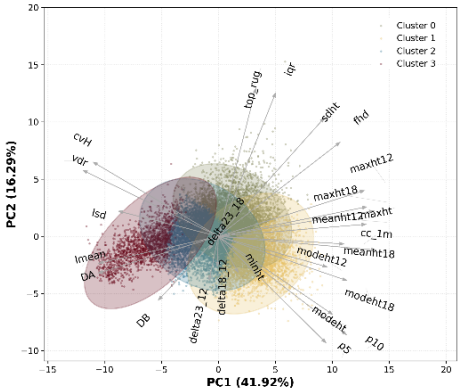


Figura 2. PCA y agrupación (n= 4) para hayedos.

El ANOVA reveló que todas las métricas estructurales discriminan de manera significativa los grupos de madurez (p-valor < 0.05). A partir de los valores y distribuciones de las métricas con mayor carga en la agrupación de madurez y de fotointerpretación, se asoció cada uno de ellos con diferentes estados de madurez forestal (Fig. 3).

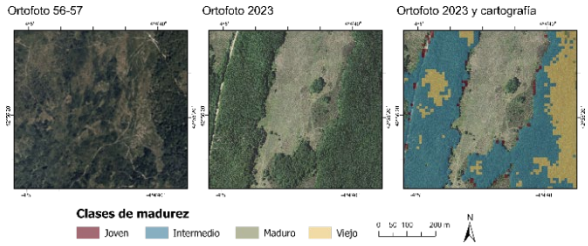


Figura 3. Asignación de categoría de madurez a cada grupo.

Las métricas incluidas para la discriminación de grupos de madurez tras el análisis de correlación variaron según la formación, capturando características estructurales específicas. En la Tabla 3 se resumen algunos resultados relevantes del análisis estructural para todas las formaciones consideradas. Los grupos de métricas relacionadas con la PC1 (métricas relacionadas con alturas más altas) y PC2 (métricas de complejidad vertical) se mantuvieron constantes para todas las formaciones.

Tabla 3. Resultados del análisis estructural de madurez forestal para otras formaciones forestales.

	Robledales	Melojares	Encinares
PCA 80%	5	6	6
Clústeres	4	4	4
Métricas	Hmediana	%huecos >10m	%huecos >10m
	p25	Hmedia - 2018	Hmediana
	Hmedia - 2018	Hmáxima	Percentil25

3.2. Cartografía de madurez forestal

La cartografía de madurez forestal para la región de Cantabria muestra que en los hayedos y los robledales predominan los estados intermedios y maduros, mientras que en los melojares lo hacen los estados más avanzados de madurez (maduro y viejo). Por otro lado, los encinares están dominados por estados intermedios, con poca representación de masas maduras (Fig. 4).

4. DISCUSIÓN

Las diferencias significativas entre los grupos de madurez para todas las métricas estructurales evidencian que estos representan estados estructurales diferenciados. Las métricas estructurales que definen cada uno de los componentes principales, así como los grupos de madurez, representan gradientes de desarrollo estructural relacionados principalmente con mayores alturas y con la complejidad vertical del dosel. Estos resultados son coherentes con lo observado en estudios previos donde la altura máxima y la desviación estándar de la altura eran dos de los predictores más importantes para la madurez del bosque (Fuhr *et al.*,

2022). De hecho, las métricas relacionadas con la complejidad vertical contribuyen a mejorar la diferenciación entre los estados medios y tardíos de la madurez forestal (van Ewijk *et al*., 2011). Los hayedos y los robledales, que son las formaciones naturales con mayor superficie en Cantabria, presentan la distribución más equilibrada entre estados maduros (maduros y viejos) e intermedios, lo que podría sugerir una menor intensidad de gestión o perturbaciones antrópicas pasadas.

Los resultados sugieren que el uso de métricas estructurales derivadas de LiDAR podría contribuir a caracterizar la madurez forestal y diferenciar patrones relevantes entre formaciones, destacando su potencial aplicación en la planificación forestal y territorial. Entre los próximos pasos de este trabajo se incluye la validación de los grupos de madurez obtenidos y de las métricas estructurales, a partir de datos recogidos en campañas de campo y del IFN, con el fin de reforzar la validez de los resultados y la interpretación de la cartografía.

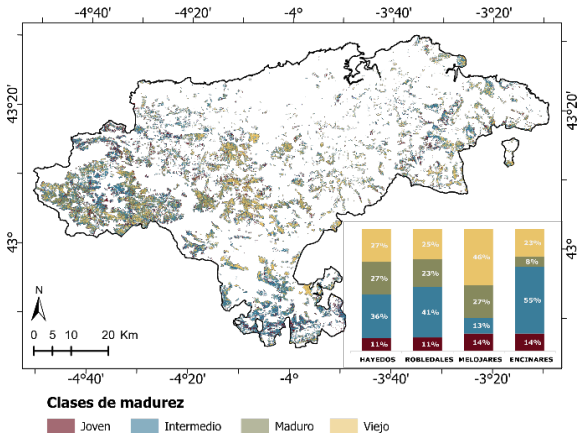


Figura 4. Cartografía de madurez forestal.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del proyecto europeo NBRACER (Programa Horizonte Europa, en virtud del acuerdo de subvención 101112836). LCZ recibió el apoyo del contrato Ramón y Cajal RYC2023-042640-I, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FSE+.

6. REFERENCIAS

Atkins, J. W., Costanza, J., Dahlin, K. M., Dannenberg, M. P., Elmore, A. J., Fitzpatrick, M. C., Hakkenberg, C. R., Hardiman, B. S., Kamoske, A., LaRue, E. A., Silva, C. A., Stovall, A. E. L., & Tielens, E. K. (2023). Scale dependency of lidar-derived forest structural diversity. *Methods in Ecology and Evolution, 14*(2), 708–723. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14040

Belmar, O., Barquín, J., Álvarez-Martínez, J. M., Peñas, F. J., & Del Jesus, M. (2018). The role of forest maturity in extreme hydrological events. *Ecohydrology, 11*(4), 1–12. https://doi.org/10.1002/eco.1947

Chazdon, R. L., Brancalion, P. H. S., Laestadius, L., Bennett-Curry, A., Buckingham, K., Kumar, C., Moll-Rocek, J., Vieira, I. C. G., & Wilson, S. J. (2016). When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio, 45*(5), 538–550. https://doi.org/10.1007/s13280-016-0772-y

de Assis Barros, L., & Elkin, C. (2021). An index for tracking old-growth value in disturbance-prone forest landscapes. *Ecological Indicators, 121*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107175

Frey, S. J. K., Hadley, A. S., Johnson, S. L., Schulze, M., Jones, J. A., & Betts, M. G. (2016). Spatial models reveal the microclimatic buffering capacity of old-growth forests. *Science Advances, 2*(4). https://doi.org/10.1126/sciadv.1501392

Fuhr, M., Lalechère, E., Monnet, J. M., & Bergès, L. (2022). Detecting overmature forests with airborne laser scanning (ALS). *Remote Sensing in Ecology and Conservation, 8*(5), 731–743. https://doi.org/10.1002/rse2.274

Martin, M., Cerrejón, C., & Valeria, O. (2021). Complementary airborne LiDAR and satellite indices are reliable predictors of disturbance-induced structural diversity in mixed old-growth forest landscapes. *Remote Sensing of Environment, 267*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112746

Roussel, J. R., Auty, D., Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R. H., Meador, A. S., Bourdon, J. F., de Boissieu, F., & Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *In Remote Sensing of Environment (Vol. 251).* Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061

van Ewijk, K. Y., Treitz, P. M., & Scott, N. A. (2011). Characterizing Forest Succession using LiDAR derived metrics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 77*(3), 261–269.

Watson, J. E. M., Evans, T., Venter, O., Williams, B., Tulloch, A., Stewart, C., Thompson, I., Ray, J. C., Murray, K., Salazar, A., McAlpine, C., Potapov, P., Walston, J., Robinson, J. G., Painter, M., Wilkie, D., Filardi, C., Laurance, W. F., Houghton, R. A., … Lindenmayer, D. (2018). The exceptional value of intact forest ecosystems. *Nature Ecology and Evolution, 2*(4), 599–610. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0490-x

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.152

Clasificación de cubiertas forestales en la isla de La Palma mediante series temporales Sentinel-2 y Transformers

Gonzalo Martín, Consuelo [1,2] **Garcia Pedrero, Ángel** [1,2] **Boumahdi, Meryeme** [1,2]
Rodríguez Esparragón, Dionisio [3] **Marcello, Javier** [3]

[1] Departamento de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos, Universidad Politécnica de Madrid, España

[2] Centro de Tecnologia Biomédica, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

[3] Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Unidad Asociada ULPGC-CSIC, Las Palmas de Gran Canarias, España

ORCID: Gonzalo Martín 0000-0002-0804-9293 Garcia Pedrero 0000-0002-6848-481X Boumahdi 0000-0003-0600-8137 Rodríguez Esparragón 0000-0002-4542-2501 Marcello 0000-0002-9646-1017

Correspondencia: consuelo.gonzalo@upm.es angelmario.garcia@upm.es m.boumahdi@alumnos.upm.es dionisio.rodriguez@ulpgc.es javier.marcello@ulpgc.es

RESUMEN

La erupción volcánica de 2021 en la isla de La Palma generó cambios significativos en la cubierta forestal, lo que hace necesaria la actualización de la cartografía de cubiertas mediante técnicas robustas de teledetección. En este trabajo se presenta una metodología basada en series temporales de imágenes Sentinel-2 y el modelo de aprendizaje profundo SITS-former, una arquitectura Transformer capaz de modelar dependencias espacio-temporales. Se emplean composiciones mensuales de reflectancia superficial y se evalúa el modelo tanto en su versión base como en una versión mejorada que incorpora información topográfica (DEM, elevación, pendiente y orientación) mediante fusión tardía. Los resultados muestran que la inclusión de variables topográficas incrementa la precisión global del 60% al 71% en el conjunto de validación, mejorando especialmente la discriminación de clases forestales ecológicamente similares como Laurisilva y Fayal-Brezal. El enfoque propuesto demuestra el potencial de los modelos Transformer para la cartografía forestal en entornos complejos y afectados por perturbaciones naturales.

Palabras clave: *Sentinel-2; series temporales; Transformers; SITS-Former; topografía; cartografía forestal*

Fecha de recepción: 11 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Clasificación de cubiertas forestales en la isla de La Palma mediante series temporales Sentinel-2 y Transformers

Gonzalo Martín, Consuelo [1,2], Garcia Pedrero, Ángel [1,2], Boumahdi, Meryeme [1,2], Rodríguez Esparragón, Dionisio [3], Marcello, Javier [3]

[1] Departamento de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

[2] Centro de Tecnologia Biomédica, Universidad Politécnica de Madrid, España.

0000-0002-0804-9293, consuelo.gonzalo@upm.es ; 0000-0002-6848-481X, angelmario.garcia@upm.es.

0000-0003-0600-8137, m.boumahdi@alumnos.upm.es.

[3] Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Unidad Asociada ULPGC-CSIC, Las Palmas de Gran Canarias, España.

0000-0002-4542-2501, dionisio.rodriguez@ulpgc.es ; 0000-0002-9646-1017, javier.marcello@ulpgc.es.

Resumen: La erupción volcánica de 2021 en la isla de La Palma generó cambios significativos en la cubierta forestal, lo que hace necesaria la actualización de la cartografía de cubiertas mediante técnicas robustas de teledetección. En este trabajo se presenta una metodología basada en series temporales de imágenes Sentinel-2 y el modelo de aprendizaje profundo SITS-former, una arquitectura Transformer capaz de modelar dependencias espacio-temporales. Se emplean composiciones mensuales de reflectancia superficial y se evalúa el modelo tanto en su versión base como en una versión mejorada que incorpora información topográfica (DEM, elevación, pendiente y orientación) mediante fusión tardía. Los resultados muestran que la inclusión de variables topográficas incrementa la precisión global del 60% al 71% en el conjunto de validación, mejorando especialmente la discriminación de clases forestales ecológicamente similares como Laurisilva y Fayal-Brezal. El enfoque propuesto demuestra el potencial de los modelos Transformer para la cartografía forestal en entornos complejos y afectados por perturbaciones naturales.

Palabras clave: Imágenes multiespectrales, Aprendizaje Profundo, Topografía, Cartografía Forestal

English Title: Mapping Forest Habitats on La Palma island with Sentinel-2 Time Series and Transformer Models

***Abstract**: The 2021 volcanic eruption on the island of La Palma generated significant changes in the forest cover, which makes it necessary to update the habitat mapping using robust remote sensing techniques. This work presents a methodology based on time series of Sentinel-2 images and the deep learning model SITS-former, a Transformer architecture capable of modeling spatial–temporal dependencies. Monthly surface reflectance composites are used, and the model is evaluated both in its base version and in an improved version that incorporates topographic information (elevation, slope, and aspect) through late fusion. The results show that the inclusion of topographic variables increases overall accuracy from 60% to 71% on the validation set, especially improving the discrimination of ecologically similar forest classes such as Laurisilva and Fayal-Brezal. The proposed approach demonstrates the potential of Transformer models for forest mapping in complex environments affected by natural disturbances.*

***Keywords**: Multiespectral images, Deep Learning, Topography, Forest Cartography*

1. INTRODUCCIÓN

La cartografía precisa de cubiertas forestales constituye un elemento esencial para la gestión ambiental, la conservación de la biodiversidad y la evaluación del impacto de perturbaciones naturales. En Europa, esta obligación viene marcada por la Directiva Hábitats (92/43/EEC), que exige actualizaciones periódicas del estado de conservación de los ecosistemas. Sin embargo, la complejidad estructural y fenológica de algunos hábitats dificulta la elaboración de cartografías fiables apoyadas únicamente en métodos tradicionales o en imágenes mono-temporales. En este contexto, las series temporales provenientes del satélite Sentinel-2 han demostrado mejorar la discriminación de tipos de vegetación al capturar dinámicas fenológicas claves,

especialmente en áreas heterogéneas como las regiones montañosas y volcánicas del sur de Europa (Pesaresi *et al*., 2022).

En la isla de La Palma, la reciente actividad volcánica de la erupción de Cumbre Vieja en 2021, ha generado cambios significativos en la distribución y estructura del paisaje, lo que subraya la necesidad de herramientas avanzadas de teledetección para monitorizar la evolución de la vegetación y evaluar la resiliencia de los ecosistemas forestales Los estudios basados en el sensor Sentinel-2 han mostrado su utilidad para proporcionar información detallada sobre la dinámica espacial y temporal de esta isla (Stoyanov, 2023).

Los recientes avances en aprendizaje profundo para series temporales satelitales han mejorado notablemente la clasificación de coberturas y hábitats, especialmente gracias a los modelos basados en Transformers, capaces de capturar dependencias espacio-temporales complejas (Voelsen *et al*., 2024). Entre ellos, las variantes del Swin Transformer han mostrado mejoras significativas frente a arquitecturas tradicionales, al integrar información temporal y espacial de las series temporales de imágenes. En este contexto, SITS-Former (Yuan *et al*., 2022) destaca como uno de los primeros modelos pre-entrenados específicamente para Sentinel-2, empleando auto-supervisión, siendo capaz de extraer características espaciales, temporales y espectrales de las imágenes. Este modelo incluye un mecanismo de autoatención que modela las relaciones y dependencias espaciales y temporales de forma global. Todo ello, le permite aprender representaciones temporales robustas y adaptables, incluso con datos etiquetados limitados, lo que se traduce en una mayor precisión y un alto potencial para la cartografía de cubiertas.

En este trabajo se evalúa la aplicación del modelo SITS-Former para la clasificación de cubiertas forestales en la isla de La Palma, modelo base, analizando además el efecto de incorporar variables topográficas (modelo mejorado). La complejidad ambiental y volcánica de la isla hace que combinar series temporales Sentinel-2 con modelos Transformer sea una opción prometedora para generar cartografías de cubiertas forestales precisas y robustas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Como datos de referencia (verdad-terreno) para el refinamiento y la evaluación de los modelos, se empleó el Mapa de Vegetación del Gobierno de Canarias (GRAFCAN, 2021), rasterizado a 10 m y reagrupado en siete clases forestales de interés: Coníferas, Laurisilva, Fayal-Brezal, Castaño, Otras especies arbóreas, Suelo y Otros.

Se utilizaron imágenes de los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B con un nivel de procesado 2A, una cobertura nubosa inferior al 10% y una extensión temporal del 2021 al 2023. El preprocesado se llevó a cabo en la plataforma Google Earth Engine, usando el algoritmo Sen2Cor, además se incluyó la detección de nubes mediante S2cloudless con un umbral del 25%, la detección de sombras por proyección en función del azimut solar y un filtrado adicional mediante la capa de calidad de escena (SCL) de las imágenes. A partir de 287 imágenes con diez bandas espectrales remuestreadas a 10 m de resolución, se generaron mosaicos mensuales mediante una agregación de mediana.

La clasificación se realizó mediante el modelo SITS-Former. Para generar el modelo base de clasificación se llevó a cabo un ajuste fino a partir del modelo preentrenado, usando todas las imágenes disponibles del 2022, y de enero a agosto del 2023. Se definieron parches de 5×5 píxeles, utilizando el píxel central como etiqueta de referencia y se utilizó una longitud temporal de 12 meses. Por lo que el tamaño de los patrones de entrenamiento fue 12x10x5x5, siendo 10 el número de bandas espectrales. Se realizó una división en parches sin solapamiento, obteniendo 2 millones de unidades para el análisis. Se seleccionaron aleatoriamente 100 muestras por clase para el conjunto de entrenamiento y 100 para validación, reservando el resto para prueba. La Tabla 1 muestra los hiperparámetros utilizados en el ajuste del modelo.

Tabla 1. Hiperparámetros de entrenamiento.

Épocas	Batch size	Parche	Meses	Bandas	Dim. latente	# bloques Transformer	Cabeza atención	Optimizador
80	128	5×5 píxeles	12	B2, B3, B4, B5, B7, B8, B8A, B11, B12	256	3	8	Adam

Con el fin de mejorar la separabilidad de clases, se desarrolló una versión mejorada del modelo que integra información topográfica, incluyendo el modelo digital de elevaciones (MDE), la pendiente, la orientación y el sombreado de elevación. Estas variables se incorporaron como entradas adicionales procesadas mediante un codificador convolucional y fusionadas con la representación temporal del Transformer en una etapa tardía (fusión tardía), previa a la clasificación, con objeto de incluir en el modelo información sobre la distribución de la vegetación, los patrones de iluminación y la variación microclimática, factores no considerados en las relaciones espaciotemporales.

3. RESULTADOS

El rendimiento de los modelos, tanto en su versión base como mejorada, se evaluó íntegramente con datos del año 2021, primero se determinó la precisión del modelo a partir del conjunto de validación y posteriormente, se compararon los mapas de clasificación generados para toda la isla con los datos de referencia del mismo año.

El modelo base alcanzó para el conjunto de validación una precisión global del 60%, un coeficiente Kappa de 0.533 y un F1-score macro del 60%. Se emplea el F1-score macro como métrica global de comparación entre

modelos. Las métricas de clasificación por clase para este caso, para cada clase, se han incluido en la Tabla 2. Las clases mejor identificadas son Coníferas y Suelo, cuyas características espectrales son muy diferentes del resto de las cubiertas arbóreas, mientras que los valores más bajos de las métricas corresponden a Laurisiva y Fayal-Bretal, debido a su similitud espectral y ecológica. El rendimiento del modelo mejoró de forma notable, cuando se incluyó la información topográfica (Tabla 2). La precisión global en el conjunto de validación alcanzó un 71.29% y el coeficiente Kappa fue de 0.665. Además, se obtuvo un F1 score macro de 70.57%, lo que una mejora global más equilibrada entre clases. Estas mejoras indican no solo un incremento en las predicciones acertadas, sino también una menor confusión entre categorías, especialmente en tipos de vegetación con características similares.

Tabla 2. Resultados de clasificación en el conjunto de validación, para el modelo base y el mejorado.

Clase	Modelo base			Modelo mejorado		
	precisión	exhaustividad	F1-score	precisión	exhaustividad	F1-score
Coníferas	0.72	0.68	0.70	0.72	0.77	0.74
Laurisilva	0.55	0.61	0.58	0.69	0.85	0.76
Fayal-Brezal	0.52	0.47	0.49	0.65	0.57	0.61
Castaño	0.62	0.66	0.64	0.86	0.90	0.88
Otras esp. Arb.	0.67	0.56	0.61	0.77	0.71	0.74
Suelo	0.67	0.70	0.68	0.72	0.79	0.75
Otros	0.47	0.52	0.50	0.53	0.40	0.46

Los dos modelos entrenados se utilizaron para clasificar el territorio de toda la isla, para el año 2021. En la Figura 1a se muestra la distribución de cubiertas según GRAFCAN (referencia), así como los mapas temáticos generados por los modelos SITS-Former base (Fig 1b) y mejorado (Fig. 1c), respectivamente. Se puede observar que el mapa de referencia GRAFCAN muestra el predominio de la clase Suelo y otros, seguida por Coníferas, Fayal-Brezal y Laurisilva, mientras que Castaño y Otras especies arbóreas presentan extensiones más reducidas. En la Figura 1 también se puede apreciar que de forma global la cartografía generada por el modelo mejorado es más próxima a la de GRAFCAN que la del modelo base. Las mejoras más notables se observaron en las clases Castaño, Laurisilva y Otras especies arbóreas, mientras que las clases Suelo y Otros continuaron siendo las más ambiguas debido a su carácter heterogéneo. No obstante, persisten confusiones entre clases espectralmente similares, como Laurisilva y Fayal-Brezal, así como en zonas de transición. Parte de estas discrepancias se asocia también a incertidumbres presentes en la cartografía de referencia.

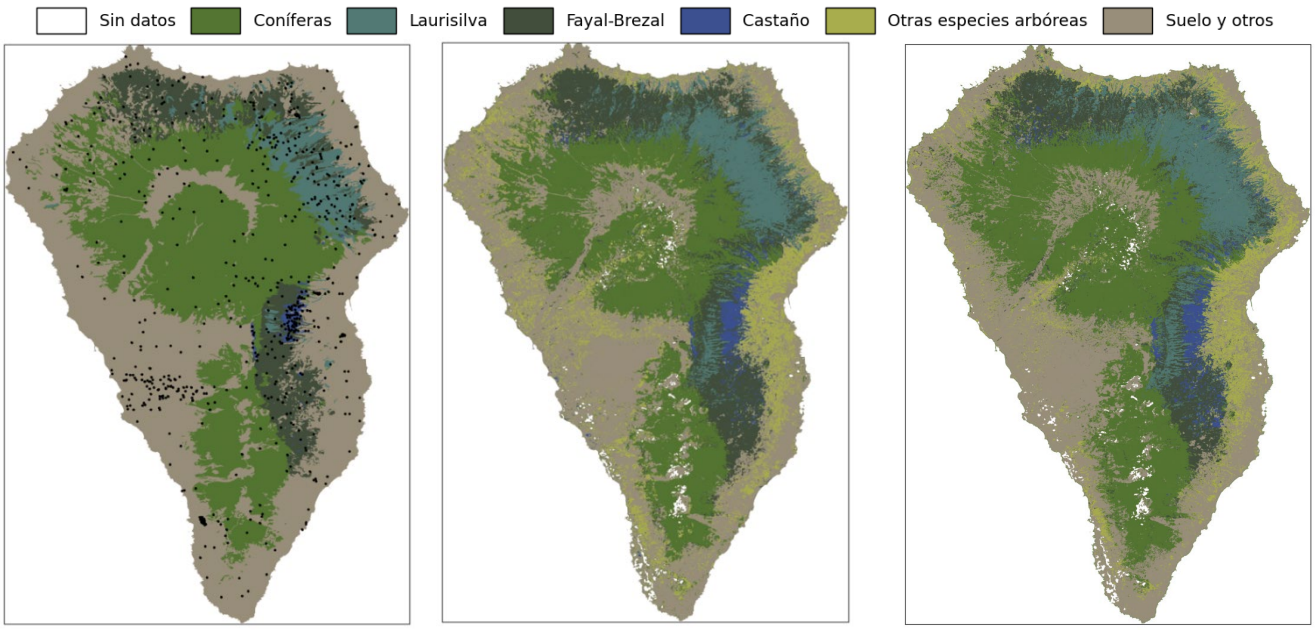


Figura 1: a) Land Cover de GRAFCAN (2021), incluyendo la distribución espacial de los parches de entrenamiento. Y mapas generados con SITS-Former base (b) y mejorado (c).

Estos resultados visuales, están refrendados por las métricas obtenidas, que en el caso del modelo base son: una precisión global del 59.12% y un coeficiente Kappa de 0.47, lo que refleja un nivel de acuerdo moderado más allá del azar. El F1-score macro fue del 46.17%, evidenciando diferencias notables en el rendimiento entre clases con distinta representatividad. Mientras que, en el modelo mejorado, se alcanzó una precisión global del 60.04%, un coeficiente Kappa de 0.47 y un F1-score macro del 44.45%.

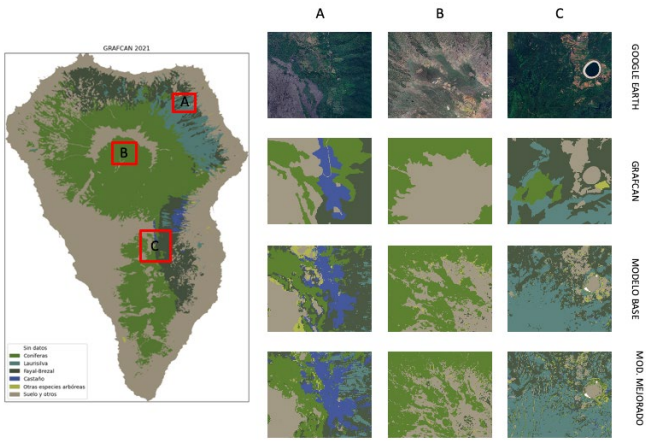


Figura 2: Ubicación y resultados de clasificación para tres áreas representativas

Para contextualizar los resultados de clasificación, se realizó un análisis visual en tres zonas de La Palma (A, B y C), comparando imágenes originales (Google Earth), datos de referencia (GRAFCAN) y las clasificaciones de los modelos base y mejorado (Figura 2). Se puede apreciar que el modelo base reproduce las clases dominantes, pero muestra discrepancias relevantes, como la confusión entre Laurisilva y Fayal-Brezal en el área A o la clasificación errónea de zonas desnudas en el área B. En cambio, el modelo mejorado se ajusta mucho mejor a la referencia, reduce confusiones y refleja con mayor precisión la heterogeneidad espacial, especialmente en el área C, donde representa con mayor exactitud los límites y patrones de cobertura.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se ha evaluado el rendimiento del modelo SITS-Former para la clasificación de cubiertas forestales en la isla de La Palma, analizando el efecto de la incorporación de información topográfica en los resultados de clasificación de esta zona volcánica de elevada complejidad ecológica. La integración de dicha información mejoró las métricas analizadas, confirmando que el relieve aporta un contexto discriminativo clave para separar clases espectralmente próximas. La estrategia de fusión tardía resultó especialmente eficaz, ya que preserva la capacidad del SITS-Former para modelar la dinámica espectro-temporal mientras añade información estática que refuerza la separabilidad entre categorías.

A pesar de esta mejora, persisten limitaciones relevantes, como son: la heterogeneidad de la clase *Otros* y la baja precisión en categorías minoritarias, especialmente. Estos resultados, que muestran un acuerdo moderado con los datos de validación, reflejan la complejidad ecológica y espectral del territorio y la dificultad de discriminar clases transicionales o poco representadas. Futuros trabajos deberían revisar la definición de clases, aumentar la representación de categorías minoritarias e incorporar información estacional o datos de mayor resolución para mejorar la robustez y la capacidad discriminativa del modelo.

5. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el MITECO, el Gobierno de Canarias y el Cabildo de La Palma (ref. 316/2023/ACU) y por el Organismo Autónomo Parques Nacionales (Proyecto SPIP2022-02897). Se agradece la disponibilidad del MDT a partir de los vuelos LiDAR del PNOA, así como a GESPLAN y al Excmo. Cabildo Insular de La Palma el acceso a la cartografía de referencia.

6. REFERENCIAS

Pesaresi, S., Mancini, A., Quattrini, G., & Casavecchia, S. (2022). Functional Analysis for Habitat Mapping in a Special Area of Conservation Using Sentinel-2 Time-Series Data. *Remote Sensing*, *14*(5), 1179.

Andrey Stoyanov, A. (2023). Monitoring and spatial distribution of lava and volcanic eruptions from Cumbre Vieja ridge on island La Palma in the Canary Islands occured in 2021 by methods of remote sensing, Proc. SPIE 12734, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XIV, 127341J (19 October 2023).

Voelsen, M., Rottensteiner, F., & Heipke, C. (2024). Transformer models for land cover classification with satellite image time series. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, *92*(5), 547-568

Yuan, Y., Lin, L., Liu, Q., Hang, R., & Zhou, Z. (2022). SITS-Former: A pre-trained spatio-spectral-temporal representation model for Sentinel-2 time series classification. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 106, 102651.

GRAFCAN 2021. https://www.idecanarias.es/listado_servicios/mapa-de-vegetacion

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.157

Desarrollo de un algoritmo para la detección, identificación y posicionamiento automático de árboles mediante deep learning y métodos topográficos

Pérez Pablos, Sergio [1] **Pugni Stanek, Tomás** [1] **Merino De Miguel, Silvia** [1]

[1] ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural (Universidad Politécnica de Madrid), C/ José Antonio Novais, 10, 28040 Madrid

ORCID: Pugni Stanek 0009-0000-2527-1657 Merino De Miguel 0000-0002-4764-5311

Correspondencia: sergiopzpablos@gmail.com tomas.pugni@upm.es silvia.merino@upm.es

RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un sistema automático para la detección, identificación y posicionamiento planimétrico de árboles individuales a partir de imágenes panorámicas terrestres georreferenciadas, sin empleo directo de sensores LiDAR en el cálculo posicional. La metodología integra un modelo de detección basado en Deep Learning (YOLOv8) con un algoritmo de seguimiento multiobjeto (Deep SORT) y un procedimiento topográfico de intersección directa simple para estimar coordenadas planimétricas. El dataset fue generado a partir de inventarios de vegetación en carreteras de la Comunidad de Madrid, utilizando imágenes equirectangulares capturadas mediante sistema Mobile Mapping. Se entrenó el modelo con imágenes etiquetadas manualmente, estructuradas en subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba. El ajuste de hiperparámetros se realizó mediante optimización automática. Las detecciones obtenidas se asociaron entre imágenes consecutivas y se transformaron en lecturas angulares a partir de la geometría de la proyección panorámica y la orientación del sensor. La posición final de cada árbol se estimó mediante intersección de visuales desde estaciones GNSS conocidas. La validación se realizó comparando los resultados con la nube de puntos LiDAR del mismo sistema. Los resultados muestran que la combinación de detección 2D y métodos topográficos permite obtener posiciones planimétricas coherentes, con errores compatibles con inventarios forestales de carácter operativo, reduciendo significativamente la intervención manual.

Palabras clave: *YOLOv8, inventario forestal, intersección directa, posicionamiento, visión por computador*

Fecha de recepción: 13 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Desarrollo de un algoritmo para la detección, identificación y posicionamiento automático de árboles mediante deep learning y métodos topográficos

Pérez Pablos, Sergio [(1)], Pugni Stanek, Tomás [(1)], Merino De Miguel, Silvia [(1)]

[(1)] ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural (Universidad Politécnica de Madrid), 10 Madrid.

sergiopzpablos@gmail.com ; 0009-0000-2527-1657, tomas.pugni@upm.es.

0000-0002-4764-5311, silvia.merino@upm.es.

Resumen: Se presenta el desarrollo de un sistema automático para la detección, identificación y posicionamiento planimétrico de árboles individuales a partir de imágenes panorámicas terrestres georreferenciadas, sin empleo directo de sensores LiDAR en el cálculo posicional. La metodología integra un modelo de detección basado en *Deep Learning* (YOLOv8) con un algoritmo de seguimiento multiobjeto (Deep SORT) y un procedimiento topográfico de intersección directa simple para estimar coordenadas planimétricas. El dataset fue generado a partir de inventarios de vegetación en carreteras de la Comunidad de Madrid, utilizando imágenes equirectangulares capturadas mediante sistema *Mobile Mapping*. Se entrenó el modelo con imágenes etiquetadas manualmente, estructuradas en subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba. El ajuste de hiperparámetros se realizó mediante optimización automática. Las detecciones obtenidas se asociaron entre imágenes consecutivas y se transformaron en lecturas angulares a partir de la geometría de la proyección panorámica y la orientación del sensor. La posición final de cada árbol se estimó mediante intersección de visuales desde estaciones GNSS conocidas. La validación se realizó comparando los resultados con la nube de puntos LiDAR del mismo sistema. Los resultados muestran que la combinación de detección 2D y métodos topográficos permite obtener posiciones planimétricas coherentes, con errores compatibles con inventarios forestales de carácter operativo, reduciendo significativamente la intervención manual.

Palabras clave: YOLOv8, inventario forestal, intersección directa, posicionamiento, visión por computador.

Development of an algorithm for automatic tree detection, identification and positioning using deep learning and topographic methods

***Abstract**: This study presents the development of an automated system for individual tree detection, identification and planimetric positioning using georeferenced terrestrial panoramic imagery without direct LiDAR-based positioning. The methodology integrates a Deep Learning detection model (YOLOv8), a multi-object tracking algorithm (Deep SORT), and a topographic direct intersection method to estimate tree coordinates. The dataset was generated from roadside vegetation inventories in the Comunidad de Madrid (Spain), using equirectangular panoramic images acquired with a Mobile Mapping system. The model was trained with manually annotated images divided into training, validation and test subsets. Hyperparameter tuning was performed automatically to optimize performance.Detected objects were associated across multiple images and transformed into angular observations using panoramic projection geometry and sensor orientation data. Final tree positions were computed through the intersection of sight lines from GNSS-known stations. Validation was conducted against LiDAR point cloud data from the same acquisition system.Results indicate that combining 2D object detection with classical topographic methods enables consistent planimetric positioning suitable for operational forest inventories, significantly reducing manual intervention.*

***Keywords**: YOLOv8, forest inventory, direct intersection, positioning, computer vision.*

1. INTRODUCCIÓN

La automatización del inventario de arbolado en entornos lineales constituye actualmente una interesante línea de innovación en el ámbito de la geomática aplicada. La disponibilidad de sistemas *Mobile Mapping* equipados con cámaras panorámicas, sensores GNSS/IMU y escáneres LiDAR ha permitido generar

grandes volúmenes de datos geoespaciales de alta resolución en tiempos reducidos (Wu *et al*., 2025). No obstante, el procesamiento y explotación eficiente de dichos datos para su transformación en información útil, continúa siendo un desafío técnico significativo.

En paralelo, el desarrollo reciente de arquitecturas de *Deep Learning* para detección de objetos ha demostrado una elevada capacidad para identificar automáticamente elementos discretos en imágenes complejas. En este sentido, los modelos de la familia YOLO (*You Only Look Once*) permiten realizar detección en tiempo real con un equilibrio adecuado entre precisión y coste computacional (Ali *et al*., 2018), lo que los convierte en herramientas especialmente adecuadas para aplicaciones operativas.

En inventarios de arbolado viario, la detección automática de individuos constituye únicamente una parte del problema. Resulta igualmente necesario asociar las observaciones repetidas de un mismo pie en sucesivas imágenes, y estimar su posición espacial con precisión suficiente para su integración en bases de datos cartográficas (Ke *et al*., 2024). De manera tradicional, el posicionamiento de árboles se ha venido realizando mediante explotación directa de la nube LiDAR (Mehtab, 2022). Sin embargo, ello implica un procesamiento costoso y no siempre necesario cuando el objetivo es exclusivamente planimétrico.

El presente trabajo propone un enfoque metodológico híbrido que combina: (i) detección 2D basada en *Deep Learning* sobre imágenes panorámicas equi-rectangulares, (ii) seguimiento multi-objeto para consolidación de identificadores y (iii) aplicación de un método topográfico clásico de intersección directa simple para el cálculo de coordenadas planimétricas. El sistema evita el uso directo del LiDAR en la estimación posicional, empleándolo únicamente como referencia independiente para validación.

El objetivo principal es evaluar la viabilidad técnica y la coherencia geométrica de este enfoque integrado para la realización de inventarios de arbolado en entornos antropizados con carácter operativo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y datos de partida

El área de estudio se localiza en dos zonas de la Comunidad de Madrid (CAM) denominadas Zona Oeste y Zona Norte, cuya ubicación aparece en la Figura 1. La superficie total estudiada es de, aproximadamente, 15 km^2. En términos lineales, se han muestreado 260 km de tramos de carretera en la Zona Oeste, y 250 km en la Zona Norte, lo que hace un total de 510 km.

Las dimensiones y características del arbolado que aparece junto a estas carreteras permiten analizar la eficacia de la detección en distintos entornos y para distintas especies. Esto es debido al marcado gradiente altitudinal y la variedad de usos del suelo que quedan recogidos en la muestra de carreteras recorridas.

A modo de resumen, se pueden encontrar las siguientes formaciones arbóreas: Pinar de *Pinus pinea*, Pinar de *P. sylvestris*, formaciones de *Quercus ilex* y de *Q. pyrenaica*, matorral disperso de *Juniperus oxycedrus* y *J. communis*, y vegetación colonizadora espontánea (principalmente *Salix sp*., *Populus sp.* y *Fraxinus sp.*). Además, en los núcleos urbanos, destacan las especies más utilizadas en jardinería: *Platannus sp., Morus sp. Cedrus sp.,* y *Prunus sp.,* entre otros.

Los datos fueron capturados mediante un sistema *Mobile Mapping* IP-S3 de Topcon equipado con: (i) 6 cámaras panorámicas de 30 megapíxeles, (ii) un receptor GNSS y un sistema inercial (IMU), y (iii) sensor LiDAR de 32 haces y una velocidad de 700 000 pulsos por segundo. Las imágenes equi-rectangulares georreferenciadas constituyeron la base del procesamiento. Por otro lado, la nube de puntos LiDAR se empleó exclusivamente para validación.

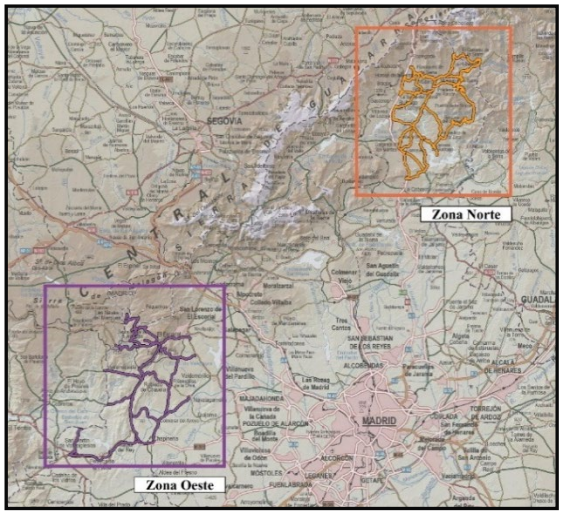


Figura 1 Localización del área de estudio en la CAM.

2.2. Métodos

La metodología seguida se estructura en cuatro etapas: (i) creación de un *dataset* para entrenamiento del modelo, (ii) entrenamiento del modelo de detección y seguimiento, (iii) extracción de parámetros de posición y mediciones, y (iv) validación de resultados.

2.2.1. Construcción del *dataset*

La primera fase consistió en la creación de un *dataset* formado por imágenes y etiquetas asociadas a cada árbol que apareciera en ellas. Para ello, se seleccionaron 921 imágenes representativas con alta variabilidad de especies, morfologías de copa, tamaño aparente y condiciones de iluminación.



Figura 2 Ejemplo de imagen con árboles identificados.

Las imágenes fueron etiquetadas manualmente utilizando *bounding boxes* con clase única ("árbol"), tal y como muestra la Figura 2. A continuación, el *dataset* se dividió en: (i) entrenamiento, (ii) validación, y (iii) prueba (≈1%).

2.2.2. Entrenamiento, detección y seguimiento

Se empleó YOLOv8 como arquitectura de detección por su eficiencia en detección en una sola etapa y su capacidad para manejar objetos de escala variable. El entrenamiento de este algoritmo se realizó mediante optimizador *Adam* utilizando el *dataset* anteriormente construido y un ajuste automático de hiper-parámetros (l*earning rate, batch size* y *momentum*). El rendimiento del modelo se evaluó mediante tres métricas: mAP (*mean Average Precision*), *precision* (precisión) y *recall* (exhaustividad). El análisis de convergencia permitió seleccionar el modelo con mejor equilibrio entre sobreajuste y capacidad de generalización.

Las detecciones individuales por imagen generan múltiples observaciones del mismo árbol en capturas consecutivas. Dichas detecciones individuales fueron asociadas entre imágenes mediante un algoritmo *Deep SORT*, que combina: (i) predicción de estado mediante filtro de Kalman (predicción espacial), (ii) asociación basada en IoU (*Intersection over Union*), y (iii) métrica de similitud visual derivada de características profundas. Este procedimiento asigna un identificador único persistente a cada árbol individual detectado, permitiendo agrupar todas las visuales correspondientes antes del cálculo geométrico de la posición.

2.2.3. Posicionamiento mediante intersección directa

Cada detección proporciona una posición horizontal en la imagen panorámica. Para cada detección se calcula el azimut de la observación a partir de: (i) las coordenadas GNSS de la imagen, (ii) la orientación del sensor, y (iii) la posición horizontal del centroide de la *bounding box* en la imagen panorámica. Dado que la proyección equirectangular establece una relación lineal entre coordenada horizontal en píxeles y ángulo azimutal, se calculó el ángulo de observación θi para cada estación i mediante la ecuación 1.

$$\theta i = \theta sensor + \Delta\theta pixel \quad \text{(Eq. 1)}$$

donde θsensor corresponde al azimut del vehículo y Δθpixel se deriva de la posición relativa del *bounding box* respecto al centro de la imagen.

Con al menos dos visuales independientes desde dos estaciones A y B cualesquiera, la posición planimétrica del árbol V se obtiene por el método de intersección directa simple. Para ello es necesario conocer las coordenadas planimétricas X, Y de las estaciones A y B (dos posicionamientos del sensor derivadas de las coordenadas GNSS), y los azimuts de las alineaciones AV y BV, calculadas de acuerdo con la Eq. 1.

Como normalmente existen más de dos observaciones por árbol, se pudieron generar múltiples soluciones parciales, lo que permitió evaluar la precisión geométrica en función de variables como el ángulo de intersección, seleccionar aquellas configuraciones más robustas o descartar aquellas configuraciones más próximas a la colinealidad.

2.2.4. Validación

La validación se realizó comparando las coordenadas planimétricas obtenidas a partir del procesado de las imágenes equi-rectangulares, con las posiciones medidas sobre la nube LiDAR que había sido captada por el mismo sistema (*Mobile Mapping* IP-S3) y de manera simultánea, eliminando así la variabilidad GNSS externa y evaluando exclusivamente el error metodológico.

La nube de puntos LiDAR, previamente georreferenciada, se utilizó para identificar manualmente posiciones de referencia para un subconjunto de árboles. De esta manera, se compararon las coordenadas planimétricas estimadas mediante el método propuesto con dichas posiciones de control, obteniendo métricas de error absoluto y análisis de dispersión.

3. RESULTADOS

El modelo YOLOv8 mostró una convergencia estable durante el entrenamiento, alcanzando valores elevados de mAP y manteniendo una adecuada relación entre precisión y exhaustividad. El *dataset* de entrenamiento confirmó la capacidad del modelo para detectar árboles bajo condiciones muy variables de iluminación, fondo y solapamiento parcial entre árboles.

El módulo de seguimiento mediante *Deep SORT* redujo significativamente las detecciones redundantes y permitió consolidar trayectorias coherentes para cada individuo, mejorando la coherencia espacial de los azimuts. La tasa de asignación incorrecta fue baja y se concentró principalmente en zonas con alta densidad de arbolado y copas solapadas.

Desde el punto de vista geométrico, la calidad del posicionamiento estuvo directamente relacionada con el ángulo de intersección entre visuales. Configuraciones próximas a 90° generaron soluciones estables con menor sensibilidad a errores angulares, mientras que ángulos pequeños y grandes incrementaron la incertidumbre planimétrica. Además, también influyen en la calidad del posicionamiento tanto la distancia entre posiciones del sensor utilizadas, como la confianza de detección.

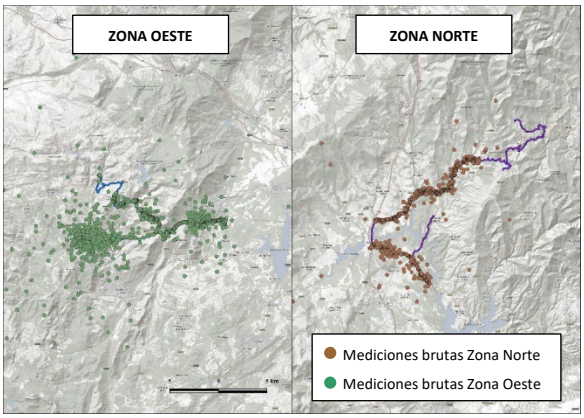


Figura 3 Distribución de todas las localizaciones (incluidos falsos positivos y errores de medición).

La Figura 3 muestra la distribución de los posicionamientos iniciales, es decir, incluidos los falsos positivos y los errores de medición. La figura 4 muestra aquellos posicionamientos derivados de la metodología expuesta y que contaron con incertidumbres aceptables.

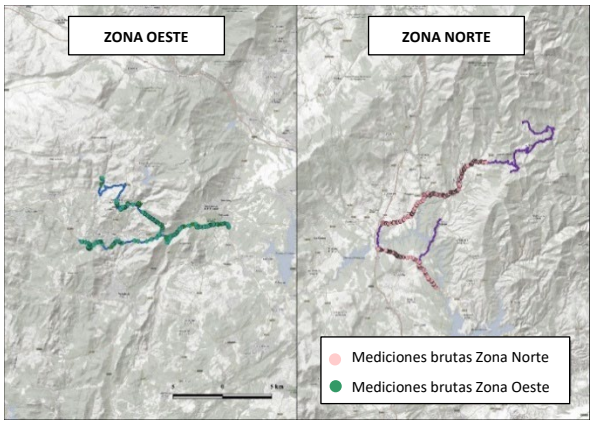


Figura 4 Distribución de localizaciones (solo mediciones con valores de incertidumbre aceptables).

La comparación con LiDAR evidenció que el error planimétrico se mantuvo dentro de rangos compatibles con inventarios de arbolado operativos en entornos lineales. Las Tablas 1 y 2 muestran el error por rangos, y las frecuencias absoluta y relativa para la Zona Oeste y Norte, respectivamente. En total se utilizaron 286 árboles para la validación de las posiciones en la Zona Oeste y 275 para la Norte. La dispersión observada responde a: (i) los errores angulares derivados de la discretización en píxeles, (ii) la incertidumbre en la determinación del ángulo azimutal del sensor, y (iii) la aproximación puntual del árbol mediante *bounding box* 2D.

En el caso de la Zona Oeste (Tabla 1), la mayoría de las observaciones (57%) presentaron errores inferiores a 3 m. Por otro lado, el mayor porcentaje se encontró en el intervalo 2-3 m. Sin embargo, un 24% de las mediciones exhibieron errores superiores a 4 m. En términos globales, el error medio fue de 2.8 m, con una desviación estándar global de 7.5 m. Los resultados para la Zona Norte (Tabla 2) mostraron un 60% de los árboles posicionados con un error inferior a 3 m. Sin embargo, un 22% de los pies fueron posicionados con más de 5 m de error. En términos globales, el error medio fue de 4.2 m, con una desviación estándar global de 5.3 m.

Tabla 1. Distribución del error en la Zona Oeste.

Zona	Rango error (m)	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa (%)
Oeste	0 – 1	14	5
	1 – 2	57	20
	2 – 3	92	32
	3 – 4	55	19
	4 – 5	32	11
	5 – 6	14	5
	> 6	22	8
	Total:	286	100%

Tabla 2. Distribución del error en la Zona Norte.

Zona	Rango error (m)	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa (%)
Norte	0 – 1	33	12
	1 – 2	81	29
	2 – 3	52	19
	3 – 4	35	13
	4 – 5	13	5
	> 5	61	22
	Total:	275	100%

En conjunto, los resultados demuestran que la combinación de detección automática y métodos topográficos clásicos constituye una alternativa técnicamente consistente para la generación de cartografía puntual de arbolado viario, con reducción sustancial del tiempo de procesamiento respecto a metodologías basadas exclusivamente en explotación de datos LiDAR.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema automatizado que integra: (i) detección 2D basada en *Deep Learning*, (ii) seguimiento multi-objeto, e (iii) intersección directa simple topográfica clásica. La metodología permite estimar posiciones planimétricas de árboles individuales utilizando exclusivamente imágenes panorámicas georreferenciadas para el cálculo, empleando LiDAR únicamente para validación. El enfoque demuestra que la combinación de inteligencia artificial y topografía clásica constituye una alternativa viable y eficiente para inventarios lineales de arbolado, reduciendo tiempos de procesamiento y dependencia de medición manual. Futuras mejoras podrían incluir ajuste robusto por mínimos cuadrados y estimación altimétrica.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a RELIEVE MDC la cesión de los datos y herramientas empleados en este estudio.

6. REFERENCIAS

Ali, W., Abdelkarim, S., Zidan, M., Zahran, M., & El Sallab, A. (2018). Yolo3d: End-to-end real-time 3d oriented object bounding box detection from lidar point cloud. In: Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV) workshops.

Ke, H., Li, H., Wang, B., Tang, Q., Lee, Y. H., & Yang, C. F. (2024). Integrations of Labellmg, You Only Look Once (YOLO), and Open Source Computer Vision Library (OpenCV) for Chicken Open Mouth Detection. Sensors & Materials, 36.

Mehtab, S. (2022). Deep neural networks for road scene perception in autonomous vehicles using LiDARs and vision sensors (Doctoral dissertation, PhD Thesis, Auckland University of Technology, New Zealand).

Wu, Y., Zhong, S., Ma, Y., Zhang, Y., & Liu, M. (2025). Application of SLAM-based mobile laser scanning in forest inventory: Methods, progress, challenges, and perspectives. Forests, 16(6), 920.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.171

Detección de perturbaciones en pinares mediante series temporales Landsat y el algoritmo Edyn.

Caiza-Morales, Lorena [1] **Gómez, Cristina** [1,2] **Olano, José Miguel** [1]

[1] iuFOR, EiFAB, Universidad de Valladolid, Campus Duques de Soria, Soria, España

[2] Department of Geography and Environment, School of Geosciences, University of Aberdeen, Aberdeen AB24 3UE, Scotland, UK.

ORCID: Caiza-Morales 0009-0006-3337-430X Gómez 0000-0002-2756-0863 Olano 0000-0002-4526-5462

Correspondencia: lorena.caiza@uva.es cgomez@uva.es josemiguel.olano@uva.es

RESUMEN

Los bosques están expuestos a perturbaciones naturales y antrópicas que provocan cambios en la cobertura forestal de distinta duración e intensidad. Estas alteraciones pueden ser desde cambios abruptos hasta procesos graduales de degradación. La detección temprana y caracterización precisa de estos cambios es fundamental para la gestión forestal sostenible. Por otro lado, la teledetección se ha consolidado como una herramienta clave para el análisis de la dinámica forestal. Además, la creciente disponibilidad de series temporales de imágenes satelitales permite obtener una visión histórica coherente de la dinámica de los bosques. Este trabajo evalúa el rendimiento y la sensibilidad del algoritmo Edyn para la detección de perturbaciones en pinares del centro de la península Ibérica mediante el análisis de series temporales de datos Landsat (2014–2024). Para ello se analizaron dos tipos de perturbación: cortas y defoliación por procesionaria del pino (PPM). El estudio se centró en consolidar una base de datos que integrara los dos tipos de perturbación, así como en identificar el índice espectral más sensible en cada caso, evaluando la magnitud de cambio estimada mediante NDVI, NBR, TCG y SAVI. Los resultados indican que el NDVI es el índice más sensible para la detección de cortas, mientras que el NBR es más sensible a las defoliaciones por PPM. El uso conjunto de índices adecuados y métricas estacionales mejora la identificación de cambios forestales y del agente que los provoca.

Palabras clave: *series temporales, claras, defoliación, cambios*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Detección de perturbaciones en pinares mediante series temporales Landsat y el algoritmo Edyn.

Caiza-Morales, Lorena [(1)], Gómez, Cristina [(1,2)], Olano, José Miguel [(1)]

[(1)] iuFOR, EiFAB, Universidad de Valladolid, España.

0009-0006-3337-430X, lorena.caiza@uva.es ; 0000-0002-4526-5462, josemiguel.olano@uva.es.

[(2)] Department of Geography and Environment, School of Geosciences, University of Aberdeen, Aberdeen AB24 3UE, Scotland.

0000-0002-2756-0863, cgomez@uva.es.

Resumen: Los bosques están expuestos a perturbaciones naturales y antrópicas que provocan cambios en la cobertura forestal de distinta duración e intensidad. Estas alteraciones pueden ser desde cambios abruptos hasta procesos graduales de degradación. La detección temprana y caracterización precisa de estos cambios es fundamental para la gestión forestal sostenible. Por otro lado, la teledetección se ha consolidado como una herramienta clave para el análisis de la dinámica forestal. Además, la creciente disponibilidad de series temporales de imágenes satelitales permite obtener una visión histórica coherente de la dinámica de los bosques. Este trabajo evalúa el rendimiento y la sensibilidad del algoritmo Edyn para la detección de perturbaciones en pinares del centro de la península Ibérica mediante el análisis de series temporales de datos Landsat (2014–2024). Para ello se analizaron dos tipos de perturbación: cortas y defoliación por procesionaria del pino (PPM). El estudio se centró en consolidar una base de datos que integrara los dos tipos de perturbación, así como en identificar el índice espectral más sensible en cada caso, evaluando la magnitud de cambio estimada mediante NDVI, NBR, TCG y SAVI. Los resultados indican que el NDVI es el índice más sensible para la detección de cortas, mientras que el NBR es más sensible a las defoliaciones por PPM. El uso conjunto de índices adecuados y métricas estacionales mejora la identificación de cambios forestales y del agente que los provoca.

Palabras clave: series temporales, claras, defoliación, cambios

Detection of forest disturbances in pine forests using Edyn in Landsat time series.

***Abstract**: Forest ecosystems are exposed to natural and anthropogenic disturbances that cause changes in forest cover of varying duration and intensity, ranging from abrupt alterations to gradual degradation processes. Early and accurate detection of these changes is essential for sustainable forest management. In response to this, remote sensing has established itself as a key tool for analyzing forest dynamics. In addition, the growing availability of time series of satellite images provides a consistent and cost-effective historical view of forests. This study evaluates the performance and sensitivity of the Edyn algorithm for detecting forest changes in pine stands on the center of Iberian Peninsula by analyzing time series of Landsat images (2014–2024). To this end, four types of change were analyzed: clearcutting, and defoliation by the pine processionary moth (PPM). The study focused on consolidating a database that groups the two types of change and identifying the most sensitive spectral index for each case, evaluating the magnitude of change obtained with NDVI, NBR, TCG, and SAVI. The results indicate that NDVI is the most sensitive index for detecting clearcutting, while NBR is more sensitive to gradual events e.i. defoliation by PPM. The combined use of appropriate indices and seasonal metrics improves the identification of forest changes and the agent causing them.*

***Keywords**: Clearcutting, Thinning, pine processionary, droughts, time series.*

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques son sistemas altamente dinámicos, moldeados por la interacción continua entre procesos naturales y factores antropogénicos que afectan su estructura y funcionamiento. Comprender esta complejidad requiere herramientas de monitorización capaces de capturar variaciones sutiles y cambios graduales en el estado del ecosistema, más allá de la simple detección de modificaciones en el uso del suelo (Miguel *et al*., 2024). Si bien los esfuerzos tradicionales se han centrado principalmente en las variaciones de

superficie forestal, la creciente presencia de factores de estrés como sequías o brotes de plagas asociadas a cambios en los regímenes de precipitación y la mayor frecuencia de eventos de sequía (Ramsfield *et al*., 2016) junto con las perturbaciones derivadas de la gestión forestal, exige métodos de seguimiento más específicos. La teledetección ha demostrado ser una herramienta clave para el seguimiento de perturbaciones forestales. Asimismo, la creciente disponibilidad de imágenes Landsat y la mejora en la compatibilidad entre satélites han facilitado el desarrollo de algoritmos de detección de cambios basados en el análisis de series temporales (Giambelluca *et al*. 2025). Entre estos algoritmos de cambio basados en series temporales destacan CCDC (Zhu *et al*., 2012) y BEAST (Zhao *et al*., 2019), que han demostrado ser muy eficaces para detectar perturbaciones de gran magnitud, como incendios o tala rasa, pero presentan menor sensibilidad frente a cambios sutiles o graduales como la defoliación por insectos (Zhu *et al*. 2017).

En este estudio, nuestro objetivo es evaluar el rendimiento y la sensibilidad del algoritmo Edyn (Brooks *et al*. 2017) en la detección de perturbaciones bruscas y graduales, incluyendo cortas y defoliación por procesionaria del pino (PPM) en los pinares de la Península Ibérica, utilizando series temporales Landsat desde 2014 hasta 2024. El estudio se centró en consolidar una base de datos que agrupara los dos tipos de cambio y en identificar el índice espectral más sensible para cada caso, evaluando la magnitud de cambio obtenida con NDVI, NBR, TCG y SAVI.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio.

El área de estudio comprende un conjunto de muestras distribuidas por los pinares del interior de España. Las muestras de cortas se concentran en el extremo este de Castilla y León y las muestras de procesionaria están localizadas principalmente en Madrid y Castilla-La Macha (Figura 1).

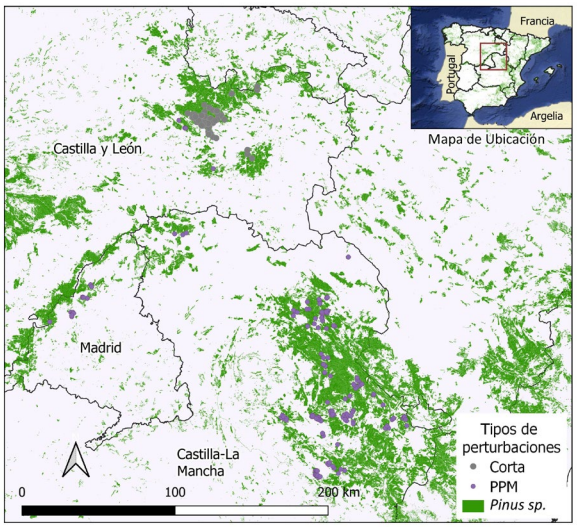


Figura 1. Localización de las muestras de referencia de cada tipo de perturbación.

2.2. Construcción de la base de datos de referencia

Las perturbaciones asociadas a cortas se identificaron mediante interpretación visual de imágenes de Google Earth, centrándose en áreas con actividades forestales en la región de Castilla y León. Para la identificación de defoliación por PPM se integró información procedente de registros oficiales de las administraciones autonómicas de Madrid y Castilla-La Mancha. Dado que las áreas más susceptibles a defoliaciones intensas corresponden a los bordes de los rodales y árboles aislados (Montoya and Hernández, 1998) se realizó una selección espacial de píxeles con cobertura forestal que cumplían los siguientes criterios: alta defoliación, cobertura forestal con altura superior a 5 m (según el modelo digital de altura de vegetación de la 2ª cobertura del PNOA, 2017) y evidencia de pérdida estacional de follaje. Este último criterio se determinó mediante análisis espectral, identificando píxeles con una diferencia de NDVI Landsat superior a 0.10 entre otoño e invierno, coherente con el ciclo fenológico de la PPM, cuya activa fase larvaria durante el invierno provoca una defoliación apreciable en las copas de los pinos (Figura 2).

El conjunto de datos incluye 100 muestras afectadas por cortas, y 200 por defoliación por PPM. Para este estudio, las muestras se dividieron en subconjuntos de prueba y validación (50/50 para las cortas a hecho y 100/100 para la defoliación por PPM).

2.3. Extracción de las series temporales Landsat

Para la preparación de la serie temporal Landsat OLI/OLI-2 2014–2024, se utilizó la herramienta Google Earth Engine. Durante esta etapa se aplicó una armonización de datos y un enmascaramiento de nubes. Para completar la falta de datos debida a la presencia de nubes, se hizo una interpolación entre observaciones temporalmente, y se calcularon los índices espectrales. Seleccionamos índices de vegetación que combinan la banda roja (R), infrarroja cercana (NIR) e infrarroja de onda corta (SWIR). Estos índices incluyen: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Quemado Normalizado (NBR) e Índice Tasseled Cap Greenness (TCG) (Tabla 1). Finalmente, se extrajo la serie de datos ráster de 9 x 9 píxeles con una frecuencia temporal de 2 observaciones por mes, para cada localización de referencia.

Tabla 1. Índices espectrales de vegetación y sus ecuaciones utilizadas en este estudio para caracterizar perturbaciones forestales.

Índice	Ecuación	Referencia
NDVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	(Tucker, 1979)
NBR	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	(Key and Benson, 2006)

Índice	Ecuación	Referencia
SAVI	$\frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED} + \text{L x } (1 + \text{L})}$	(Huete, 1988)
TCG	$-0.2941 \text{ x BLUE} - 0.243 \text{ x GREEN} - 0.5424 \text{ x RED} + 0.7276 \text{ NIR} + 0.0713 \text{ xSWIR1} - 0.1608 \text{ SWIR2}$	(Hudak *et al*., 2013)

2.4. Aplicación del algoritmo Edyn

Edyn (Exponentially Weighted Moving Average Change Detection) (Brooks *et al*., 2014; Brooks *et al*., 2017), utiliza modelos de regresión armónica para identificar la estacionalidad propia de la vegetación y aplica un control estadístico que permite detectar desviaciones respecto a su comportamiento esperado, estas desviaciones constituyen la magnitud de cambio, definida como la diferencia entre el valor observado del índice espectral y el valor predicho por el modelo armónico. En este estudio, Edyn se aplicó utilizando un esquema de entrenamiento dinámico, que permite al algoritmo adaptarse continuamente a la evolución de la serie temporal. Los parámetros se configuraron siguiendo la recomendación del autor, estableciendo un límite de control (L) de 3 y un peso histórico (λ) de 0.3. Una vez identificadas las anomalías de magnitud negativa, los resultados se interpretaron en relación con el año del evento registrado en la base de datos. En el caso de la PPM, la interpretación se realizó considerando su ciclo biológico. El rendimiento del método se cuantificó mediante la métrica recall, $\textbf{Recall} = \frac{\textbf{TP}}{\textbf{TP+FN}}$ definida como la proporción de eventos correctamente detectados respecto al total de eventos registrados, calculada a partir de los verdaderos positivos (TP) y las perturbaciones no detectadas o falsos negativos (FN).

3. RESULTADOS

Edyn aplicado a la serie de datos Landsat fue capaz de detectar tanto las perturbaciones bruscas como las graduales (Figura 2).

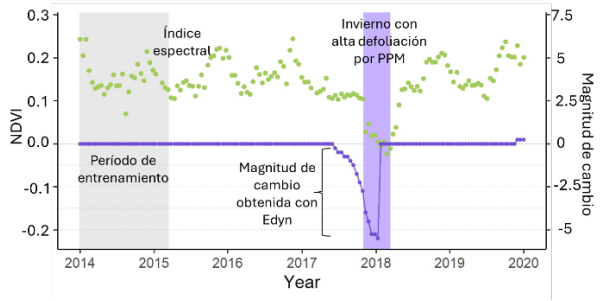


Figura 2. Serie temporal de NDVI y magnitud de cambio detectada por Edyn para un píxel afectado por defoliación por PPM.

Para las cortas el índice que destaca por su proporción es el NDVI, con un recall de 0.92 (Tabla 2); esto se debe a la fuerte respuesta ante la eliminación de la cobertura forestal. Por el contrario, para el caso de defoliación causada por PPM, el NBR presentó los mejores resultados con un recall de 0.52, seguido de SAVI y TCG; en este caso el NDVI refleja un bajo número de aciertos. El NBR presentó un mejor desempeño en la detección de cambios sutiles y progresivos, como la defoliación por PPM, ya que integra información del infrarrojo cercano y de onda corta, sensibles al contenido hídrico y a la estructura de la cubierta vegetal.

Tabla 2. Recall obtenidos al evaluar Edyn en la identificación de los tipos de perturbación utilizando los índices espectrales NDVI, NBR, SAVI y TCG.

	NDVI	NBR	SAVI	TCG
Cortas	0.92	0.60	0.63	0.70
PPM	0.34	0.52	0.42	0.42

En términos de sensibilidad, las magnitudes de cambio derivadas de NDVI y NBR muestran rangos de valores diferente entre cortas y PPM. Por el contrario, las magnitudes de cambio obtenidas con SAVI y TCG muestran un solapamiento entre las dos perturbaciones analizadas, lo que indica una capacidad limitada para discriminar distintos agentes de cambio (Figura 3).

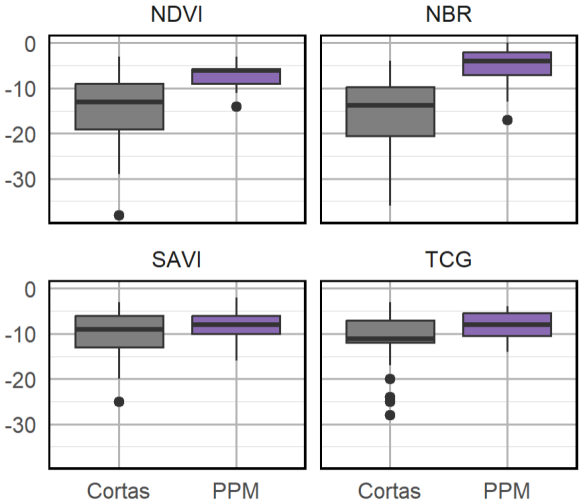


Figura 3. Boxplots que muestran la magnitud del cambio obtenida al aplicar Edyn en la identificación cortas y PPM, utilizando los índices espectrales NDVI, NBR, SAVI y TCG.

4. CONCLUSIÓN

En términos de rendimiento y sensibilidad, el NDVI se destaca para la detección de perturbaciones en las que la remoción de la cobertura forestal es fácilmente identificable, como las cortas, debido a su fuerte respuesta a cambios en la biomasa. En contraste, el NBR presenta una mayor sensibilidad para detectar cambios más sutiles en la condición del dosel, como la defoliación asociada a la procesionaria del pino, lo que lo convierte en un índice más adecuado para la identificación de perturbaciones de menor intensidad. En este sentido, la combinación de índices espectrales específicos con indicadores temporales asociados por ejemplo a ciclos biológicos del agente perturbador resulta clave para la detección e interpretación de eventos y del agente que

los provoca.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las administraciones de Castilla-La Mancha y Murcia que proporcionaron datos de sus programas de seguimiento de plagas. Además, agradecemos la ayuda financiera de CiE Caja Rural. Lorena Caiza-Morales recibió el apoyo de la Universidad de Valladolid mediante Beca Predoctoral Santander (E-42-2022-0025620).

6. REFERENCIAS

Brooks, E.B., Wynne, R.H., Thomas, V.A., Blinn, C.E., Coulston, J.W., 2014. On-the-Fly Massively Multitemporal Change Detection Using Statistical Quality Control Charts and Landsat Data. I*EEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 52*, 3316–3332. https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2272545

Brooks, E.B., Yang, Z., Thomas, V.A., Wynne, R.H., 2017. Edyn: Dynamic Signaling of Changes to Forests Using Exponentially Weighted Moving Average Charts. *Forests 8*, 304. https://doi.org/10.3390/f8090304

Giambelluca, A. L., Hermosilla, T., Álvarez-Mozos, González-Audícana. J. M., 2025. Identifying forest harvesting practices: clear-cutting and thinning in diverse tree species using dense Landsat time series. F*or. Ecol. Manag., 578* (2025), Article 122442, 10.1016/j.foreco.2024.122442

Hansen, M.C., Stehman, S.V., Potapov, P.V., 2010. Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences 107,* 8650–8655. https://doi.org/10.1073/pnas.0912668107

Hudak, A.T., Bright, B.C., Kennedy, R.E., 2013. Predicting live and dead basal area from LandTrendr variables in beetle-affected forests, in: MultiTemp 2013: 7th International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images. Presented at the MultiTemp 2013: *7th International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/Multi-Temp.2013.6866024

Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment 25*, 295–309. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X

Key, C.H., Benson, N.C., 2006. Landscape Assessment (LA).

Miguel S. Miguel, P. Ruiz-Benito, P. Rebollo, A. Viana-Soto, M.C. Mihai, A. García-Martín, M.2024 Tanase Forest disturbance regimes and trends in continental Spain (1985–2023) using dense landsat time series. *Environ. Res., 262*, Article 119802, 10.1016/j.envres.2024.119802

Montoya, R., Hernández, R., 1998. La procesionaria del pino. Madrid Plagas de Insectos en las Masas Forestales Españolas, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 67–84

Ramsfield, T.D., Bentz, B.J., Faccoli, M., Jactel, H., Brockerhoff, E.G., 2016. Forest health in a changing world: effects of globalization and climate change on forest insect and pathogen impacts. Forestry: An International *Journal of Forest Research 89,* 245–252. https://doi.org/10.1093/forestry/cpw018

Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment 8*, 127–150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

Zhao, K., Wulder, M.A., Hu, T., Bright, R., Wu, Q., Qin, H., Li, Y., Toman, E., Mallick, B., Zhang, X., Brown, M., 2019. Detecting change-point, trend, and seasonality in satellite time series data to track abrupt changes and nonlinear dynamics: A Bayesian ensemble algorithm. *Remote Sensing of Environment 232*, 111181. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.034

Zhu, Z., 2017. Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 130*, 370–384

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.172

Segmentación de estratos forestales en bosques mediterráneos mediante deep learning y nubes de puntos LiDAR terrestres y móviles

Crespo-Peremarch, Pablo [1] **Valencia Alzate, Juan Ramón** [1] **Carbonell-Rivera, Juan Pedro** [2] **Torralba, Jesús** [1] **Ruiz, Luis Ángel** [1]

[1] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, València, España

[2] Integrated Remote Sensing Studio (IRSS), Department of Forest Resources Management, Forest Science Centre, 2424 Main Mall, University of British Columbia, Vancouver, BC V6T 1Z4, Canadá

ORCID: Crespo-Peremarch 0000-0003-2241-4493 Carbonell-Rivera 0000-0002-6724-6780 Torralba 0000-0001-8644-8604 Ruiz 0000-0003-0073-7259

Correspondencia: pabcrepe@cgf.upv.es jvalencia658@gmail.com jp.carbonellrivera@ubc.ca jetorpe@upv.es laruiz@cgf.upv.es

RESUMEN

La caracterización de la estructura vertical de la vegetación es clave para la planificación y la prevención de incendios en bosques mediterráneos. En este estudio se evalúa un modelo de deep learning para segmentar estratos verticales (arbóreo, arbustivo-arbóreo y arbustivo) en nubes de puntos 3D adquiridas con un escáner láser terrestre (TLS) y un LiDAR móvil integrado en un iPad (MLS-iPad). En escenarios semirreales se obtuvieron valores de IoU (Intersection over Union) superiores al 97% en el estrato arbóreo y en torno al 90% en los estratos arbustivo-arbóreo y arbustivo; en parcelas reales, el IoU fue de 80–91% (arbóreo) y 35–65% (arbustivo-arbóreo y arbustivo). Estos resultados confirman la viabilidad del enfoque y el potencial del MLS-iPad para campañas operativas rápidas de diagnóstico y seguimiento estructural, si bien la caída de los valores en parcelas reales evidencia la necesidad de ampliar el entrenamiento con datos reales, pudiendo actuar el TLS como referencia cuando se requiera mayor robustez.

Palabras clave: *TLS, MLS, iPad, aprendizaje profundo, clasificación semántica*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Segmentación de estratos forestales en bosques mediterráneos mediante deep learning y nubes de puntos LiDAR terrestres y móviles

Crespo-Peremarch, Pablo [1], Valencia Alzate, Juan Ramón [1], Carbonell-Rivera, Juan Pedro [2], Torralba, Jesús [1], Ruiz, Luis Ángel [1]

[1] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, València, España.

0000-0003-2241-4493, pabcrepe@cgf.upv.es ; 0000-0000-0000-0001, jvalencia658@gmail.com

0000-0001-8644-8604, jetorpe@upv.es ; 0000-0003-0073-7259, laruiz@cgf.upv.es

[2] Integrated Remote Sensing Studio (IRSS), Department of Forest Resources Management, Forest Science Centre, University of British Columbia, Canadá.

0000-0002-6724-6780, jp.carbonellrivera@ubc.ca

Resumen: La caracterización de la estructura vertical de la vegetación es clave para la planificación y la prevención de incendios en bosques mediterráneos. En este estudio se evalúa un modelo de *deep learning* para segmentar estratos verticales (arbóreo, arbustivo-arbóreo y arbustivo) en nubes de puntos 3D adquiridas con un escáner láser terrestre (TLS) y un LiDAR móvil integrado en un iPad (MLS-iPad). En escenarios semirreales se obtuvieron valores de IoU (*Intersection over Union*) superiores al 97% en el estrato arbóreo y en torno al 90% en los estratos arbustivo-arbóreo y arbustivo; en parcelas reales, el IoU fue de 80–91% (arbóreo) y 35–65% (arbustivo-arbóreo y arbustivo). Estos resultados confirman la viabilidad del enfoque y el potencial del MLS-iPad para campañas operativas rápidas de diagnóstico y seguimiento estructural, si bien la caída de los valores en parcelas reales evidencia la necesidad de ampliar el entrenamiento con datos reales, pudiendo actuar el TLS como referencia cuando se requiera mayor robustez.

Palabras clave: TLS, MLS, iPad, aprendizaje profundo, clasificación semántica

Forest strata segmentation in Mediterranean forests using deep learning and terrestrial and mobile LiDAR point clouds

***Abstract**: Characterizing the vertical structure of vegetation is key to planning and preventing fires in Mediterranean forests. This study evaluates a deep learning model for segmenting vertical strata (tree, shrubby-tree, and shrub) in 3D point clouds acquired using a terrestrial laser scanner (TLS) and a mobile LiDAR integrated into an iPad (MLS-iPad). In semi-real scenarios, IoU (Intersection over Union) values greater than 97% were obtained in the tree layer and around 90% in the shrubby-tree and shrub layers; in real plots, the IoU was 80–91% (tree) and 35–65% (shrubby-tree and shrub). These results confirm the feasibility of the approach and the potential of MLS-iPad for rapid operational diagnostic and structural monitoring campaigns. However, the drop in real plots highlights the need to expand training with real data, with TLS acting as a reference when greater robustness is required.*

***Keywords**: TLS, MLS, iPad, deep learning, semantic classification*

1. INTRODUCCIÓN

En bosques mediterráneos, la planificación y la prevención de incendios requieren describir la estructura vertical y la continuidad del combustible, pero el coste de los inventarios de campo limita su aplicación a gran escala, por lo que las nubes de puntos 3D constituyen una alternativa eficiente para caracterizar la vegetación y apoyar análisis ligados al fuego (Carbonell-Rivera *et al*., 2022; Viedma & Moreno, 2025).

El LiDAR (*Light Detection and Ranging*) permite capturar la estructura forestal en 3D, pero su uso operativo se ve condicionado por el coste y por decisiones de adquisición en TLS (por ejemplo, número/distribución de escaneos y densidad de puntos), lo que hace especialmente relevante evaluar alternativas como el láser escáner móvil integrado en un dispositivo iPad (MLS-iPad) para levantamientos rápidos y repetibles, siempre que existan flujos automáticos de segmentación por estratos (Gollob *et al*., 2021; Torralba *et al*., 2022).

Pese al gran volumen y precisión de los datos LiDAR, la segmentación semántica de nubes de puntos forestales sigue siendo un reto en entornos de alta complejidad estructural. En este contexto, los métodos basados en *deep learning* permiten aprender características directamente de los datos y se han consolidado como

una vía prometedora para el análisis de nubes de puntos 3D (Thomas *et al*., 2019).

El objetivo principal de este estudio es la segmentación de estratos verticales forestales en nubes de puntos tridimensionales adquiridas en un entorno mediterráneo mediante técnicas basadas en *deep learning*. Esto conduce a los siguientes objetivos específicos: (*i*) análisis de la segmentación entre estrato arbóreo, arbustivo-arbóreo y arbustivo, y (*ii*) comparación de la segmentación entre un láser escáner terrestre (TLS) y un MLS-iPad.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio se ubica en el Parque Natural de La Serra d'Espadà, situado al sur de la provincia de Castellón (España). Dicho parque (≈31.180 ha y clima mediterráneo) presenta una estructura vertical compleja, con masas dominadas por *Pinus halepensis* Mill. y *P. pinaster* Aiton y la presencia puntual de *Quercus suber* L., junto con un sotobosque denso y diverso (*Cistus albidus* L., *Erica arborea* L., *Juniperus oxycedrus* L. y *Pistacia lentiscus* L.). Esta combinación de estratos bien desarrollados y la elevada densidad de sotobosque favorecen una marcada continuidad vertical y horizontal de la vegetación, incrementando la carga y conectividad del combustible forestal y, por tanto, el riesgo de propagación de incendios.

2.2. Datos

Para la realización del estudio se emplearon datos recopilados en 17 parcelas circulares de 5 m de radio. Para cada una de estas parcelas se tomaron datos de campo, TLS y MLS-iPad.

2.2.1. Datos de campo

Los datos de campo se adquirieron durante los meses de mayo y junio de 2022, combinando técnicas de topografía clásica y observaciones GNSS (Leica RTK 1200+). En cada parcela forestal se registró la posición de los árboles y arbustos de interés, junto con la identificación de la especie correspondiente y sus dimensiones, lo que sirvió como referencia para la correcta interpretación de las nubes de puntos LiDAR. Estos datos se utilizaron como referencia estructural para segmentar las nubes de puntos, incluidas las campañas LiDAR realizadas en 2025, asumiendo que no se produjeron cambios en la posición de los individuos durante ese periodo.

2.2.2. Datos láser escáner terrestre

Las nubes de puntos TLS se adquirieron durante la misma campaña de 2022 con un dispositivo Faro Focus3D 120 (Tabla 1), cubriendo en cada parcela un área circular de 15 m de radio. Para reducir las oclusiones y capturar de forma más completa la estructura de la vegetación, se realizaron cinco estaciones de escaneo por parcela: una central y cuatro adicionales, distribuidas en las direcciones de los puntos cardinales a 7,5 m del centro (Torralba *et al*., 2022). Durante el escaneo se ubicaron dianas esféricas repartidas por la parcela a diferentes alturas, siendo al menos cuatro visibles entre diferentes escaneos. La posición de estas dianas se registró con un GNSS Leica System 1200, conectado a la red geodésica de estaciones de referencia Valenciana (ERVA).

2.2.3. Datos láser escáner móvil - iPad

Las nubes de puntos adquiridas con el dispositivo iPad se obtuvieron utilizando el sensor LiDAR integrado en un iPad Pro 11" modelo 2024 (Tabla 1) durante los meses de febrero (12 parcelas) y julio (5 parcelas) de 2025, siguiendo una metodología de escaneado móvil. Cada parcela se dividió en cuatro cuadrantes, que fueron escaneados de forma independiente para mejorar la cobertura y reducir oclusiones, incorporando además dianas esféricas para facilitar el posterior corregistro de los datos. Los escaneos se realizaron mediante la aplicación Scaniverse, lo que generó nubes de puntos tridimensionales enriquecidas con información de color RGB. En cuanto a la posición de las dianas, estas se registraron mediante mediciones GNSS utilizando la técnica PPK (*Post Processed* Kinematic) con receptores de la marca Emlid: un Reach RS2+ como base y un Reach RS3 como rover.

Tabla 1. Características de escaneos TLS y MLS-iPad.

Dispositivo	TLS	MLS-iPad
Radio parcela (m)	15	5
Superficie	~707 m^2	~78,5 m^2
Metodología	5 escaneos	4 cuadrantes
Información puntos	x, y, z, intensidad	x, y, z, rojo, verde, azul
Densidad media	10.024 puntos·m^{-2}	9.529 puntos·m^{-2}
Georreferenciación	GNSS + topografía clásica	PPK

2.3. Metodología

El flujo de trabajo se estructura en cinco etapas principales (Fig. 1): corregistro y georreferenciación de los datos LiDAR, selección de muestras, generación de escenarios forestales semirreales, entrenamiento del modelo de *deep learning* y evaluación de los resultados.

En una primera fase, se realizó el preprocesamiento de las nubes de puntos adquiridas con ambos sistemas LiDAR. En el caso de los datos de iPad, los cuadrantes de cada parcela fueron corregistrados mediante las dianas esféricas para obtener una nube unificada por parcela. El mismo proceso se siguió para los datos TLS, pero corregistrando los cinco escaneos. El error promedio en el corregistro fue de 4,4 cm para el MLS-iPad y de 1 cm para el TLS. Posteriormente, ambas nubes fueron georreferenciadas a partir de las coordenadas de sus respectivas dianas esféricas. El error promedio en la georreferenciación fue de 14,4 cm para el MLS-iPad y de 2 cm para el TLS. Los datos TLS se preprocesaron con el programa Trimble RealWorks v10.4 de Trimble y los datos MLS-iPad con CloudCompare v2.13.1.

A continuación, se definió un esquema de segmentación basado exclusivamente en estratos de vegetación, agrupando las especies según su papel estructural en el bosque (estrato arbóreo, arbustivo-arbóreo y arbustivo).

Para generar los datos de entrenamiento, se llevó a cabo la segmentación individual de árboles y arbustos por especie sobre las nubes de puntos MLS-iPad y TLS, mediciones obtenidas en campo en 2022 y correspondientes a las mismas parcelas, posteriormente escaneadas en febrero de 2025 con MLS-iPad. Este proceso consistió en una segmentación automática inicial mediante recortes espaciales aproximados alrededor de cada individuo, seguida de una depuración manual para mejorar la calidad geométrica de los segmentos. De forma paralela, se segmentó el suelo, obteniendo así un catálogo de individuos y superficies de referencia que sirvió de base para las siguientes etapas.

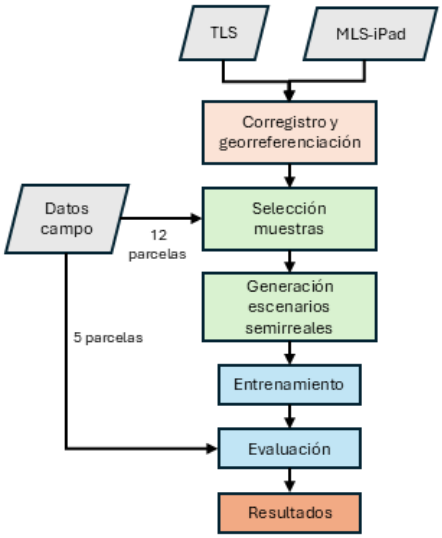


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología.

Dado que los modelos de *deep learning* requieren grandes volúmenes de datos para un entrenamiento robusto, se generaron escenarios forestales semirreales a partir de los individuos segmentados y del suelo (Fig. 2). Estos escenarios se construyeron combinando árboles, arbustos y superficies de terreno en distintas configuraciones espaciales, variando su posición, orientación, densidad y pendiente, con el fin de reproducir de forma realista la variabilidad estructural del bosque mediterráneo. Esta estrategia permitió aumentar significativamente el número de muestras disponibles y mejorar la capacidad de generalización del modelo, generando un total de 2.969 y 2.966 escenarios para el MLS-iPad y el TLS, respectivamente.

El entrenamiento de segmentación semántica se llevó a cabo utilizando la arquitectura KPConv (*Kernel Point Convolution*), un modelo de *deep learning* diseñado específicamente para el procesamiento directo de nubes de puntos tridimensionales (Thomas *et al*., 2019). El modelo fue entrenado para asignar a cada punto una etiqueta correspondiente a uno de los estratos de vegetación definidos o al suelo, empleando los escenarios semirreales como conjunto de entrenamiento.

Finalmente, la evaluación del modelo se realizó sobre dos conjuntos de datos independientes: (*i*) 990 y 989 nuevos escenarios forestales semirreales para el MLS-iPad y el TLS, respectivamente, y distintos de los utilizados durante el entrenamiento; y (*ii*) las cinco parcelas forestales reales adquiridas con MLS-iPad en julio de 2025. El rendimiento de la segmentación se analizó mediante métricas estándar de segmentación semántica, incluyendo *precision*, *recall*, *f1-score*, e *Intersection over Union* (IoU), lo que permitió evaluar de forma objetiva la capacidad del modelo para discriminar los distintos estratos de vegetación en escenarios tanto sintéticos como reales.

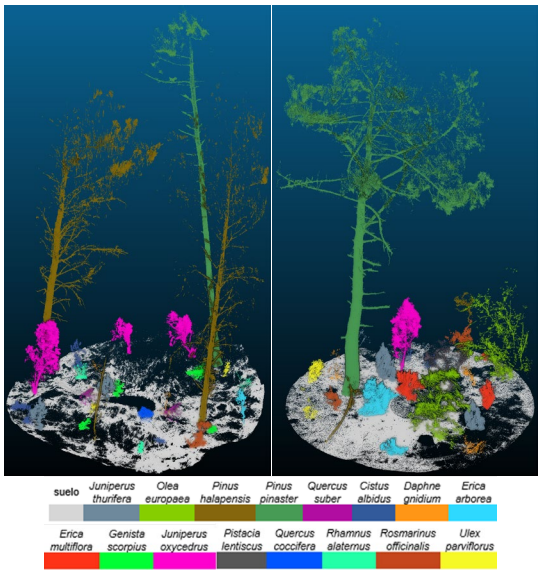


Figura 2. Ejemplo de escenarios semirreales creados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan las métricas de segmentación por estratos forestales (arbóreo, arbustivo-arbóreo y arbustivo) para nubes de puntos adquiridas con TLS y MLS-iPad, evaluadas tanto en escenarios semirreales como en escenarios reales. En conjuntos semirreales, el modelo basado en KPConv alcanzó rendimientos elevados en todos los estratos, con *f1-score* e IoU superiores al 94% y al 89%, respectivamente, para ambos sensores. El estrato arbóreo obtuvo las métricas más altas, con IoU cercanos al 99% (TLS) y superiores al 97% (MLS-iPad), destacando la robustez del enfoque para caracterizar la parte dominante de la estructura vertical. Los estratos arbustivo y arbustivo-arbóreo mostraron valores ligeramente menores, posiblemente debido al solapamiento geométrico y a la mayor variabilidad morfológica de estos componentes en el bosque.

Al evaluar los escenarios reales, se observó una reducción general de las métricas, más marcada en el estrato arbustivo, especialmente en los datos de MLS-iPad. Esta caída sugiere que la variabilidad estructural presente en bosques reales no está plenamente representada en los escenarios generados para entrenamiento, lo que puede conducir a un cierto sobreajuste del modelo. En la comparación entre sensores, el TLS mostró resultados más consistentes en condiciones reales, aunque los valores de las métricas en MLS-iPad no fueron críticamente distintos para los

estratos arbóreo y arbustivo-arbóreo. Estos resultados indican que, si bien el TLS puede proporcionar un leve

Tabla 2. Resultados de la segmentación de nubes de puntos por estratos verticales para los datos TLS y MLS-iPad, evaluados en escenarios semirreales y reales.

		precisión		*recall*		*f1-score*		IoU (%)	
Escenarios	Estrato	TLS	MLS-iPad	TLS	MLS-iPad	TLS	MLS-iPad	TLS	MLS-iPad
Semirreales	Arbustivo	0,906	0,936	0,986	0,991	0,944	0,963	89,46	92,79
	Arbustivo-arbóreo	0,988	0,997	0,954	0,976	0,971	0,986	94,30	97,31
	Arbóreo	0,999	0,980	0,996	0,997	0,998	0,989	99,57	97,75
Reales	Arbustivo	0,675	0,492	0,956	0,548	0,791	0,518	65,46	34,99
	Arbustivo-arbóreo	0,878	0,794	0,546	0,763	0,673	0,778	50,77	63,70
	Arbóreo	0,927	0,890	0,984	0,891	0,954	0,891	91,26	80,28

beneficio en la precisión, los sensores MLS de bajo coste constituyen una alternativa viable para la segmentación de estratos verticales cuando el objetivo es la caracterización estructural del bosque.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran la viabilidad de segmentar estratos verticales forestales en nubes de puntos tridimensionales de bosques mediterráneos mediante técnicas de *deep learning*. La metodología propuesta mostró altos niveles de precisión en escenarios semirreales, confirmando su capacidad para discriminar robustamente entre los estratos considerados. La disminución de las métricas en escenarios reales sugiere que las configuraciones semirreales no capturan completamente la variabilidad estructural del sotobosque; por ello, además de ampliar la diversidad de los escenarios generados, es necesario incorporar más datos reales en el entrenamiento para mejorar la generalización del modelo. Aunque el uso de TLS ofreció resultados algo más estables en datos reales, el MLS-iPad presentó un rendimiento competitivo, lo que indica que los dispositivos de bajo coste pueden ser adecuados para aplicaciones operativas de segmentación por estratos. En trabajos futuros se explorarán estrategias de aumento de datos y se evaluará la metodología en condiciones estructurales más diversas para reforzar su aplicabilidad.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada con Ayuda a Primeros Proyectos de Investigación (PAID-06-23), Vicerrectorado de Investigación de la Universitat Politècnica de València (UPV) y por el proyecto PID2024-158591OB-100, financiado por el MICUI/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

6. REFERENCIAS

Carbonell-Rivera, J. P., Torralba, J., Estornell, J., Ruiz, L. Á., & Crespo-Peremarch, P. (2022). Classification of Mediterranean Shrub Species from UAV Point Clouds. *Remote Sensing*, *14*(1), 199. https://doi.org/10.3390/rs14010199

Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A., & Nothdurft, A. (2021). Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology. *Remote Sensing*, *13*(16), 3129. https://doi.org/10.3390/rs13163129

Thomas, H., Qi, C. R., Deschaud, J.-E., Marcotegui, B., Goulette, F., & Guibas, L. J. (2019). Kpconv: Flexible and deformable convolution for point clouds. *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, 6411-6420.

Torralba, J., Carbonell-Rivera, J. P., Ruiz, L. Á., & Crespo-Peremarch, P. (2022). Analyzing TLS Scan Distribution and Point Density for the Estimation of Forest Stand Structural Parameters. Forests, 13(12), 2115. https://doi.org/10.3390/f13122115

Viedma, O., & Moreno, J. M. (2025). Impact of LiDAR pulse density on forest fuels metrics derived using LadderFuelsR. Ecological Informatics, 88, 103135. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103135

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.176

Evaluation of keyline design using the simplified triangle method in Mediterranean agroecosystems

Rolo Romero, Víctor [1] **Fragoso Campón, Laura** [2] **Quirós Rosado, Elia** [2] **Moreno Marcos, Gerardo** [1]

[1] Forest Research Group, INDEHESA, Universidad de Extremadura, España

[2] Kraken Research Group, INDEHESA, Universidad de Extremadura, España

ORCID: Rolo Romero 0000-0001-5854-9512 Fragoso Campón 0000-0003-0397-6247
Quirós Rosado 0000-0002-8429-045X Moreno Marcos 0000-0001-8053-2696

Correspondencia: rolo@unex.es laurafragoso@unex.es equiros@unex.es gmoreno@unex.es

ABSTRACT

Extreme weather events and increased aridity pose a serious risk to agricultural production. Keyline design has been proposed as a water harvesting technique to promote plant production and overall ecosystem functioning, yet there is a lack of evidence about its effectiveness. The aim of this study was to evaluate the effect of keyline design on surface wetness properties in Mediterranean agroecosystems. The simplified triangle methodology was used to estimate moisture availability (Mo) and evapotranspiration fraction (EF) using Landsat 8 images. We compared tree-grass and grasslands where keyline have been implemented, with over 1,000 control plots across the 2018–2025 period. Keyline plots showed higher surface moisture (Mo), especially during winter and spring in tree-grass, but not in grasslands. EF values were significantly lower in keyline areas across all seasons compared to control areas for all systems. These results suggest a limited effect of the key line restricted to certain periods of the year and types of land use.

Keywords: *Nature-based solution, rainwater harvesting, simplified triangle, soil moisture availability, dehesa.*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 26 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluation of keyline design using the simplified triangle method in Mediterranean agroecosystems

Rolo Romero, Víctor [(1)], Fragoso Campón, Laura [(2)], Quirós Rosado, Elia [(2)], Moreno Marcos, Gerardo [(1)]

[(1)] Forest Research Group, INDEHESA, Universidad de Extremadura, España.
0000-0001-5854-9512, rolo@unex.es ; 0000-0001-8053-2696, gmoreno@unex.es.

[(2)] Kraken Research Group, INDEHESA, Universidad de Extremadura, España.
0000-0003-0397-6247, laurafragoso@unex.es ; 0000-0002-8429-045X, equiros@unex.es.

***Abstract**: Extreme weather events and increased aridity pose a serious risk to agricultural production. Keyline design has been proposed as a water harvesting technique to promote plant production and overall ecosystem functioning, yet there is a lack of evidence about its effectiveness. The aim of this study was to evaluate the effect of keyline design on surface wetness properties in Mediterranean agroecosystems. The simplified triangle methodology was used to estimate moisture availability (Mo) and evapotranspiration fraction (EF) using Landsat 8 images. We compared tree-grass and grasslands where keyline have been implemented, with over 1,000 control plots across the 2018–2025 period. Keyline plots showed higher surface moisture (Mo), especially during winter and spring in tree-grass, but not in grasslands. EF values were significantly lower in keyline areas across all seasons compared to control areas for all systems. These results suggest a limited effect of the key line restricted to certain periods of the year and types of land use.*

***Keywords**: Nature-based solution, rainwater harvesting, simplified triangle, soil moisture availability, dehesa.*

Resumen: Los eventos climáticos extremos y el aumento de la aridez constituyen un grave riesgo para la producción agronómica. El diseño de línea clave se ha propuesto como una técnica de captación de agua que mejora la producción vegetal y el funcionamiento general del ecosistema, aunque la evidencia sobre su eficacia es limitada. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del diseño de línea clave en las propiedades de humedad superficial en agroecosistemas Mediterráneos. Se utilizó la metodología del triángulo simplificado para estimar la disponibilidad de humedad (Mo) y la fracción de evapotranspiración (EF) utilizando imágenes de Landsat 8. Se compararon parcelas con línea clave frente a más de 1.000 parcelas de control para dos coberturas vegetales (pastos y dehesa) durante el periodo 2018–2025. Las parcelas con línea clave mostraron mayor humedad del suelo (Mo), especialmente durante el invierno y la primavera en la dehesa, pero no en las zonas de pastos. Los valores de EF fueron significativamente más bajos en zonas de línea clave a lo largo de todas las estaciones en comparación con las áreas de control para todos los sistemas. Estos resultados sugieren un efecto limitado de la línea clave restringido a ciertos periodos del año y tipos de uso del suelo.

Palabras clave: Soluciones basadas en la naturaleza, línea clave, método triángulo simplificado, humedad edáfica dehesa.

1. INTRODUCTION

Future climate projection predicts an increase in the frequency and severity of extreme weather events (Calvin *et al*., 2023), posing further challenges to agricultural systems in the coming decades (Vermeulen *et al*., 2012). This situation is particularly evident in the southwestern part of the Iberian Peninsula, where a reduction in soil moisture is foreseen (Calvin *et al*., 2023), with acute consequences for plant production, that rely in a great extent on soil moisture, a main limiting factor in these ecosystems (Joffre *et al*., 1999). Several nature-based solutions have been proposed to address these challenges (Griscom *et al*., 2017). Among them, the keyline design is advocated as a water harvesting technique that can promote plant production and overall ecosystem functioning. The keyline design was introduced in the mid-twentieth century in Australia to build effective water catchment areas. The main principle is to reduce surface water flow and distribute water from the valleys towards the ridges. Despite increasing practitioner interest in implementing this design, there is still a lack of scientific support (Giambastiani *et al*., 2023). Confounding factors, such as other regenerative practices implemented at the same time, lack of rigorous control areas, or high spatial and temporal variability in

its implementation can hamper the evaluation of its effectiveness.

Remote sensing can alleviate some of the limitations in the evaluation of the keyline design by, for instance, providing information on changes in vegetation properties or soil moisture in space and time, across different spatial scales. Among the various approaches provided by Earth Observation products, the simplified triangle technique has been proposed as an effective methodology to assess surface wetness properties. This technique only requires information on surface temperature and vegetation indices, allowing its application almost anywhere (Carlson & Petropoulos, 2019).

The aim of this work was to evaluate the effectiveness of a keyline design in Mediterranean tree-grass agroecosystems. The simplified triangle technique was used to assess the effect of the keyline on surface wetness properties.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Study area

The study took place on the Mundos Nuevos farm, located in the town of Retamal de Llerena (38°34′43" N, 5°50′18" W, Badajoz), and the surroundings. The climate of the area is Mediterranean with an average annual temperature of 14.2 ºC and a rainfall of 390 mm. The vegetation of the Mundos Nuevos estate is a typical Mediterranean tree-grass ecosystem, locally called *Dehesa*, composed of a grassland layer scattered with trees. Tree species are dominated by holm oaks (*Quercus ilex*) and annual herbaceous pastures. The implementation of the keyline system took placed progressively between 2021-23. First, the entire farm was tilled following the keyline model (Fig. 1). This pattern reduces the flow of surface runoff parallel to the slope. After the tillage, in subsequent years, a network of water collection channels and connected ponds was built to maximize surface water catchment.



Figure 1. Detail of the keyline design in Mundos Nuevos farm.

2.2. Image acquisition and the simplified triangle methodology

To evaluate the effect of the interventions, the simplified triangle methodology was followed (Carlson & Petropoulos, 2019). This method allows estimating evapotranspiration fraction (EF) and moisture availability (Mo) of the soil surface. To implement it, it is necessary to know the radiometric surface temperature (T_{ir}) and the normalized vegetation index (NDVI). Both measurements were obtained from Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2 after applying a bitmask for cloud and shadow removal. For the calculation of NDVI, bands 5 and 4 were used and band 10 for temperature. Images were obtained from 2018 till 2025, including the year prior to the intervention and after it. For each acquisition date, the following parameters were calculated: Fractional vegetation cover:

$$Fr = \left(\frac{NDVI - NDVI_o}{NDVI_s - NDVI_o}\right)^2 \quad (1)$$

Where $NDVI_s$ and $NDVI_o$ represents full cover and bare soil, respectively. And scaled infrared temperature:

$$T^* = \frac{T_{ir} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (2)$$

Both indices were obtained for 19 paddocks in the farm, where the keyline method has been implemented. Two types of paddocks were distinguished: with (TG-KL, n=19) and without trees (GS-KL, n=4). As control areas, plots classified as wooded pasture (TG-CT) or pastures (GS-CT) in the SIGPAC catalogue (SIGPAC, 2025) within a 10 km radius of the farm were used. Only parcels that were at least one ha in size and as similar as possible than keylined paddocks were selected from the SIGPAC system (n = 1118). Maximum and minimum values of each index were selected from the full scene before subsequent processing. Images were processed in Google Earth Engine (Gorelick *et al*., 2017).

To build the triangle, values of T^* and F_r were plotted and the *warm edge* was calculated as the linear regression between T^* and F_r for the pixels located in the vertex and at the bottom right of the triangle for each date. Values of surface moisture availability (Mo) and evapotranspiration fraction (EF), varying between 0 and 1, were computed as follows:

$$M_o = 1 - T^*/T_{warm\ edge} \quad (3)$$

And

$$EF = M_o\,(1 - Fr) + Fr \quad (4)$$

2.3. Data analysis

To assess the effect of the keyline methodology on surface moisture availability (Mo) and evapotranspiration fraction (EF), linear mixed models were used. Models included Mo or EF as response variables land cover (tree-grass and grassland with and without keyline), season and their interaction as predictors and year as a random factor. All analyses were conducted in R v4.4.2 (R Core Team, 2024).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Surface moisture (Mo) and evaporative fraction (EF) were, on average, significantly different among land covers types over the studied period (Table 1). Tree-grass land cover showed higher Mo than grasslands. The keyline increased Mo in tree-grass but not in grasslands. A similar pattern was found for EF, except for the lower EF values in the keyline for both land cover types.

Higher moisture and evaporative fraction in tree-grass could be driven by the higher coverage of woody vegetation that would be active during longer periods, where annual herbaceous species dry-off, and therefore show lower infrared temperatures. This situation is particularly evident when plotting both Fr and T* to build the simplified triangle (Fig. 2). Points located in the upper part indicate continuous vegetation, whereas at the bottom, in the base of the triangle, depict bare soil. Moreover, those points close to the right border (the warm edge) indicate minimum transpiration. Tree-grass systems tend to lay at the top of the space, particularly during dry-down, pointing to areas with green vegetation cover. On the other hand, areas covered with herbaceous vegetation (GS) showed the greatest spread in this space, laying at the top during the green-up phase (i.e., autumn-winter) and taking the lowest position during the summer. Plots of the keyline farm, were in between and showed the lowest variability, indicating moderate cover of tree vegetation.

Table 1. Average values (% ±S.E.) of evapotranspiration fraction (EF) and moisture availability (Mo) in the keyline farm and the surroundings for tree-grass systems (TG-KL and TG-CT) and grasslands (GS-KL and GS-CT, respectively) for the whole study period (2018-2025).

Land Cover	EF	Mo
TG-KL (n=15)	13.5 ± 0.3 b	12.7 ± 0.3 d
TG-CT (n=635)	14.7 ± 0.1 d	11.3 ± 0.1 c
GS-KL (n=4)	10.4 ± 0.7 a	8.2 ± 0.6 a
GS-CT (353)	13.9 ± 0.1 c	9.4 ± 0.1 b

Evapotranspiration fraction (EF) and moisture availability (Mo) of the soil surface showed similar temporal dynamics during the studied period (Fig. 3). Both peaked during winter, and the lowest values were found in mid-summer, showing a declining trend during the dry down period. This pattern agrees with those reported by Petropoulos *et al*. (2020) who validated the simplified triangle technique in the same region as our study area using data from an Eddy-covariance tower. The authors showed an adequate agreement between measured and predicted EF.



Figure 2. Simplified triangle for the hydrological year 2023-24. Note that the complete triangle was constructed based on the whole Landsat scene, but only tree-grass (TG), grasslands (GS) and with keylines (KL) and without (CT) are depicted for clarity.

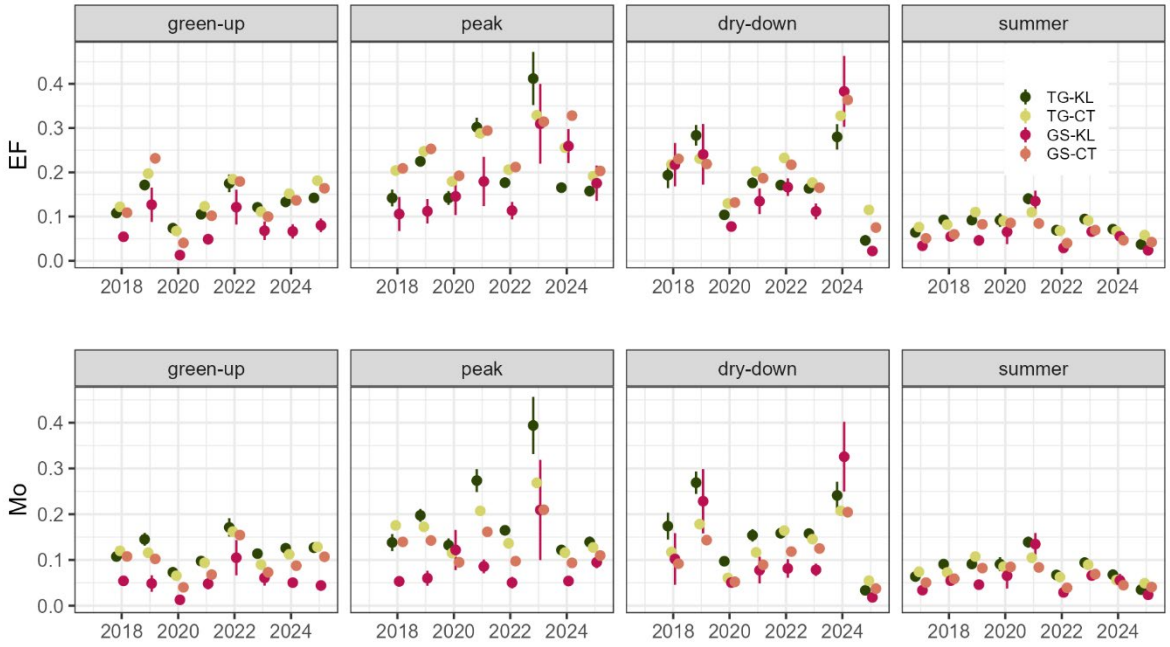


Figure 3. Seasonal dynamic of evapotranspiration fraction (EF) and moisture availability (Mo) in the keyline farm and the surroundings for tree-grass systems (TG-KL and TG-CT) and grasslands (GS-KL and GS-CT, respectively) for the whole study period (2018-2025)

Overall, EF values were significantly lower in the keyline than in the control for both land covers and all seasons, with the GS-KL showing the lowest values. By contrast, TG-KL increased Mo values, particularly during the peak and dry-down seasons when they were significantly different from TG-CT. Interestingly, this increase in Mo in the TG-KL was not accompanied by an increase in Fr, which together with the lowest values of GS-KL, suggests a limited effect of the keyline system for plant production. Further studies should be conducted to disentangle the net contribution of this nature-based solution as a climate-smart adaptation in Mediterranean tree-grass agroecosystems.

4. ACKNOLEDGEMENTS

This project has received funding from the European Union's Horizon Europe research and innovation programme, DRYAD project, under grant agreement No GA 101156076

5. REFERENCES

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., … Ha, M. (with Lee, H.). (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Carlson, T. N., & Petropoulos, G. P. (2019). A new method for estimating of evapotranspiration and surface soil moisture from optical and thermal infrared measurements: The simplified triangle. *International Journal of Remote Sensing*, *40*(20), 7716–7729.

Giambastiani, Y., Biancofiore, G., Mancini, M., Di Giorgio, A., Giusti, R., Cecchi, S., Gardin, L., & Errico, A. (2023). Modelling the Effect of Keyline Practice on Soil Erosion Control. *Land*, *12*(1), 100. https://doi.org/10.3390/land12010100

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, *202*, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, … Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(44), 11645–11650. https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114

Joffre, R., Rambal, S., & Ratte, JP. (1999). The dehesa system of southern Spain and Portugal as a natural ecosystem mimic. *Agroforestry Systems*, *45*, 57–79.

Petropoulos, G. P., Sandric, I., Hristopulos, D., & Nahum Carlson, T. (2020). Evaporative Fluxes and Surface Soil Moisture Retrievals in a Mediterranean Setting from Sentinel-3 and the "Simplified Triangle". *Remote Sensing*, *12*(19), Article 19.

R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing* R Foundation for Statistical Computing. http://www.R-project.org/

SIGPAC. (2025). *Visor del SIGPAC Nacional*. https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-parcelas-agricolas-sigpac-/visor-sigpac

Vermeulen, S. J., Campbell, B. M., & Ingram, J. S. I. (2012). Climate Change and Food Systems. *Annual Review of Environment and Resources*, *37*(1), 195–222.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.183

Ensamblaje de modelos para el seguimiento de las necesidades hídricas de los cultivos leñosos mediante Teledetección

Sánchez, Juan Manuel [1] **Moya, Alejandro** [2] **Nieto, Héctor** [3] **Sánchez-Virosta, Alvaro** [1] **Galve, Joan Miquel** [1] **González-Piqueras, José** [1]

[1] Grupo de Teledetección y SIG, Departamento de Física, Universidad de Castilla-La Mancha, y "Teledetección, Agronomía y Riego" Unidad Asociada al CSIC a través del CIDE, IDR, Campus Universitario s/n, 02071 Albacete

[2] Departamento de Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid, Campus Cantoblanco, 28049, Madrid

[3] Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC), C/Serrano 115b, 28006, Madrid

ORCID: Sánchez 0000-0003-1027-9351 Moya 0000-0002-8071-9845 Nieto 0000-0003-4250-6424 Sánchez-Virosta 0000-0002-3842-3792 Galve 0000-0003-1066-7717 González-Piqueras 0000-0003-2226-5731

Correspondencia: juanmanuel.sanchez@uclm.es alejandro.moya@uam.es hector.nieto@ica.csic.es alvaro.sanchez@uclm.es joanmiquel.galve@uclm.es jose.gonzalez@uclm.es

RESUMEN

La expansión de cultivos en regadío como el almendro y el pistacho en zonas áridas y semiáridas supone un desafío en un contexto de escasez de recursos hídricos. La Teledetección va ganando relevancia en el seguimiento de las necesidades hídricas de estos cultivos, gracias a la disponibilidad de imágenes de satélite cada vez con mayor resolución espacial y temporal. Sin embargo, los modelos presentan ciertas limitaciones que trasladan incertidumbre a las estimaciones. En este trabajo presentamos el ensamblaje de modelos como técnica para acotar la incertidumbre en las necesidades hídricas, con especial interés en los leñosos. El estudio se centra en la provincia de Albacete, durante los años 2022-2024, y se combinan dos modelos de balance de energía, como son METRIC y SenET_TSEB, con un modelo de balance de agua asistido por imágenes NDVI, para obtener series temporales de evapotranspiración real diaria (ETa), con resolución espacial de 20-30 m. La comparación con las medidas in situ registradas en dos torres eddy-covariance disponibles en una parcela de almendro y otra de pistacho en la zona, muestra cómo el ensamblado de modelos consigue una mejor correlación de los resultados. A escala semanal, se obtienen valores promedio de RMSE de ±4,9 mm d-1 y ±2,8 mm d-1 en estimación de ETa para el almendro y el pistacho, respectivamente. Los valores acumulados a lo largo de la campaña con esta metodología son consistentes y permiten ajustar la planificación del riego, detectar condiciones de estrés, y/o cuantificar necesidades hídricas a escala de parcela. Los resultados obtenidos refuerzan el papel de la Teledetección satelital en la gestión de los recursos hídricos, en cultivos en expansión como son el almendro o el pistacho.

Palabras clave: *Evapotranspiración, Landsat, Sentinel, METRIC, SenET_TSEB*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Ensamblaje de modelos para el seguimiento de las necesidades hídricas de los cultivos leñosos mediante Teledetección

Sánchez, Juan Manuel [(1)], Moya, Alejandro [(2)], Nieto, Héctor [(3)], Sánchez-Virosta, Alvaro [(1)], Galve, Joan Miquel [(1)], González-Piqueras, José [(1)]

[(1)] Grupo de Teledetección y SIG, Departamento de Física, Universidad de Castilla-La Mancha, y "Teledetección, Agronomía y Riego" Unidad Asociada al CSIC a través del CIDE, IDRs/n Albacete.
0000-0003-1027-9351, juanmanuel.sanchez@uclm.es ; 0000-0002-3842-3792, alvaro.sanchez@uclm.es.
0000-0003-1066-7717, joanmiquel.galve@uclm.es; 0000-0003-2226-5731, jose.gonzalez@uclm.es.

[(2)] Departamento de Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid
0000-0002-8071-9845, alejandro.moya@uam.es.

[(3)] Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC).
0000-0003-4250-6424, hector.nieto@ica.csic.es.

Resumen: La expansión de cultivos en regadío como el almendro y el pistacho en zonas áridas y semiáridas supone un desafío en un contexto de escasez de recursos hídricos. La Teledetección va ganando relevancia en el seguimiento de las necesidades hídricas de estos cultivos, gracias a la disponibilidad de imágenes de satélite cada vez con mayor resolución espacial y temporal. Sin embargo, los modelos presentan ciertas limitaciones que trasladan incertidumbre a las estimaciones. En este trabajo presentamos el ensamblaje de modelos como técnica para acotar la incertidumbre en las necesidades hídricas, con especial interés en los leñosos. El estudio se centra en la provincia de Albacete, durante los años 2022-2024, y se combinan dos modelos de balance de energía, como son METRIC y SenET_TSEB, con un modelo de balance de agua asistido por imágenes NDVI, para obtener series temporales de evapotranspiración real diaria (ETa), con resolución espacial de 20-30 m. La comparación con las medidas in situ registradas en dos torres eddy-covariance disponibles en una parcela de almendro y otra de pistacho en la zona, muestra cómo el ensamblado de modelos consigue una mejor correlación de los resultados. A escala semanal, se obtienen valores promedio de RMSE de ±4,9 mm d^{-1} y ±2,8 mm d^{-1} en estimación de ETa para el almendro y el pistacho, respectivamente. Los valores acumulados a lo largo de la campaña con esta metodología son consistentes y permiten ajustar la planificación del riego, detectar condiciones de estrés, y/o cuantificar necesidades hídricas a escala de parcela. Los resultados obtenidos refuerzan el papel de la Teledetección satelital en la gestión de los recursos hídricos, en cultivos en expansión como son el almendro o el pistacho.

Palabras clave: Evapotranspiración, Landsat, Sentinel, METRIC, SenET_TSEB

Model ensemble to monitor water needs in woody crops by Remote Sensing

***Abstract**: The expansion of irrigated crops such as almond and pistachio in arid and semi-arid regions poses a challenge in a context of water resource scarcity. Remote sensing plays a key role in monitoring crop water needs, thanks to the availability of satellite imagery with increasingly higher spatial and temporal resolution. However, models have shortcomings that lead to uncertainties in their estimates. In this study, we introduce the model ensemble technique as a method to constrain uncertainty in crop water requirements, with a particular focus on woody crops. This study is centered in the province of Albacete, for the period 2022–2024, and combines two surface energy balance models, METRIC and SenET_TSEB, with a water balance model asssited by NDVI imagery to obtain time series of daily actual evapotranspiration (ETa), with a spatial resolution of 20–30 meters. Comparison with in situ measurements recorded at two eddy-covariance towers located in almond and pistachio orchards shows better correlation of the results using the ensemble. At a weekly scale, an average RMSE of ±4.9 mm d^{-1} and ±2.8 mm d^{-1} are obtained for the almond and pistachio crops. Accumulated ETa values over the growing season are consistent and provide confidence to assist in irrigation scheduling, detect stress conditions, and/or quantify water needs at a plot scale. These results reinforce the role of satellite remote sensing in water resources management, in expanding crops such as almond and*

pistachio orchards.

***Keywords**: Evapotranspiration, Landsat, Sentinel, METRIC, SenET_TSEB*

1. INTRODUCCIÓN

Los cultivos leñosos como el almendro y el pistachero están proliferando rápidamente en regiones agrícolas áridas y semiáridas. España ocupa el primer lugar en extensión plantada de almendro a nivel mundial, con más de 650.000 ha, y cuenta ya con más de 70.000 ha de cultivo de pistacho. Por otro lado, los recursos hídricos en estas zonas se ven sometidos a un alto riesgo de sobreexplotación. Resulta pues evidente la necesidad de mejorar nuestra comprensión del uso del agua en estos cultivos, lo que pasa por un seguimiento preciso de la evapotranspiración real del cultivo (ETa), pero también es crucial el poder cuantificar la incertidumbre en dicha estimación.

Durante años, se han propuesto variedad de modelos de balance de energía en superficie (SEB, por sus siglas en inglés) basados en Teledetección que han mostrado ser efectivos para estimar ETa y detectar condiciones de estrés hídrico, empleando imágenes de satélite (García-Santos et al., 2022; Guzinski et al., 2023). Sin embargo, todavía existen limitaciones para una monitorización operativa y continua de la ETa diaria con una alta resolución espacial y temporal, que permita ser utilizada para fines de gestión del agua o programación de riego, especialmente en cultivos leñosos. Un ensamblaje de modelos podría ayudar a superar estas limitaciones gracias a la combinación de las capacidades de todos ellos.

El objetivo de este trabajo es mostrar cómo gracias al ensamblaje de modelos (Knipper et al., 2024) se pueden conseguir estimaciones más precisas de ETa mediante Teledetección, en cultivos sobre los que resulta particularmente complicado la parametrización de sus condiciones biofísicas, por sus características estructurales y su cobertura parcial, como sucede en los cultivos leñosos. El análisis se centrará en los valores semanales, con el foco puesto en las aplicaciones en programación de riegos, y también en los valores acumulados para toda la temporada del cultivo, con la intención de que los resultados resulten de interés para los agricultores, pero también de utilidad para los gestores del agua.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio y medidas

Este trabajo se centra en la provincia de Albacete, y más concretamente muestra los resultados sobre dos parcelas experimentales de almendro y pistacho, colindantes, ubicadas en Tarazona de la Mancha, al norte de la provincia (Fig. 1).

Las dos parcelas están dotadas con una torre de medidas de flujos energéticos Eddy-Covariance (EC, por sus siglas en inglés), instalada en el centro de cada parcela, que registran cada 30-min valores de radiación neta (radiómetro neto de 4 componentes), flujo de calor en el suelo (3-4 platos de flujo), y flujos de calor sensible (anemómetro sónico) y latente (analizador de gases), que se transforma posteriormente en evapotranspiración instantánea. Los datos registrados se acumulan después a escala diaria y semanal. Ambas torres forman parte de la red europea de bases de datos de flujos (EFDC, por sus siglas en inglés).

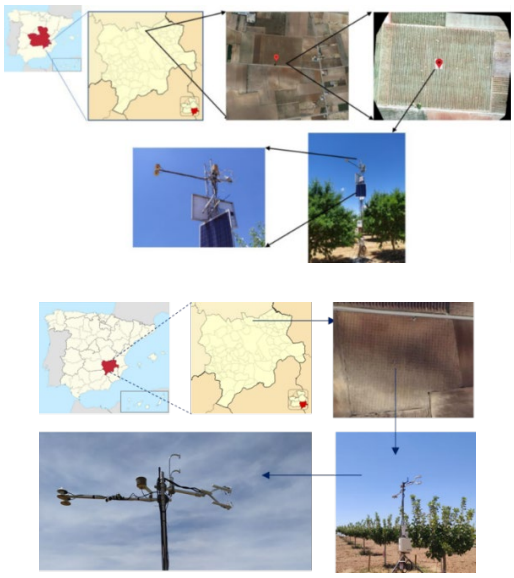


Figura 1. Ubicación de las parcelas experimentales de Almendro (ES-TzM) y Pistacho (ES-Tz2), y disposición de la instrumentación dentro de cada cultivo.

La parcela de almendro (Prunus dulcis) en producción tiene una extensión de 10,6 ha (39º15'58"N, 1º56'23"W) y un sistema de riego por goteo superficial. La estación EC registra datos desde 2020. La parcela de pistacho joven (Pistacia vera), todavía sin producción, cuenta con una extensión de 4,5 ha y un sistema de riego por goteo subterráneo en este caso. La estación EC se instaló en 2023. La información de los riegos aportados, así como los datos de precipitación, están disponibles para este trabajo. También se cuenta con una base de datos de medidas de potencial hídrico de tallo, tomadas con una cámara de presión Schölander, con una frecuencia de 10-15 días durante el periodo de estudio, en ambas plantaciones, y que sirve de elemento de control del estado hídrico de los árboles en todo momento.

2.2. Modelos integrados

Por el momento, se han implementado dos modelos de balance de energía, el modelo Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC, Allen et al., 2007) y la version del Two-Source Energy Balance adaptada a Sentinel (SenET-TSEB, Guzinski et al., 2023). Para el modelo METRIC se han empleado los mapas de ET generados directamente a través de la aplicación EEFLUX (https://eeflux-level1.appspot.com/). En este caso se trabaja con la serie temporal de imágenes VNIR y TIR de Landsat 8 y 9, con un tamaño de píxel de 30 m. Recientes avances en materia de desagregación térmica, permiten mejorar

esta resolución combinando las capacidades VNIR y TIR de Sentinel-2 y -3. Esto es lo que implementa el modelo SenET-TSEB, que combina la capacidad multiespectral y de alta resolución espacial de Sentinel-2 (S2) con la capacidad térmica y de alta frecuencia de revisita de Sentinel-3 (S3), para generar mapas de LST a una resolución de 20 m, para cada fecha disponible de imagen S3. Ambos modelos se han aplicado con éxito con anterioridad, sobre una variedad de cultivos y condiciones climáticas (García-Santos et al. 2022; Guzinski et al., 2023). Sin embargo, son reconocidas ciertas limitaciones del modelo METRIC, debido a la necesidad de identificar sobre la imagen una zona seca y otra húmeda, para una correcta calibración. Por su parte, el modelo TSEB necesita de la integración de información de variables estructurales de la vegetación y los cultivos, por lo que se necesita de un mapa de clasificación de cultivos.

Siguiendo la iniciativa OpenET (Knipper et al., 2024), decidimos integrar en el ensemble también las salidas de la herramienta CWRweb (Campoy et al. 2025). Esta herramienta estima las necesidades hídricas del cultivo (CWR) como una primera aproximación de la evapotranspiración real del cultivo, empleando también series temporales de imágenes de satélite VNIR de Sentinel-2, e información meteorológica. Esta herramienta proporciona ET bajo condiciones estándar empleando la metodología del coeficiente de cultivo-evapotranspiración de referencia (Kc-ETo). Sin embargo, este modelo presenta limitaciones en cultivos de cobertura parcial, o bajo condiciones de estrés hídrico, manejo frecuente en los cultivos leñosos.

Para este trabajo contamos con información de ETo observacional diaria proporcionada por AEMET con un tamaño de rejilla de 5x5 km^2. Es importante señalar que los huecos diarios en ETa entre pasadas de satélite deben rellenarse mediante un procedimiento de interpolación asistida por los valores de ETo.

2.3. Validación

Para evaluar la batería de modelos, así como el resultado del ensamblaje de los mismos, se cuenta con las medidas de las torres EC. Estas medidas se han procesado siguiendo los estándares internacionales y se ha aplicado un rellenado de huecos conservador para disponer de una serie continua de datos acumulados semanales con entidad para una validación de los resultados. Para cada uno de los mapas de ETa acumulada semanal, se ha extraído un conjunto de 3x3 píxeles centrado en la ubicación de las torres, y el valor promedio se ha comparado con el dato observado.

Más allá de esta validación vicaria a escala semanal, resulta muy interesante evaluar la capacidad de los modelos para detectar situaciones de estrés hídrico que se hayan podido producir durante el periodo de estudio, además de dar resultados de ETa estacional. Por este motivo, se analizará también el acumulado de ETa a lo largo de todo el año, con particular interés durante la fase de desarrollo del cultivo. Los datos de precipitación y riego permiten valorar si el aporte de riego va cubriendo o no las necesidades hídricas marcadas por la ETa.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra, a modo de ejemplo, el resultado de los modelos METRIC y SenET_TSEB para la zona de estudio y una semana concreta del periodo analizado. Se trata de mapas de ETa semanal con un tamaño de píxel de 30 m y 20 m, respectivamente. Esta diferencia en resolución espacial se traduce en un mayor nivel de detalle en la imagen de ETa con SenET-TSEB que permite resolver parcelas de menor tamaño. Por otra parte, el ejemplo de la Figura 2 muestra discrepancias entre los dos modelos, más marcadas en las zonas con baja densidad de vegetación. Esta tendencia se mantiene a lo largo de todo el periodo de estudio.

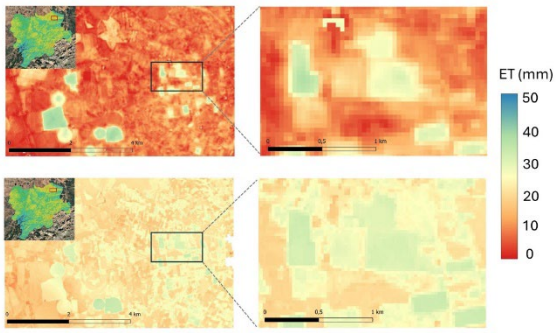


Figura 2. Mapas de ETa semanal (mm) para la semana 33 del año 2024 sobre la zona de estudio. En la parte superior se muestran los resultados de METRIC y en la parte inferior los de SenET-TSEB.

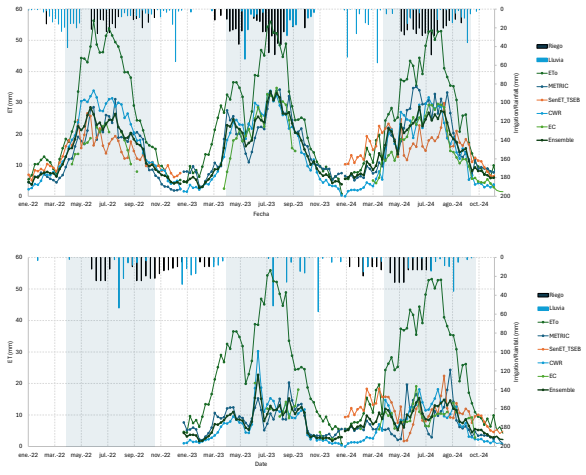


Figura 3. Evolución para el almendro (superior) y el pistacho (inferior) de los valores semanales de ETo, riego, lluvia, y ET obtenida con los distintos modelos y el ensemble.

La Figura 3 muestra la gráfica de evolución de los resultados de ETa semanal para todo el periodo de estudio. Se ofrecen los resultados de los distintos modelos por separado y del ensamble realizado. Las gráficas muestran la estabilidad espaciotemporal de la técnica de CWRweb, frente a una mayor variabilidad en las salidas de METRIC y SenET_TSEB, en parte consecuencia de su capacidad para capturar condiciones no estándar. Además, estos modelos de

balance de energía son capaces de capturar los picos de ET que se producen tras los eventos de lluvia y/o riegos. Los resultados de la validación cuantitativa se recogen en las gráficas de la Figura 4. El ensamble ofrece ligeros mejores resultados del ajuste lineal con los valores medidos por la torre. El ensamble es capaz de estimar la ETa semanal con un error cuadrático medio de ±4,9 mm y ±2,8 mm, para el almendro y el pistacho, respectivamente, con una cierta sobrestimación de 2,7 mm en el almendro, que resulta prácticamente despreciable en el caso del pistacho. Esto supone aproximadamente entre un 15-20% de error relativo en la fase meseta.

De acuerdo con el ensamble, las necesidades hídricas del almendro han oscilado entre los 572 mm del año 2022 y los 657 del año 2023. Si nos centramos en las demandas de riego en el almendro, para el año 2023 se cubrieron con el plan de riegos seguido, mientras que para el 2024, el aporte de riego se quedó casi 60 mm por debajo de la necesidad marcada por el acumulado de ET de cultivo. Este déficit tuvo su respuesta en la plantación, como demuestran las medidas de potencial hídrico de tallo registradas (no mostradas en este trabajo) durante los meses de julio y agosto de 2024. Para el caso del pistacho, el estudio se reduce a los años 2023 y 2024, con acumulados muy similares en ambos años, rondando los 300 mm de ET acumulada por el ensamble. En este caso el aporte de riego estuvo claramente por encima de las necesidades, especialmente en el año 2023. Las medidas de potencial hídrico de tallo corroboran estas buenas condiciones hídricas.

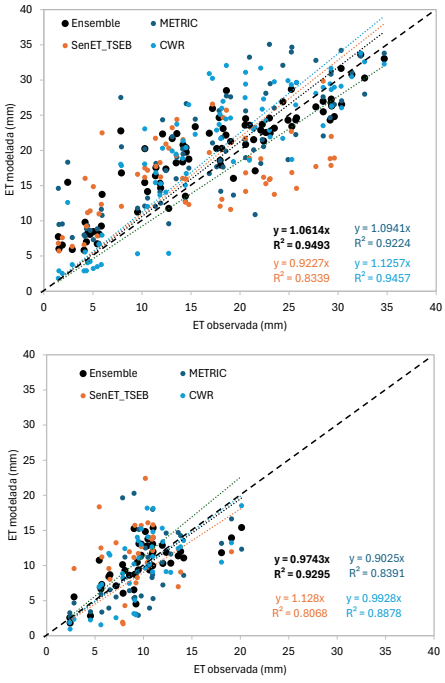


Figura 4. Regresiones lineales entre los resultados de ET semanal para los distintos modelos y el ensamble sobre la parcela de almendro (superior) y pistacho (inferior).

4. CONCLUSIONES

Este estudio viene a reforzar el potencial de la técnica del ensamblaje de modelos basados en técnicas de Teledetección para apoyar la planificación de riegos, detectar condiciones de estrés hídrico, y/o cuantificar necesidades hídricas a escala de parcela en cultivos leñosos, como el almendro y el pistacho. Pero la metodología también tiene la posibilidad de extensión a nivel de comunidad de regantes o de cuenca hidrográfica, gracias a trabajar a partir de imágenes de satélite como base. La combinación de varios modelos permite reducir las incertidumbres asociadas a cada uno de ellos por separado, y de esta forma, se consigue otorgar una mayor fiabilidad a las estimaciones de necesidades hídricas. La metodología desarrollada permitirá ir incorporando más modelos, bien de balance de energía o de balance de agua en suelo, enriqueciendo así el ensamble, y reduciendo cada vez más las incertidumbres en el seguimiento de la ETa en estos cultivos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la UE a través del FEDER y por la JCCM a través de INNOCAM (proyecto TELPIS, SBPLY/24/180225/000115), y por MICIU/AEI/10.13039/501100011033, junto con FEDER, UE (Proyecto EUNOMIA, PID2024-161881OB-C21 y PID2024-161881OB-C22).

6. REFERENCIAS

Allen, R.G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of irrigation and drainage engineering. (133(4))*, 380-394. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(395)

Campoy, J., Sánchez, J.M., Beltrán, A., Pérez, Y., Molina, A., & Calera, A. (2025). Remote-Sensing based Global Evapotranspiration estimates at high spatial resolution through Sentinel-2 satellite imagery and meteorological data. The CWRweb tool. EGU2025, Mayo 2025, Viena. https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU25/EGU25-12878.html.

García-Santos, V., Sánchez, J.M., & Cuxart, J. (2022). Evapotranspiration Acquired with Remote Sensing Thermal-Based Algorithms, A State-of-the-Art Review. *Remote Sens. (14)*, 3440. https://doi.org/10.3390/rs14143440

Guzinski, R., Nieto, H., Ramo Sánchez, R., Sánchez, J.M., Jomaa, I., Zitouna-Chebbi, R., Roupsard, O., & López-Urrea, R. (2023). Improving field-scale crop actual evapotranspiration monitoring with Sentinel-3, Sentinel-2, and Landsat data fusion. International *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. (125)*, 103587. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103587

Knipper, K., et al. (2024). A comparative analysis of OpenET for evaluating evapotranspiration in California almond orchards. *Agricultural and Forest Meteorology, (355)*, 110146. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110146

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.186

Evaluación del efecto del estrés ambiental, la severidad y el estado pre-incendio en la recuperación post-incendio de masas de Pinus y Quercus.

Giambelluca, Ana Laura [1] **González-Audícana, María** [1] **Hermosilla, Txomin** [2] **Álvarez-Mozos, Jesús** [1]

[1] Institute for Sustainability & Food Chain Innovation (IS-FOOD), Dpto. Ingeniería, Universidad Pública de Navarra, Arrosadia s/n, 31006 Pamplona, España.

[2] Canadian Forest Service, 506 Burnside Rd W, Victoria, BC V8Z 1M6, Canadá.

ORCID: Giambelluca 0000-0002-8551-8348 González-Audícana 0000-0002-2430-3853 Hermosilla 0000-0002-5445-0360 Álvarez-Mozos 0000-0002-6518-2533

Correspondencia: analaura.giambelluca@unavarra.es maria.audicana@unavarra.es txomin.hermosillagomez@nrcan-rncan.gc.ca jesus.alvarez@unavarra.es

RESUMEN

Este estudio analiza la dinámica de recuperación forestal post-incendio de masas de Pinus y Quercus afectadas por incendios ocurridos en el año 2003 en Cataluña. El objetivo principal fue evaluar cómo factores topográficos, de estrés ambiental y la severidad del fuego influyen en el tiempo necesario para que la vegetación retorne a sus niveles de productividad primaria neta (NPP) previos al siniestro. Para ello, se empleó el modelo fisiológico simplificado Physiological Principles Predicting Growth from Satellites (3-PGS), en el que se integraron series temporales de la colección Landsat abarcando el período entre 2000 y 2020. Los resultados indicaron que la gran mayoría de las áreas estudiadas lograron recuperarse en este periodo de tiempo. No obstante, se observaron diferencias significativas entre géneros: Quercus mostró una recuperación más veloz que Pinus, especialmente durante el primer año posterior al fuego. Entre las variables evaluadas, la elevación y la severidad del incendio resultaron determinantes. Las zonas situadas a mayor altitud y aquellas que sufrieron incendios más intensos mostraron periodos de recuperación más prolongados en ambos tipos de bosques.

Palabras clave: *Bosque mediterráneo, Recuperación, Landsat, 3-PGS, NPP*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación del efecto del estrés ambiental, la severidad y el estado pre-incendio en la recuperación post-incendio de masas de Pinus y Quercus.

Giambelluca, Ana Laura [(1)], González-Audícana, María [(1)], Hermosilla, Txomin [(2)], Álvarez-Mozos, Jesús [(1)]

[(1)] Institute for Sustainability & Food Chain Innovation (IS-FOOD), Dpto. Ingeniería, Universidad Pública de Navarra, Arrosadia s/n Pamplona, España.

0000-0002-8551-8348, analaura.giambelluca@unavarra.es

0000-0002-2430-3853, maria.audicana@unavarra.es

0000-0002-6518-2533, jesus.alvarez@unavarra.es

[(2)] Canadian Forest Service W, Canadá.

0000-0002-5445-0360, txomin.hermosillagomez@nrcan-rncan.gc.ca

Resumen: Este estudio analiza la dinámica de recuperación forestal post-incendio de masas de *Pinus* y *Quercus* afectadas por incendios ocurridos en el año 2003 en Cataluña. El objetivo principal fue evaluar cómo factores topográficos, de estrés ambiental y la severidad del fuego influyen en el tiempo necesario para que la vegetación retorne a sus niveles de productividad primaria neta (NPP) previos al siniestro. Para ello, se empleó el modelo fisiológico simplificado *Physiological Principles Predicting Growth from Satellites* (3-PGS), en el que se integraron series temporales de la colección Landsat abarcando el período entre 2000 y 2020. Los resultados indicaron que la gran mayoría de las áreas estudiadas lograron recuperarse en este periodo de tiempo. No obstante, se observaron diferencias significativas entre géneros: *Quercus* mostró una recuperación más veloz que *Pinus*, especialmente durante el primer año posterior al fuego. Entre las variables evaluadas, la elevación y la severidad del incendio resultaron determinantes. Las zonas situadas a mayor altitud y aquellas que sufrieron incendios más intensos mostraron periodos de recuperación más prolongados en ambos tipos de bosques.

Palabras clave: Bosque mediterráneo, Recuperación, Landsat, 3-PGS, NPP.

Evaluation of the effect of environmental stress, severity and pre-fire condition on the post-fire recovery of Pinus and Quercus stands.

***Abstract**: This study analyzes the dynamics of post-fire forest recovery of Pinus and Quercus stands affected by fires in 2003 in Catalonia. The main objective was to evaluate how topographic factors, environmental stress factors, and fire severity influence the time required for vegetation to return to its pre-fire levels of net primary productivity (NPP). To this end, the simplified physiological model Physiological Principles Predicting Growth from Satellites (3-PGS) was used, into which Landsat image time series were integrated covering the period between 2000 and 2020. The results indicated that the vast majority of the studied areas recovered within the analyzed period. However, significant differences were observed between genera: Quercus showed a faster recovery than Pinus, especially during the first year after the fire. Among the variables evaluated, elevation and fire severity proved to be determining factors. The areas located at higher altitudes and those that suffered more intense fires showed longer recovery periods in both types of forests.*

***Keywords**: Mediterranean forest, Recovery, Landsat, 3-PGS, NPP.*

1. INTRODUCCIÓN

Conocer la dinámica de recuperación forestal post-incendio es fundamental para implementar medidas de manejo adaptadas a la resiliencia de los ecosistemas mediterráneos. Este conocimiento cobra mayor importancia en el contexto actual, con un incremento en la severidad y frecuencia de los incendios.

En las especies Mediterráneas, las estrategias adaptativas post-incendio varían significativamente. El pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) basa su recuperación en la liberación y dispersión de semillas

mediante conos serótinos, mientras que la encina (*Quercus ilex* L.) lo hace a través del rebrote (Rodrigues *et al*., 2024). Más allá de la especie, la recuperación forestal está condicionada por la interacción compleja de múltiples factores como la topografía, la meteorología y la severidad del incendio, con conclusiones aún poco consistentes debido tanto a la diversidad de metodologías propuestas para su medición, como a la ausencia de una definición universal del concepto de recuperación (White, 2024).

El trabajo de campo constituye una de las vías más precisas para evaluar la recuperación de un bosque. Sin embargo, cuando se trata de monitorizar superficies extensas, la teledetección se presenta como una herramienta eficiente y económica. No obstante, la saturación de los índices de vegetación tradicionales supone un desafío para estimar la biomasa realmente recuperada (Bonannella *et al*., 2022). Para superar estas limitaciones, existen modelos basados en procesos, como el "*Physiological Principles Predicting Growth from Satellites*" (3-PGS) (Coops *et al*., 1998). Estos modelos integran la fisiología forestal y la energía absorbida por el dosel para estimar la Productividad Primaria Bruta y Neta (GPP/NPP), basando la estimación de la fracción fotosintéticamente activa (fPAR) en el índice normalizado de vegetación (NDVI)(Rouse *et al*., 1974).

Este trabajo tiene como objetivo evaluar cómo las variables topográficas, el estrés ambiental abiótico, el NPP pre-incendio y severidad influyen en la recuperación de masas de *Pinus* y *Quercus*.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos

Este estudio se centró en la Comunidad Autónoma de Cataluña, España. Se utilizaron perímetros de incendios en formato vectorial proporcionados por el gobierno autonómico (Generalitat de Catalunya, 2024) correspondientes al año 2003, evaluándose un total de 17 eventos.

A partir de datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de 2016 (IGN, 2024), se generó una malla de 30 m coincidente con la resolución de Landsat. Se excluyeron los píxeles sin cobertura arbórea (altura < 3 m y fracción de cabida cubierta < 10%). Sobre la superficie forestal resultante, se aplicó un muestreo aleatorio estratificado mediante el paquete *spatialEco* de R, estableciendo una distancia mínima de 100 m entre puntos para reducir la autocorrelación espacial. En total se seleccionaron 750 píxeles como píxeles de estudio.

Se procesaron imágenes de la colección Landsat 5, 7 y 8 correspondientes al periodo 2000-2020 en *Google Earth Engine*. Se descartaron las escenas con nubosidad superior al 50%, y se aplicó la máscara de nubes empleando la banda QA_pixel. Para cada imagen, se calculó el NDVI y el índice de Área quemada (NBR) (Key & Benson, 2006).

Las variables topográficas se derivaron del modelo digital del terreno ASTER GDEM (ASTER Science Team, 2019). Las variables climáticas de precipitación y temperaturas (mínima y máxima) se obtuvieron de ClimaEU (Marchi *et al*., 2020), mientras que la radiación solar y los días de helada se extrajeron de ERA5 (Copernicus Climate Change Service, 2020). Todas las variables fueron remuestreadas a una resolución de 30 m.

2.2. Modelo 3-PGS

La recuperación forestal post-incendio se monitorizó mediante la estimación de la NPP mensual utilizando el modelo 3-PGS. Se consideró un bosque como recuperado cuando su NPP post-incendio alcanzó al menos el 80% del valor de NPP previo al incendio, definido como la media de los valores máximos de los dos años previos al incendio. Para cada píxel se cuantificó el tiempo necesario para alcanzar este umbral, denominado Y2R (*Years to Recover*). Además, se calculó la tasa de recuperación (TR), como el cociente entre la severidad del incendio y el Y2R.

Para la estimación de la NPP, el modelo 3-PGS requiere datos medios mensuales de NDVI, temperaturas extremas (máxima y mínima), déficit de presión de vapor (VPD), radiación y precipitación, así como los días de helada por mes. El cálculo de la radiación absorbida por el dosel (APAR) se deriva de la radiación incidente y la fracción de radiación fotosintéticamente activa (fPAR), esta última estimada a partir del NDVI. Posteriormente, la eficiencia fotosintética se ajusta mediante modificadores ambientales que representan condiciones de estrés, permitiendo el cálculo de la APAR utilizable (APARu). Estos modificadores, cuyos valores oscilan entre 0 (limitación total) y 1 (condiciones óptimas), penalizan la productividad potencial, principalmente, en función del balance hídrico del suelo (fSW), el déficit de presión de vapor (fVPD), las temperaturas extremas (fTemp) y el régimen de heladas. La GPP se obtiene multiplicando la APARu calculada por la eficiencia en el uso de la luz por el dosel (valor empírico = 1.8 gC/MJ). Finalmente, la NPP se estima como el 47% de la GPP (Landsberg & Waring, 1997). Para estandarizar la comparación interanual, se analizaron los valores máximos anuales de NPP y se calculó su tendencia. La cantidad de años necesaria para que la línea de tendencia supere el umbral pre-incendio se registró como el Y2R del píxel.

2.3. Variables analizadas

Se evaluó la influencia de ocho variables en la recuperación del bosque: tres variables topográficas (elevación, pendiente y orientación), tres factores de estrés ambiental (fSW, fTemp y fVPD), la severidad del incendio y la NPP pre-incendio. La orientación se transformó mediante el índice TRASP (Roberts & Cooper, 1989), donde el valor 0 corresponde a exposiciones frescas y el valor 1 a laderas xéricas. Los factores de estrés usados se calcularon como la media del modificador en el período vegetativo (mayo-octubre) durante los primeros cinco años post-incendio, periodo crítico para la recuperación. La severidad del incendio se calculó como la diferencia entre el NBR pre-incendio y post-incendio (dNBR).

2.4. Análisis

El análisis se estratificó por género (*Pinus* y *Quercus*). Las diferencias en las distribuciones acumuladas de recuperación se evaluaron mediante el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S). La relación entre las variables ambientales, Y2R y la tasa de recuperación se determinó mediante correlaciones de Pearson. Asimismo, se empleó el test de Kruskal-Wallis y una prueba *post hoc* de Bonferroni para identificar diferencias significativas de cada variable, considerando cuatro categorías de recuperación definidas por los cuartiles del Y2R (< 4 años, 4-7 años, 7-11 años y > 11 años.

3. RESULTADOS

Las masas de *Quercus* mostraron una recuperación más rápida que las de *Pinus* (Figura 1), con diferencias estadísticamente significativas en la proporción de área recuperada ($p < 0.05$, test K-S). fSW fue el que presentó mayor correlación con los Y2R y la TR, tanto en *Pinus* ($r = 0.61$, $r = -0.64$) como en *Quercus* ($r = 0.59$, $r = -0.62$) (Tabla 1). Esta relación sugiere que, a menor estrés hídrico, los bosques tardan más tiempo en recuperarse al tener una TR de recuperación más baja.

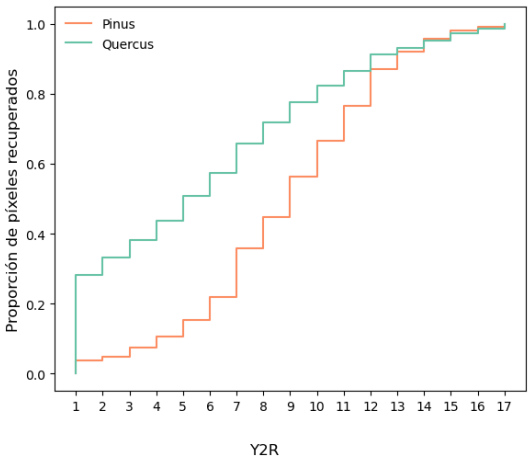


Figura 1. Proporción de píxeles recuperados considerando el tiempo necesario para alcanzar la recuperación (Y2R).

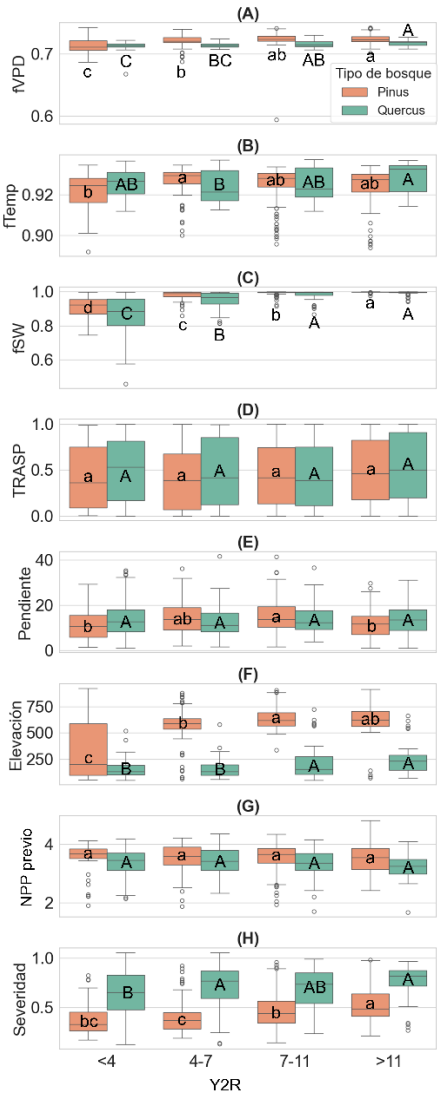


Figura 2. Diferencias significativas entre el mismo tipo de bosque, considerando 4 clases de Y2R.

Tabla 1. Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables analizadas junto con los años para recuperarse (Y2R) y la tasa de recuperación (TR) por tipo de bosque. Diagonal superior datos de Pinus. Diagonal inferior datos de Quercus.

		Pinus									
		fVPD	**fTemp**	**fSW**	**TRASP**	**Pendiente**	**Elevación**	**Severidad**	**NPP previo**	**Y2R**	**TR**
Quercus	**fVPD**		-0.37	0.29	0.08	0.14	0.76	0.05	0.41	0.28	-0.27
	fTemp	0.71		0.14	-0.04	-0.08	-0.34	-0.07	-0.31	0.02	-0.11
	fSW	0.12	-0.07		0.09	0.11	0.56	0.10	-0.24	0.61	-0.64
	TRASP	-0.07	-0.11	0.06		-0.02	0.00	-0.04	-0.16	0.06	0.03
	Pendiente	0.26	0.39	0.01	-0.08		0.25	0.01	0.09	-0.01	-0.13
	Elevación	0.73	0.70	0.16	-0.15	0.21		0.03	0.29	0.41	-0.51
	Severidad	0.17	0.19	0.04	-0.09	0.09	-0.01		0.16	0.30	0.22
	NPP previo	0.24	0.18	-0.51	-0.27	0.01	0.23	0.24		-0.05	0.05
	Y2R	0.26	0.06	0.59	-0.02	-0.01	0.28	0.18	-0.09		-0.56
	TR	-0.09	0.13	-0.62	0.02	0.10	-0.13	0.17	0.15	-0.73	

Dado que la mayoría de los píxeles presentan un estrés hídrico leve, estos resultados sugieren que la adaptación pirófila de los bosques mediterráneos actúa como un mecanismo de compensación, evitando que un déficit hídrico leve limite la recuperación. Las zonas más elevadas presentaron tiempos de recuperación más largos con TR más bajas (Tabla 1 y Figura 2F). Esto podría deberse a su correlación positiva con la NPP (Tabla 1): a mayor biomasa quemada, mayor es el tiempo necesario para retornar a los valores pre-incendio. Los incendios más severos mostraron tiempos de recuperación más prolongados (Tabla 1 y Figura 2H) a pesar de presentar TR mayores. Esto puede deberse a la asociación positiva con la NPP, sugiriendo que una mayor carga de combustible en el terreno incrementa la severidad del incendio, así como una mayor complejidad del bosque permitiría un rebrote mayor (banco de semillas, pies para rebrotar). Cabe destacar que los ejemplares de *Pinus* se localizaron en sitios significativamente más altos y con menor severidad que los ejemplares de *Quercus* (Figura 2F y H).

4. CONCLUSIONES

La elevación, la severidad del incendio y la NPP pre-incendio fueron las variables más estrechamente ligadas a los mayores tiempos de recuperación. Valores más elevados de estos factores implicaron un retraso en la recuperación. No obstante, una mayor severidad y NPP pre-incendio también se relacionaron con incrementos en la tasa de recuperación, probablemente debido a la reducción de competencia y a la persistencia de remanente de bosque que facilita su rebrote. Las masas de *Quercus* se localizaron en zonas de menor altitud, las severidades de los incendios fueron estadísticamente superiores; no obstante, su elevada capacidad de rebrote podría estar compensando estas condiciones, lo que se traduce en una mayor área recuperada en los primeros años. Por el contrario, las masas de *Pinus* alcanzaron la recuperación de la mayor parte de su superficie en años posteriores, al depender exclusivamente de la dispersión y germinación de semillas y localizarse en zonas más elevadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al grupo IRSS de la Universidad de la Columbia Británica por su apoyo para la comprensión del modelo 3-PGS. Esta investigación ha sido financiada por medio de las “Ayudas predoctorales 2022 del Gobierno de Navarra para la realización de programas de doctorado de interés para Navarra”, identificación BDNS: 631887. Y por medio del proyecto DAMAGE (PID 2023 152885 OB I 00 financiado por MCIU/AEI/ 10 13039 501100011033 / UE).

6. REFERENCIAS

ASTER Science Team. (2019). ASTER Global Digital Elevation Model V003. https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003

Bonannella, C., Chirici, G., Travaglini, D., Pecchi, M., Vangi, E., D’Amico, G., & Giannetti, F. (2022). Characterization of Wildfires and Harvesting Forest Disturbances and Recovery Using Landsat Time Series: A Case Study in Mediterranean Forests in Central Italy. *Fire, 5*(3), 68. https://doi.org/10.3390/fire5030068

Coops, N. C., Waring, R. H., & Landsberg, J. J. (1998). Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. *Forest Ecology and Management, 104*(1–3), 113–127. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00248-X

Copernicus Climate Change Service. (2020). E-OBS daily gridded meteorological data for Europe from 1950 to present derived from in-situ observations. ECMWF. https://doi.org/10.24381/CDS.151D3EC6

Generalitat de Catalunya. (2024). Wildfires of Catalunia. https://agricultura.gencat.cat/

Instituto Geográfico Nacional. (2024). PNOA LiDAR. https://pnoa.ign.es/

Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment (LA). In D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson, S. Sutherland, & L. J. Gangi (Eds.), FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system (Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD, pp. LA-1-55). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Landsberg, J. J., & Waring, R. H. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management, 95*(3), 209–228. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00026-1

Marchi, M., Castellanos-Acuña, D., Hamann, A., Wang, T., Ray, D., & Menzel, A. (2020). *ClimateEU, scale-free climate normals, historical time series, and future projections for Europe. Scientific Data, 7*(1), 428. https://doi.org/10.1038/s41597-020-00763-0

Roberts, D. W., & Cooper, S. V. (1989). Concepts and techniques of vegetation mapping. In Proceedings of a symposium—Land classifications based on vegetation: Applications for resource management (pp. 90–96). USDA Forest Service General Technical Report INT-257.

Rodrigues, M., De La Riva, J., Domingo, D., Lamelas, T., Ibarra, P., Hoffrén, R., & García-Martín, A. (2024). An empirical assessment of the potential of post-fire recovery of tree-forest communities in Mediterranean environments. *Forest Ecology and Management, 552*, 121587.https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121587

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation (CR-144661). Remote Sensing Center Texas A&M University.

White, J. C. (2024). Characterizing forest recovery following stand-replacing disturbances in boreal forests: *Contributions of optical time series and airborne laser scanning data. Silva Fennica, 58*(2), 23076. https://doi.org/10.14214/sf.23076

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.189

Evaluación de imágenes de alta resolución para el seguimiento de la floración de la encina

Calbet, Ana [1] **García Moreno, Alma M.** [1] **Carbonero, M. Dolores** [2] **Muñoz Gómez, M.Jose** [1] **Andreu, Ana** [3] **Cáceres Clavero, Francisco** [4] **González-Dugo, María P.** [1]

[1] Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA Alameda del Obispo, Cordobá, España

[2] Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA Hinojosa del Duque, Córdoba, España

[3] Dpto. de Agronomía, Unidad de Excelencia María de Maeztu (DAUCO), Universidad de Córdoba,Córdoba, España,

[4] Dpto. Recursos Naturales y Forestales, IFAPA Alameda del Obispo, 14071, Córdoba, España

ORCID: CALBET 0000-0002-2665-4921 CARBONERO 0000-0003-2301-4301 MUÑOZ GÓMEZ 0000-0003-3444-2459 ANDREU 0000-0001-8346-5417 CÁCERES CLAVERO 0000-0002-2961-9507 GONZÁLEZ-DUGO 0000-0003-0423-8246

Correspondencia: ana.calbet@juntadeandalucia.es alma.garcia@juntadeandalucia.es mariad.carbonero@juntadeandalucia.es maria.munoz.gomez@juntadeandalucia.es ana.andreu@uco.es francisco.caceres@juntadeandalucia.es mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es

RESUMEN

La fenología se emplea con frecuencia como indicador del impacto del calentamiento global. En sistemas agroforestales mediterráneos como la dehesa, la floración de la encina es clave por su sensibilidad al clima y por su papel en la producción de bellotas en el aprovechamiento ganadero que sostiene económicamente el sistema. Este trabajo tiene como objetivo evaluar imágenes de alta resolución capturadas por UAV para el seguimiento y la detección de la intensidad de floración de la encina. Se aplicó un índice basado en la distancia al amarillo y se comparó con observaciones de campo en dos dehesas de Córdoba durante tres años. Los resultados mostraron patrones consistentes entre años. En vista del comportamiento observado, se contempla el desarrollo de una metodología que permita ampliar la escala espacio-temporal y, junto con el componente meteorológico, contribuya a mejorar nuestro conocimiento y capacidad predictiva sobre la producción de bellota, ayudando a propietarios y gestores en la toma de decisiones.

Palabras clave: *Fenología, floración, UAVs, encina*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación de imágenes de alta resolución para el seguimiento de la floración de la encina

Calbet, Ana [(1)], García Moreno, Alma M. [(1)], Carbonero, M. Dolores [(2)], Muñoz Gómez, M.Jose [(1)], Andreu, Ana [(3)], Cáceres Clavero, Francisco [(4)], González-Dugo, María P. [(1)]

[(1)] Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA Alameda del Obispo, Córdoba, España.

0000-0002-2665-4921, ana.calbet@juntadeandalucia.es
alma.garcia@juntadeandalucia.es.

0000-0003-3444-2459, maria.munoz.gomez@juntadeandalucia.es

0000-0003-0423-8246, mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es.

[(2)] Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA Hinojosa del Duque, Córdoba, España.

0000-0003-2301-4301, mariad.carbonero@juntadeandalucia.es

[(3)] Dpto. de Agronomía, Unidad de Excelencia María de Maeztu (DAUCO), Universidad de Córdoba, España.

0000-0001-8346-5417, ana.andreu@uco.es.

[(4)] Dpto. Recursos Naturales y Forestales, IFAPA Alameda del Obispo, España.

0000-0002-2961-9507, francisco.caceres@juntadeandalucia.es.

Resumen: La fenología se emplea con frecuencia como indicador del impacto del calentamiento global. En sistemas agroforestales mediterráneos como la dehesa, la floración de la encina es clave por su sensibilidad al clima y por su papel en la producción de bellotas en el aprovechamiento ganadero que sostiene económicamente el sistema. Este trabajo tiene como objetivo evaluar imágenes de alta resolución capturadas por UAV para el seguimiento y la detección de la intensidad de floración de la encina. Se aplicó un índice basado en la distancia al amarillo y se comparó con observaciones de campo en dos dehesas de Córdoba durante tres años. Los resultados mostraron patrones consistentes entre años. En vista del comportamiento observado, se contempla el desarrollo de una metodología que permita ampliar la escala espacio-temporal y, junto con el componente meteorológico, contribuya a mejorar nuestro conocimiento y capacidad predictiva sobre la producción de bellota, ayudando a propietarios y gestores en la toma de decisiones.

Palabras clave: Fenología, sistemas agroforestales, teledetección, UAVs

Evaluation of high-resolution imagery for monitoring the flowering of holm oak trees

***Abstract**: Phenology is often used as an indicator of the impact of global warming. In Mediterranean agroforestry systems, such as the dehesa, holm oak flowering is doubly relevant because of its susceptibility to climate and its importance for acorn production, which sustains the system economically. This study aims to evaluate high-resolution UAV images for monitoring and detecting the intensity of holm oak flowering. An index based on the distance to yellow was applied and compared with field observations in two dehesas of Córdoba over three years. The results showed consistent patterns between years. In light of the observed behavior, a methodology is being developed to extend the spatiotemporal scale and, together with the meteorological component, improve our understanding and predictive capacity of acorn production, thereby helping owners and managers in their decision-making.*

***Keywords**: Phenology, agroforestry systems, remote sensing, UAVs*

1. INTRODUCCIÓN

La dehesa es el sistema agrosilvopastoral más extenso de Europa, superando los 3,5 millones de hectáreas en la Península Ibérica. Incluido en la Directiva Hábitat (DOUE, 1992) como hábitat protegido, es un paisaje seminatural que permite establecer un equilibrio entre el aprovechamiento socioeconómico y el desarrollo rural, y la sostenibilidad ambiental. La especie más representativa del sistema es la encina (*Quercus ilex* subsp. *ballota*), prioritaria en el 70% de su superficie (Carbonero & Fernández-Rebollo, 2014; Díaz *et al*., 2021). La producción de bellotas de encina tiene gran importancia ecológica y económica en este sistema, dadas sus implicaciones comerciales. Es crucial, por tanto, conocer los patrones de reproducción de bellotas para una gestión sostenible del ecosistema.

El evento fenológico más influyente en la producción final de bellotas es la floración y su éxito depende en gran medida de la intensidad de la polinización (García-Mozo *et al*., 2012). Los estudios sobre la fenología y la producción de bellota en encina han sido escasos y aún no existe un modelo que integre todas las variables de su ciclo reproductivo. Esta falta se debe a la elevada variabilidad del sistema, influida tanto por factores inherentes al árbol como la diversidad genética, y a factores externos como el clima, el suelo y la gestión. Además, la producción es vecera y asincrónica entre individuos, lo que contribuye a la resiliencia del ecosistema frente al cambio climático, pero dificulta su caracterización, uso y planificación (Carbonero & Fernández-Rebollo, 2014).

Los modelos climáticos indican que la región mediterránea es especialmente vulnerable al calentamiento global. Estas previsiones indican un aumento de la aridez y una reducción de la productividad de los sistemas agroforestales. (Hidalgo-Triana *et al*., 2023). En el caso de la dehesa, la disminución de la producción podría llevar al abandono de la actividad o al cambio de uso de suelo, lo que provocaría, en ambos casos, una degradación ambiental. El calentamiento global está modificando los ritmos biológicos, provocando un adelanto de las fases fenológicas debido al aumento de las temperaturas, así como un incremento del aborto de frutos debido al mayor estrés hídrico durante el verano. Estudios previos apuntan a cambios en las dinámicas fenológicas, como el aumento de episodios de floración otoñales en años de baja polinización durante la primavera, derivados de la ocurrencia de episodios meteorológicos extremos, como eventos de sequía o lluvias intensas (García-Mozo *et al*., 2022; Díaz *et al*., 2021).

Comprender la floración de la encina resulta, por tanto, muy relevante. Sin embargo, estimarla en campo es una tarea compleja y laboriosa y no es posible hacerlo a gran escala. El presente estudio se basa en la metodología propuesta por Gómez-Giráldez *et al*. (2021), basada en imágenes de UAV de alta resolución para la identificación y estimación de la intensidad de floración de *Quercus ilex*. El objetivo es ampliar la escala espacio-temporal de aplicación, reforzar la robustez del índice y de la metodología aplicada. Esto, junto con avances en el conocimiento sobre la influencia de la meteorología, abriría nuevas posibilidades para mejorar la comprensión de la fenología y de la producción de encina, con el fin de mejorar la planificación y gestión sostenible de las fincas de dehesa.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se ha llevado a cabo en dos parcelas de dehesa situadas en la comarca de Los Pedroches, provincia de Córdoba (Fig. 1). La región presenta un clima mediterráneo continental, con precipitaciones moderadas (400-700 mm) irregularmente distribuidas a lo largo del año. La temperatura media anual es de 17 °C, con temperaturas invernales frecuentemente inferiores a 10 °C y veraniegas con máximos de 47 °C. Los suelos son silíceos, de textura arenosa y ricos en cuarzo, presentando una baja capacidad de retención de agua debido a su escaso contenido de arcilla.

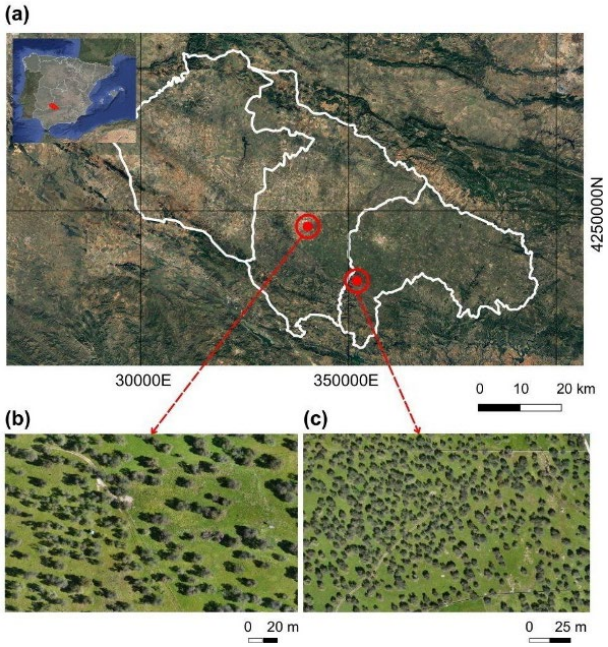


Figura 1. Localización de las parcelas de dehesa en la Península Ibérica (a). Imágenes RGB tomadas con un UAV en las dos parcelas (b) y (c).

2.2. Fuentes de datos

Durante tres años se realizaron campañas de campo y se adquirieron, simultáneamente, imágenes aéreas a bordo de UAV en primavera, coincidiendo con el pico de floración de la encina. Para la captura de imágenes se utilizó una cámara fotogramétrica S.O.D.A. (senseFLY, North Carolina, USA) montada en un UAV, con una resolución espacial de 3 cm, así como un dron DJI Mini

2 equipado con un sensor de 1/2,3″ y una resolución espacial de 2 cm. Los vuelos se realizaron entre las 11:00 h y las 13:00 h, bajo condiciones climáticas favorables y con cielos despejados.

Se seleccionaron aleatoriamente entre 30 y 40 árboles por parcela. De forma simultánea a los vuelos, se llevó a cabo el registro de datos en campo, con la clasificación de cada individuo en función de la intensidad de floración (nula-baja = 1, media = 2, alta = 3). Se tomaron fotografías digitales laterales de cada individuo para su posterior valoración en gabinete.

2.3. 2.3. Estimación, validación y análisis del índice

Para el desarrollo de este trabajo se adoptó la metodología propuesta en un estudio preliminar de Gómez-Giráldez *et al*. (2021), que propone la aplicación de un índice de proximidad al amarillo puro en un espacio RGB cartesiano para determinar la intensidad de floración de la encina a partir de imágenes RGB. La flor masculina de la encina cuelga en amentos de color amarillo intenso, y la intensidad varía según el árbol. La hipótesis establece que a mayor intensidad de floración de un árbol, más amarillo aparecerá en la imagen.

Para calcular el índice de amarillo, se generaron mapas de distancia cromática hasta el amarillo puro (255, 255, 0). Para ello, cada píxel se representó en el espacio RGB (0–255) y se calculó el módulo del vector que conecta su posición con el color de referencia. Se establecieron máscaras sobre las copas de los árboles muestreados, excluyendo áreas de sombra y de alto grado de defoliación, para evitar interferencias del pasto presente bajo las copas. De cada individuo se extrajeron el valor promedio de la copa y el promedio de los valores correspondientes al primer cuartil, con el fin de analizar específicamente los píxeles más cercanos al amarillo. Esto permitió diferenciar entre la floración general y las zonas con mayor intensidad de floración.

Para el análisis estadístico, se evaluó la normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk. Cuando se cumplió el supuesto de normalidad, se aplicó un ANOVA, seguido del test de Tukey para la comparación de medias (IC = 95%; FWER = 5%). En ausencia de normalidad, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis, complementada con el test de Dunn y el ajuste de Holm para el control del error.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron las relaciones entre la intensidad de floración en tres clases y el índice propuesto durante los tres años de estudio. La Figura 2 permite comparar el comportamiento del índice según la intensidad y el año. En conjunto, se observa que, a medida que aumenta la intensidad de floración, se reduce la distancia al amarillo, siendo I1>I2>I3 en ambas variables analizadas a lo largo de los tres años de estudio. Esto sugiere que existe un patrón constante. Destaca el año 2024 por presentar una mayor dispersión e inestabilidad en los valores promedio; esto podría indicar una mayor variabilidad fenológica y de las condiciones climáticas entre las parcelas.

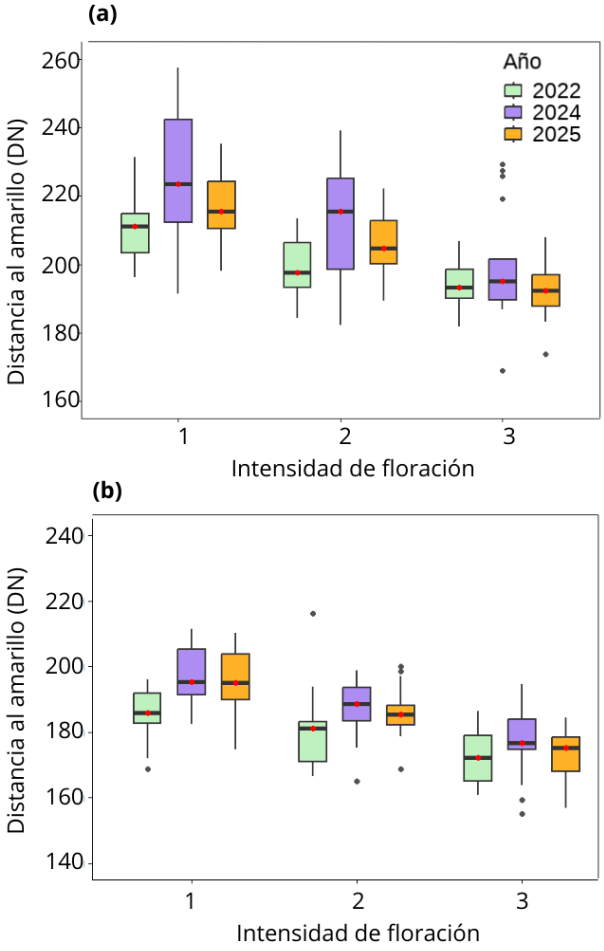


Figura 2. Valores promedio (a) y promedios de Q1 (b) de la distancia al amarillo frente a la intensidad de floración. Años 2022, 2024 y 2025.

Los análisis estadísticos mostraron que, en todos los años analizados, existieron diferencias significativas entre clases (Tabla 1). Asimismo, el análisis de comparaciones dos a dos indicó diferencias significativas entre cada par de clases en prácticamente todos los casos, excepto en los valores promedio de 2022 entre las clases 2-3, en los valores promedio de Q1 de 2022 entre las clases 1-2, y en 2024 en los promedios de las clases contiguas 1-2 y 2-3. Los resultados muestran comparativa entre el análisis de valores medios y de valores de Q1 indica que el estudio de valores más bajos de la distribución resulta más adecuado para evaluar el efecto de la intensidad de floración, ya que presenta un mayor grado de diferenciación entre clases dos a dos en los tres años de estudio.

Tabla 1. Resultados de pruebas estadísticas (Shapiro, ANOVA/Kruskal-Wallis) y comparaciones post-hoc (Tukey/Dunn) de valores promedio (a) y valores promedio de Q1 (b).

a)

Año	Shapiro	ANOVA	Tukey
2022	0.575	4.4e-7***	2–1: 1.3e-4; 3–1: 7e-7; 3–2: 0.108
2024	0.234	1.95e-3***	2–1: 0.057; 3–1: 1.14e-4; 3–2: 0.058
2025	0.552	2.65e-13***	2–1: 5.23e-5; 3–1: 0.0; 3–2: 3.60e-6

b)

Año	Shapiro	ANOVA	Tukey
2022	0.129	1.03e-6***	2–1: 1.96e-3; 3–1: 7e-7; 3–2: 0.019
2024	0.019	2,18e-2	2–1: 2.32e-2; 3–1: 1.11-5; 3–2: 1.94e-2
2025	0.141	5.03e-11***	2–1: 1.16e-3; 3–1: 0.0; 3–2: 1.48e-5

En definitiva, la tendencia observada en los diagramas es respaldada por los resultados del análisis estadístico. En ambos casos, se aprecian diferencias estables entre años, donde la distancia de amarillo varía en función de la intensidad de floración, lo que refleja una diferencia progresiva entre clases.

4. CONCLUSIONES

En conjunto, los resultados ponen de manifiesto que la intensidad de floración influye de manera consistente en la variación del índice de distancia al amarillo, afectando tanto a los valores centrales como a los mínimos representativos, y que este efecto se mantiene a lo largo del tiempo, aunque modulado por la variabilidad interanual. Estos hallazgos resaltan la utilidad de combinar información derivada de vuelos de dron con datos de campo para caracterizar patrones ecológicos complejos en sistemas de dehesa y sientan las bases para futuros estudios.

Es preciso señalar que no se pudieron establecer umbrales definidos de intensidad de floración que permitieran realizar comparaciones interanuales, debido a que las imágenes no fueron calibradas de forma homogénea. Esto se debe al uso de distintos sensores y a la ausencia de paneles de calibración, lo que implica que los valores de color registrados no son directamente comparables entre años, al estar influenciados por diferencias en la respuesta espectral, las condiciones de iluminación y el procesado interno de cada dispositivo. En consecuencia, el análisis se realizó a partir de valores digitales. En este sentido, será necesario avanzar hacia el uso de valores de reflectancia y la estandarización de los procedimientos metodológicos.

Se está estudiando la posibilidad de ampliar la escala espacio-temporal, con la adquisición de imágenes satelitales que permitan incrementar la frecuencia de las fuentes de datos para mejorar la continuidad y consistencia de la información. De tal forma que se pueda aportar grandes paquetes de información simultáneamente a un gran número de técnicos y propietarios, con la previsión de facilitar la gestión. Este avance, junto con el estudio de la influencia de la meteorología en la fenología de la encina, podría abrir la puerta a la creación de indicadores que estimen la producción anual de bellota.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PP.AVA23.INV202301.030, PR.TRA23.TRA2023.002 y PR.TRA23.TRA2023.009 (O.P. Andalucía 2021-2027, 80% cofinanciado por FEDER) y por el proyecto EU Horizon Europe DRYAD (nº 101156076). La investigación realizada por A. Calbet ha sido posible gracias al contrato que forma parte de la ayuda PRE2022-105210, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

6. REFERENCIAS

Carbonero, M. D., & Fernández-Rebollo, P. (2014). Dehesas de encinas: Influencia de la meteorología en la producción de bellotas. *Ecosistemas, 23*(2), 55–63. https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-2.08

Díaz M, Sánchez-Mejía T, Morán-López T (2021) Long-Term Tree Regeneration of Fragmented Agroforestry Systems Under Varying Climatic Conditions. *Front. Ecol. Evol. 9*:640143. https://doi.org/ 10.3389/fevo.2021.640143

DOUE-L-1992-81200 1992. Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. (s/f).

García-Mozo, H., Domínguez-Vilches, E., & Galán, C. (2012). A model to account for variations in holm-oak (Quercus ilex subsp. ballota) acorn production in southern Spain. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine, 19*(3), 403–408

Díaz, M., Sánchez-Mejía, T., & Morán-López, T. (2021). Long-term tree regeneration of fragmented agroforestry systems under varying climatic conditions. *Frontiers in Ecology and Evolution, 9*, 640143. https://doi.org/10.3389/fevo.2021.640143

Hidalgo-Triana, N., Solakis, A., Casimiro-Soriguer, F., Choe, H., Navarro, T., Pérez-Latorre, A. V., & Thorne, J. H. (2023). The high climate vulnerability of western Mediterranean forests. *Science of the Total Environment, 895*, 164983. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164983

Gómez-Giráldez, P. J., Carbonero, M. D., Carpintero, E., & González-Dugo, M. P. (2021). Estimation of holm oak flowering intensity in dehesa farms using high-resolution aerial images. In Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXIII (Proceedings of SPIE, Vol. 11856, 1185616). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.2601186

ongresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.198

Retrodispersión estacional en banda C de Sentinel-1 en bosque tropical seco; interacciones entre régimen ecohidrológico y geometría de observación.

Martínez Barbáchano, Rubén [1] **Escayo Menéndez, Joaquín** [2] **Pérez-Cabello, Fernando** [1] **Lozano Valencia, Pedro José** [3]

[1] Universidad de Zaragoza, España

[2] Universidad Politécnica de Madrid

[3] Universidad del País Vasco

ORCID: Martínez Barbáchano 0000-0002-9176-3112 Escayo Menéndez 0000-0002-4394-5018 Pérez-Cabello 0000-0003-4831-4060 Lozano Valencia 0000-0002-1345-5704

Correspondencia: rubenztm@gmail.com J.escayo@upm.es fcabello@unizar.es pedrojose.lozano@ehu.eus

RESUMEN

La presente investigación muestra un flujo de trabajo reproducible para interpretar series temporales SAR Sentinel-1 en ecosistemas tropicales estacionales evitando ambigüedades fenológicas. El estudio se desarrolló en el Parque Nacional Santa Rosa (Costa Rica) considerando tres ambientes del bosque tropical seco caducifolio. Las series multi-anuales (2017–2025) fueron transformadas a ciclo anual plegado (DOY) para aislar la componente estacional, y se analizaron las polarizaciones VV y VH junto con índices diferenciales (VV−VH, VH−VV) y métricas temporales como mínimo seco, inicio hidrológico funcional (umbral del 30% de amplitud), pendientes tempranas y anisotropía entre órbitas. Los resultados muestran la ausencia de máximos estructurales consistentes y la presencia de fuerte anisotropía orbital, indicando que la señal en banda C está dominada por transiciones suelo-dosel dependientes de la geometría de observación durante el reverdecimiento temprano. Se propone un criterio operativo para distinguir fenología real de artefactos ecohidrológicos; un evento fenológico debe ser estable en DOY, independiente de la órbita y coherente entre polarizaciones. En este ecosistema estas condiciones no se cumplen, evidenciando que Sentinel-1 detecta estados ecohidrológicos recurrentes más que el momento de rebrote. El método proporciona una base replicable para análisis fenológico radar en regiones tropicales estacionales.

Palabras clave: *SAR, series temporales, Sentinel-1, bosque tropical seco, régimen ecohidrológico, geometría de observación*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Retrodispersión estacional en banda C de Sentinel-1 en bosque tropical seco; interacciones entre régimen ecohidrológico y geometría de observación.

Martínez Barbáchano, Rubén [(1)], Escayo Menéndez, Joaquín [(2)], Pérez-Cabello, Fernando [(1)], Lozano Valencia, Pedro José [(4)]

[(1)] Universidad de Zaragoza, España.

0000-0002-9176-3112, rubenztm@gmail.com ; 0000-0003-4831-4060, fcabello@unizar.es.

[(2)] Universidad Politécnica de Madrid, España.

0000-0002-4394-5018, J.escayo@upm.es.

[(4)] Universidad del País Vasco, España.

0000-0002-1345-5704, pedrojose.lozano@ehu.eus.

Resumen: La presente investigación muestra un flujo de trabajo reproducible para interpretar series temporales SAR Sentinel-1 en ecosistemas tropicales estacionales evitando ambigüedades fenológicas. El estudio se desarrolló en el Parque Nacional Santa Rosa (Costa Rica) considerando tres ambientes del bosque tropical seco caducifolio. Las series multi-anuales (2017–2025) fueron transformadas a ciclo anual plegado (DOY) para aislar la componente estacional, y se analizaron las polarizaciones VV y VH junto con índices diferenciales (VV−VH, VH−VV) y métricas temporales como mínimo seco, inicio hidrológico funcional (umbral del 30% de amplitud), pendientes tempranas y anisotropía entre órbitas. Los resultados muestran la ausencia de máximos estructurales consistentes y la presencia de fuerte anisotropía orbital, indicando que la señal en banda C está dominada por transiciones suelo-dosel dependientes de la geometría de observación durante el reverdecimiento temprano. Se propone un criterio operativo para distinguir fenología real de artefactos ecohidrológicos; un evento fenológico debe ser estable en DOY, independiente de la órbita y coherente entre polarizaciones. En este ecosistema estas condiciones no se cumplen, evidenciando que Sentinel-1 detecta estados ecohidrológicos recurrentes más que el momento de rebrote. El método proporciona una base replicable para análisis fenológico radar en regiones tropicales estacionales.

Palabras clave: SAR, Sentinel-1, series temporales, bosque tropical seco, eco-hidrología.

Seasonal C-band backscatter in tropical dry forest: interactions between ecohydrological regime and observation geometry

Abstract:*This work presents a reproducible workflow to interpret Sentinel-1 SAR time series in seasonal tropical ecosystems while avoiding phenological misinterpretations. The study was conducted in Santa Rosa National Park (Costa Rica), considering three environments of the Mesoamerican tropical dry forest. Multi-annual series (2017–2025) were transformed into folded annual cycles (DOY) to isolate seasonal variability. VV and VH polarizations were analyzed together with differential indices (VV−VH, VH−VV) and temporal metrics including dry minimum, functional hydrological onset (30% amplitude threshold), early slopes, and orbital anisotropy. Results show the absence of consistent structural maxima and strong orbital dependence, indicating that C-band backscatter is dominated by geometry-dependent soil–canopy interactions during early greening. An operational criterion is proposed to distinguish real phenology from ecohydrological artifacts: a phenological event must be stable in DOY, orbit-independent, and consistent across polarizations. These conditions are not met, suggesting that Sentinel-1 captures recurrent ecohydrological states rather than leaf-out timing. The method provides a transferable framework for radar-based phenological analysis in seasonal tropical ecosystems.*

Keywords: *SAR, Sentinel-1 time series, tropical dry forest, ecohydrological regime, observation geometry.*

1. INTRODUCCIÓN

Las series temporales SAR Sentinel-1 permiten el análisis continuo de la dinámica de la vegetación al ser independientes de la nubosidad. Sin embargo, en ecosistemas tropicales estacionales persiste una ambigüedad fundamental: la variabilidad de la retrodispersión puede responder tanto a procesos

fenológicos como a cambios en el régimen ecohidrológico y en la geometría de observación. Este trabajo aborda esta problemática en el bosque tropical seco del Parque Nacional Santa Rosa (Costa Rica), proponiendo un enfoque basado en ciclos anuales plegados (DOY) y métricas derivadas de polarización y órbita para distinguir entre señal fenológica real y efectos geométrico-hidrológicos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el Parque Nacional Santa Rosa (Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica), dentro del bioma de bosque tropical seco caducifolio mesoamericano (Fig. 1). Se analizaron tres ambientes representativos con diferente disponibilidad hídrica y fisiografía: (i) sector costero próximo a Playa Naranjo, (ii) valles interiores de la Hacienda Santa Rosa y (iii) meseta ignimbrítica en el sector nordeste del parque. Estos ambientes presentan un marcado régimen estacional seco-húmedo, con una estación seca prolongada y una rápida transición hidrológica al inicio de las lluvias.

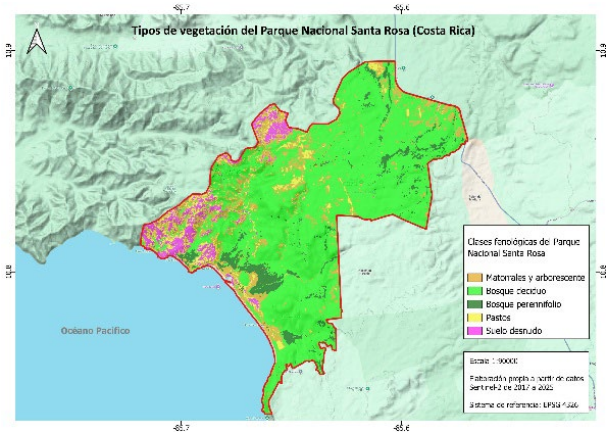


Figura 1. Área de estudio en el Parque Nacional Santa Rosa (Costa Rica).

2.2 Datos SAR Sentinel-1

Se utilizaron imágenes Sentinel-1 GRDH en banda C correspondientes al periodo 2017–2025, con polarizaciones VV y VH y órbitas ascendente y descendente. La señal fue calibrada a retrodispersión γ^0 en dB y extraída como media espacial sobre 60 parcelas homogéneas representativas de los tres ambientes de estudio. Las series temporales se suavizaron para reducir la variabilidad de corto plazo y se transformaron a ciclo anual plegado (DOY), permitiendo obtener una curva estacional media independiente del año. A partir de las polarizaciones VV y VH se calcularon índices diferenciales (VV−VH, VH−VV) para analizar la contribución relativa de mecanismos dieléctricos y estructurales. El flujo de trabajo seguido para el procesado de las series temporales y la derivación de métricas ecohidrológicas se muestra en la Figura 2.

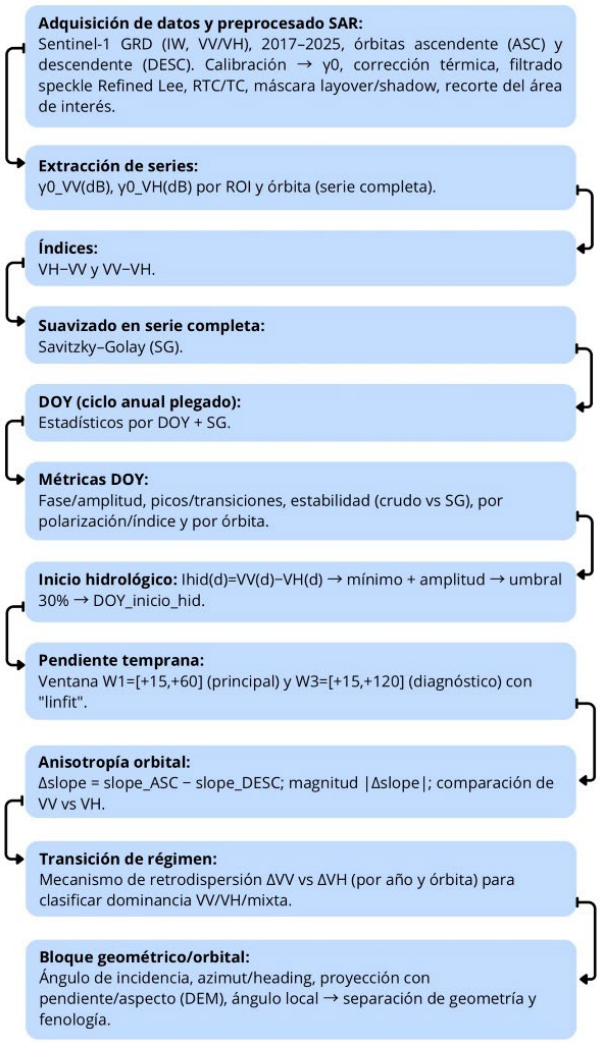


Figura 2. Flujo de trabajo para el análisis de series temporales SAR y derivación de métricas ecohidrológicas.

2.3 Creación de series temporales y métricas derivadas

Se definieron métricas temporales a partir de la dinámica de las curvas DOY con el objetivo de identificar transiciones en el régimen de retrodispersión. Entre ellas se incluyen el mínimo seco, el inicio hidrológico funcional (definido como el primer momento en que el índice VV−VH supera el 30% de su amplitud anual), las pendientes tempranas tras dicho inicio y la presencia de máximos locales.

Para analizar la estacionalidad media se transformaron las series multianuales a un ciclo anual plegado (DOY). Cada observación se asignó a su día del año (1-365) y se calcularon estadísticos por DOY obteniendo una curva anual representativa del comportamiento medio del ecosistema.

Adicionalmente, se evaluó la anisotropía entre órbitas ascendente y descendente mediante la comparación de las pendientes temporales, con el fin de detectar dependencias de la geometría de observación. Estas métricas permiten analizar cambios en los mecanismos

de dispersión radar más allá de valores absolutos, centrándose en la forma y evolución de la señal.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ciclo anual plegado permitió identificar, en el sector costero (playa Naranjo) un patrón ecohidrológico recurrente y reproducible, caracterizado por una rápida respuesta dieléctrica posterior a la recarga hídrica anual tras el inicio de las lluvias de abril. Se pudieron diferenciar sectores con mayor capacidad de almacenamiento hídrico interno mediante la persistencia de la señal dieléctrica tras el inicio de las lluvias, en el interior (Hacienda Santa Rosa).

Las curvas de ciclo anual plegado (DOY) muestran patrones estacionales consistentes en los tres ambientes analizados, con una clara respuesta tras el inicio de las lluvias asociada a cambios dieléctricos del suelo y del dosel. Sin embargo, se observan diferencias notables entre polarizaciones y órbitas. En la figura 3 se muestra las curvas DOY en polarización VH, donde se aprecia un comportamiento relativamente homogéneo entre ambientes, dominado por procesos de atenuación volumétrica.

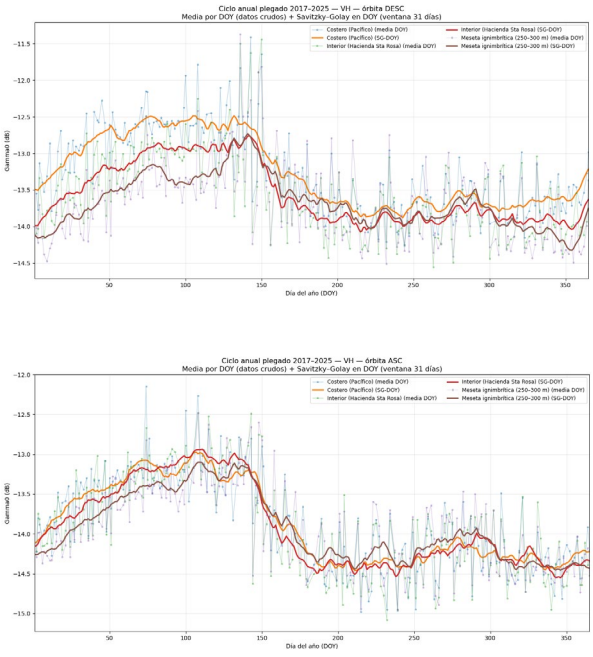


Figura 3. Ciclo anual plegado (DOY) de la retrodispersión en polarización VH para los tres ambientes analizados.

Por el contrario, en la figura 4, correspondiente a la polarización VV, se presenta una mayor variabilidad y sensibilidad a la geometría de observación, especialmente durante las fases iniciales del reverdecimiento.

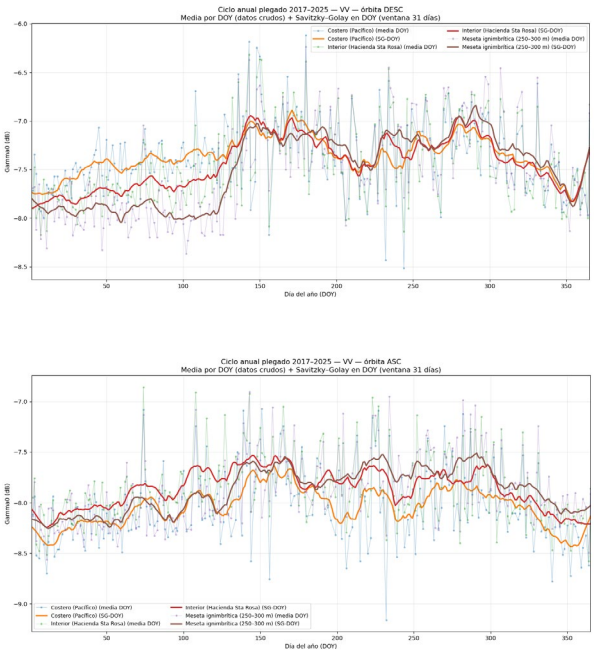


Figura 4. Ciclo anual plegado (DOY) de la retrodispersión en polarización VV para los tres ambientes analizados.

Las diferencias entre órbitas ascendente (ASC) y descendente (DESC) evidencian una fuerte anisotropía en la señal, lo que indica que la retrodispersión está condicionada por la interacción entre el estado hídrico del sistema y la geometría de observación. Esta anisotropía se manifiesta en cambios en las pendientes temporales y en la posición de los máximos de señal.

La ausencia de máximos consistentes entre polarizaciones y órbitas sugiere que los picos de retrodispersión no pueden interpretarse como eventos fenológicos estructurales. En su lugar, la señal refleja transiciones entre diferentes mecanismos de dispersión, incluyendo doble rebote suelo–tronco y atenuación volumétrica del dosel húmedo.

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la señal de retrodispersión de Sentinel-1 en bosque tropical seco está dominada por el régimen eco-hidrológico y su interacción con la geometría de observación, más que por cambios estructurales directamente asociados a la fenología vegetal.

Se observa una fuerte anisotropía entre órbitas ascendente y descendente, así como diferencias entre polarizaciones, lo que indica que la señal radar responde a la coexistencia de múltiples mecanismos de dispersión dependientes del estado hídrico del sistema.

La ausencia de máximos consistentes en DOY entre órbitas y polarizaciones evidencia que los picos de retrodispersión no pueden interpretarse como eventos fenológicos robustos.

Se propone un criterio operativo para la interpretación de series temporales SAR; un evento fenológico debe

ser simultáneamente estable en DOY, independiente de la órbita y coherente entre polarizaciones.

Este enfoque permite evitar interpretaciones ecológicas erróneas y proporciona una base metodológica replicable para el análisis fenológico mediante radar en ecosistemas tropicales estacionales.

5. AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte de los estudios doctorales del primer autor, y pudo realizarse gracias al apoyo del proyecto Tecnologías en Ciencias del Patrimonio (TEC Heritage-CM, TEC-2024 / TEC-39) financiado por la convocatoria Tecnologías 2024 de la Comunidad Autónoma de Madrid (España). La investigación fue posible gracias a la participación de Joaquín Escayo Menéndez, de la Universidad Politécnica de Madrid. También fue esencial el apoyo del IUCA (*Instituto de Investigación en Ciencias Ambientales* de la Universidad de Zaragoza) y del grupo de investigación GEOFOREST, de la Universidad de Zaragoza. Finalmente los autores agradecen la colaboración del Área de Conservación Guanacaste (Costa Rica) y particularmente de su director, Roger Blanco Segura.

6. REFERENCIAS

Doblas, J., Carneiro, A., Shimabukuro, Y., Sant'Anna, S., Aragão, L., & Pereira, F. R. S. (2020). Stabilization of Sentinel-1 SAR time-series using climate and forest structure data for early tropical deforestation detection. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, V-3*, 89-96. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-89-2020

Kong, D., McVicar, T. R., Xiao, M., Zhang, Y., Peña-Arancibia, J. L., Filippa, G., Xie, Y., & Gu, X. (2022). Phenofit: An R package for extracting vegetation phenology from time series remote sensing. *Methods in Ecology and Evolution, 13*(7), 1508–1527. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13870

Schlund, Michael. (2025). Potential of Sentinel-1 time-series data for monitoring the phenology of European temperate forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 223*, 131-145. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.02.026

Soudani, K., Delpierre, N., Berveiller, D., Hmimina, G., Vincent, G., Morfín, A., & Dufrêne, É. (2021). Potential of C-band Synthetic Aperture Radar Sentinel-1 time-series for the monitoring of phenological cycles in a deciduous forest. International *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 104*, 102505. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102505

Rüetschi, M., Schaepman, M. E., & Small, D. (2018). Using multitemporal Sentinel-1 C-band backscatter to monitor phenology and classify deciduous and coniferous forests in northern Switzerland. *Remote Sensing, 10*(1), 55. https://doi.org/10.3390/rs10010055

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.199

Validación de mediciones dendrométricas y de volumen con dron bajo copa y dron sobre copa en masas de Pinus sylvestris

Martinez-Rodrigo, Raquel [1] **Sabin, Pablo** [1] **Garcia, Carlos** [2] **Blázquez-Casado, Ángela** [1]

[1] Cesefor, España

[2] Carlibur, Esapaña

ORCID: Martinez-Rodrigo 0000-0002-4277-398X Sabin 0000-0002-1397-7887 Blázquez-Casado 0000-0003-2611-9176

Correspondencia: raquel.martinez@cesefor.com pablo.sabin@cesefor.com carlos.garcia@carlibur.es angela.blazquez@cesefor.com

RESUMEN

La obtención eficiente de variables dendrométricas (diámetro normal, altura y volumen) es esencial para la planificación selvícola, la evaluación de existencias y el seguimiento del crecimiento en masas forestales. Este trabajo evalúa el potencial de un sistema UAV equipado con LiDAR para operar bajo copa, capaz de geolocalizar árboles, estimar el diámetro normal (DBH) a 1,30 m y calcular volumen a partir de nubes de puntos de alta densidad. El estudio se realizó en un rodal de Pinus sylvestris en Soria (España), donde se establecieron 11 parcelas circulares (radio 14,1 m) y se inventariaron 442 pies, midiendo DBH y altura en campo y calculando el volumen mediante ecuaciones de cubicación. El dron bajo copa detectó de forma inequívoca 397 árboles de los medidos, y el vuelo sobre copas permitió identificar 239 árboles coincidentes. Los DBH derivados del dron bajo copa mostraron una relación elevada con las mediciones de campo (R^2 = 0,895). Las alturas obtenidas desde el vuelo sobre copa presentaron alta concordancia con el campo (R^2 = 0,863). En términos de volumen, la estimación directa desde el dron bajo copa fue de 89,75 m^3 frente a 99,53 m^3 en campo (236 árboles). Sin embargo, la combinación de DBH bajo copa y alturas sobre copa, aplicando ecuaciones de cubicación mostró un ajuste perfecto (98,12 m^3), mostrando una diferencia de 1,41 m^3. Los resultados evidencian que la integración de vuelos bajo y sobre copa muestra una precisión muy elevada en la estimación de volumen. Por tanto, la ejecución de los trabajos de cubicación con una combinación de vuelos sobre y bajo copa puede reducir considerablemente los tiempos y costes

Palabras clave: *LiDAR; UAV; vuelo bajo copa; estimación de DBH; Volumen*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Validación de mediciones dendrométricas y de volumen con dron bajo copa y dron sobre copa en masas de Pinus sylvestris

Martinez-Rodrigo, Raquel [(1)], Sabin, Pablo [(1)], Garcia, Carlos [(2)], Blázquez-Casado, Ángela [(1)]

[(1)] Cesefor, España.

0000-0002-4277-398X, raquel.martinez@cesefor.com ; 0000-0002-1397-7887, pablo.sabin@cesefor.com.

0000-0003-2611-9176, angela.blazquez@cesefor.com.

[(3)] Carlibur, Esapaña.

carlos.garcia@carlibur.es.

Resumen: La obtención eficiente de variables dendrométricas (diámetro normal, altura y volumen) es esencial para la planificación selvícola, la evaluación de existencias y el seguimiento del crecimiento en masas forestales. Este trabajo evalúa el potencial de un sistema UAV equipado con LiDAR para operar bajo copa, capaz de geolocalizar árboles, estimar el diámetro normal (DBH) a 1,30 m y calcular volumen a partir de nubes de puntos de alta densidad. El estudio se realizó en un rodal de *Pinus sylvestris* en Soria (España), donde se establecieron 11 parcelas circulares (radio 14,1 m) y se inventariaron 442 pies, midiendo DBH y altura en campo y calculando el volumen mediante ecuaciones de cubicación. El dron bajo copa detectó de forma inequívoca 397 árboles de los medidos, y el vuelo sobre copas permitió identificar 239 árboles coincidentes. Los DBH derivados del dron bajo copa mostraron una relación elevada con las mediciones de campo (R^2 = 0,895). Las alturas obtenidas desde el vuelo sobre copa presentaron alta concordancia con el campo (R^2 = 0,863). En términos de volumen, la estimación directa desde el dron bajo copa fue de 89,75 m^3 frente a 99,53 m^3 en campo (236 árboles). Sin embargo, la combinación de DBH bajo copa y alturas sobre copa, aplicando ecuaciones de cubicación mostró un ajuste perfecto (98,12 m^3), mostrando una diferencia de 1,41 m^3. Los resultados evidencian que la integración de vuelos bajo y sobre copa muestra una precisión muy elevada en la estimación de volumen. Por tanto, la ejecución de los trabajos de cubicación con una combinación de vuelos sobre y bajo copa puede reducir considerablemente los tiempos y costes.

Palabras clave: LiDAR; UAV; vuelo bajo copa; estimación de DBH; Volumen

Validation of dendrometric and volume measurements using under-canopy and over-canopy drones in Pinus sylvestris stands

***Abstract**: The efficient collection of dendrometric variables (diameter at breast height, height, and volume) is essential for forest planning, stock assessment, and growth monitoring in forest stands. This study evaluates the potential of a LiDAR-equipped UAV system to operate under canopy, capable of geolocating trees, estimating diameter at breast height (DBH) at 1.30 m, and calculating volume from high-density point clouds. The study was conducted in a Pinus sylvestris stand in Soria (Spain), where 11 circular plots (radius 14.1 m) were established and 442 trees were inventoried, measuring DBH and height in the field and calculating volume using cubing equations. The under-canopy drone unequivocally detected 397 of the trees measured, and the over-canopy flight identified 239 matching trees. The DBH derived from the under-canopy drone showed a high correlation with the field measurements (R^2 = 0.895). The heights obtained from the over-canopy flight showed high agreement with the field (R^2 = 0.863). In terms of volume, the direct estimate from the under-canopy drone was 89.75 m^3 compared to 99.53 m^3 in the field (236 trees). However, the combination of DBH under canopy and heights above canopy, applying cubing equations, showed a perfect fit (98.12 m^3), with a difference of 1.41 m^3. The results show that the integration of under-canopy and over-canopy flights shows very high accuracy in volume estimation. Therefore, performing cubing work with a combination of over-canopy and under-canopy flights can significantly reduce time and costs.*

***Keywords:** LiDAR; UAV; under-canopy surveying; DBH estimation; LiDAR; UAV; vuelo bajo copa; estimación de DBH; Volume.*

1. INTRODUCCIÓN

La obtención rápida de variables dendrométricas como el diámetro normal, la altura y el volumen es un requisito clave para planificar cortas, evaluar existencias en masas forestales, el seguimiento del crecimiento y evaluación económica y ambiental de las masas forestales. Para ello, los inventarios tradicionales basados en parcelas y mediciones manuales requieren de un esfuerzo elevado de tiempo y personal. Además, la densidad de muestreo suele ser limitada, especialmente en rodales complejos o de difícil acceso. Para ello la teledetección ha impulsado metodologías cada vez más eficientes (Torres-Rojas *et al*., 2017), como la tecnología LiDAR que puede estimar eficazmente estas variables (Sánchez Alberola *et al*., 2018), evitando los costes de mediciones manuales. Aunque la estimación detallada de la geometría del fuste sigue siendo un reto cuando se trabaja únicamente con datos captados desde arriba.

En los últimos años, la tecnología LiDAR se está empleando en todas sus variantes (aéreo, terrestre y móvil) para múltiples aplicaciones (Beland *et al*., 2019) y en particular el LiDAR terrestre (TLS) proporciona gran detalle sobre las características del dosel inferior y por lo tanto del fuste (Martínez-Rodrigo *et al*., 2022). Así mismo, se ha equipado con tecnología LiDAR, un dron para volar bajo las copas de la masa forestal para caracterizar el árbol a escala individual, generando nubes de puntos de alta densidad que permiten derivar diámetros normales y variables dendrométricas con un detalle difícil de alcanzar con los vuelos convencionales sobre copas. Además, el muestreo bajo copa puede reducir significativamente los tiempos de trabajo de campo y los costes operativos, manteniendo al mismo tiempo la trazabilidad y repetibilidad necesarias para tareas de seguimiento, tanto los costes de posicionamiento del TLS (Greco *et al*., 2023).

No obstante, el empleo de un dron bajo copa presenta limitaciones importantes en la navegación a través de entornos forestales cerrados, por la oclusión por ramas y vegetación. Además, también existen limitaciones en la reconstrucción de la altura total del árbol, ya que la captura desde el interior del dosel no siempre incluye el ápice. Una potencial estrategia para superar este problema es combinar la información detallada del fuste obtenida bajo copa con un vuelo adicional sobre copa, que aporte una referencia completa de la coronación y permita estimar la altura total con mayor robustez (Reyes-Zurita *et al*., 2022). La integración de ambas perspectivas —interna y superior— mejora la consistencia de las variables derivadas y su utilidad para cálculos de volumen y existencias.

Con este planteamiento, el presente trabajo valida, frente a las mediciones de campo, las estimaciones obtenidas mediante un dron que opera bajo copa para la caracterización de la geometría del fuste a nivel de árbol individual, y evalúa la ganancia de precisión al incorporar un vuelo complementario sobre copa para la estimación de la altura total. El objetivo es cuantificar la fiabilidad de estas métricas en condiciones reales de inventario y valorar el potencial de un flujo de trabajo combinado que reduzca esfuerzo y costes sin comprometer la calidad de la información necesaria para la planificación selvícola y evaluación de recursos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Este trabajo se llevó a cabo en un rodal de 50 ha, ocupado por una masa de *Pinus sylvestris* en estado de fustal bajo, situado en la provincia de Soria (España). La masa había sido objeto de una primera clara y se localiza en una zona de escasa pendiente.

2.2. Trabajo de campo

Para la realización del trabajo de campo, se establecieron 11 parcelas circulares de radio 14,10 m (Figura 1). El centro de cada parcela se levantó con GPS submétrico y los árboles se georreferenciaron por rumbo y distancia al centro de la parcela. Para cada pie se midieron dos diámetros perpendiculares a 1,30 m (DBH) y la altura con hipsómetro Vertex. En total se inventariaron 442 pies. El volumen se calculó mediante las ecuaciones de cubicación para *Pinus sylvestris* publicadas en del Río *et al*., (2006) (Figura 2).

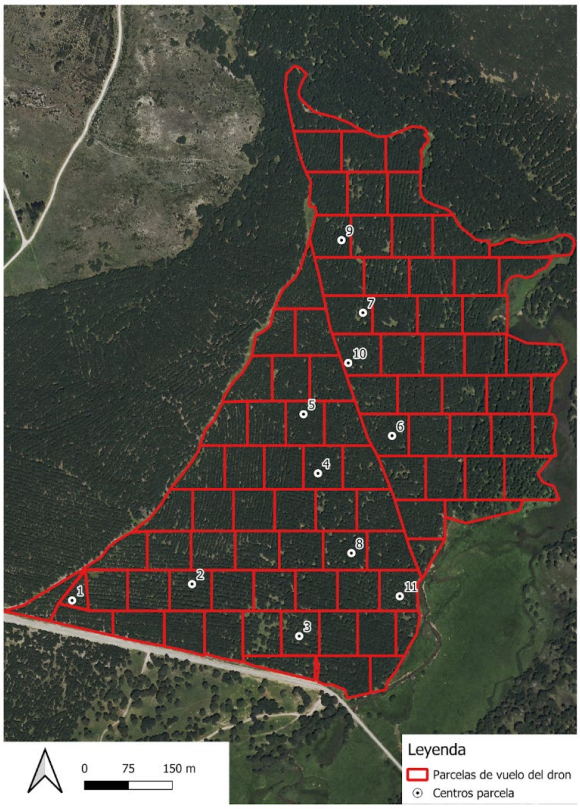


Figura 1. Posicionamiento de las parcelas de muestreo en el área de trabajo.

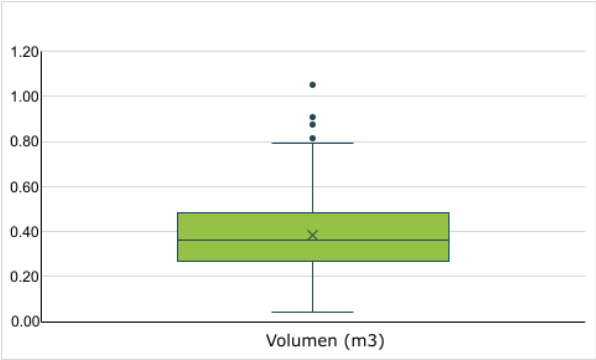


Figura 2. Distribución del volumen estimado por árbol individual

2.3. Dron bajo copa

El dron bajo copa geolocalizó cada pie, midió el diámetro del árbol cada 5 cm del cilindro de este desde la base (Figura 3) y calculó el volumen del fuste a partir de la nube de puntos. El volumen se estimó sobre el cilindro del árbol hasta un diámetro mínimo en punta delgada configurable (madera de sierra).

Para el diseño del vuelo del dron bajo copas se realizaron 25 parcelas de 0,50 has (Figura 1) garantizando el vuelo completo de todo el rodal.

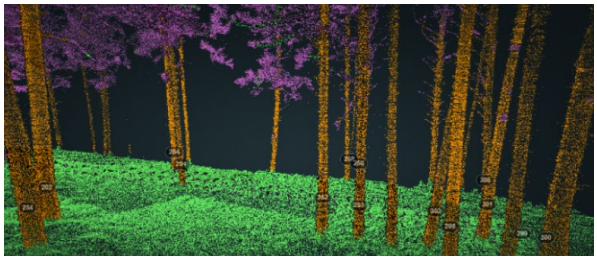


Figura 3. Nube de puntos del dron bajo copa con medición de diámetros.

2.4. Dron sobre copa e integración de datos

Para mejorar la estimación de la altura total se realizó el vuelo sobre copas, a partir del cual se individualizaron los pies y se derivaron alturas por árbol. Los árboles se emparejaron entre fuentes (campo, dron bajo copa y dron sobre copa) mediante su posición y correspondencia inequívoca.

3. RESULTADOS

3.1. Detección y emparejamiento de árboles

Se detectaron de manera inequívoca 397 árboles con el dron bajo copa de los 422 medidos en campo. En el vuelo sobre copas se identificaron 239 árboles coincidentes con los medidos y georreferenciados.

3.2. Diámetro normal (DBH)

Los diámetros derivados del dron tendieron a ser ligeramente superiores a los medidos en campo (Figura 4). La relación entre ambas mediciones para 397 árboles presentó un coeficiente de determinación R^2=0,89 (Figura 5).

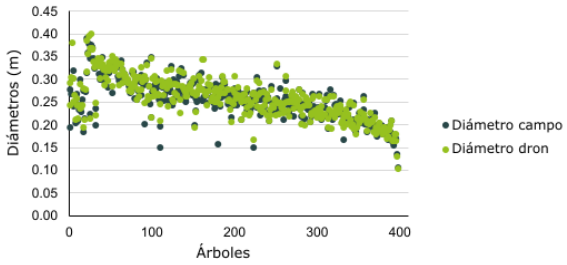


Figura 4. Diámetros comparados para los 397 árboles.

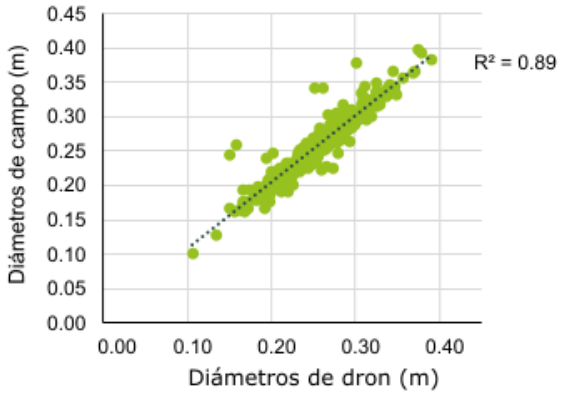


Figura 5. Relación entre diámetros medidos en campo y por el dron (procesado inicial).

3.3. Altura total

Las alturas obtenidas con el dron sobre copas mostraron alta concordancia con las mediciones en campo de los 239 árboles (R^2=0,86) (Figura 6), con pocas excepciones atribuibles a la forma del pie o a la complejidad de copa.

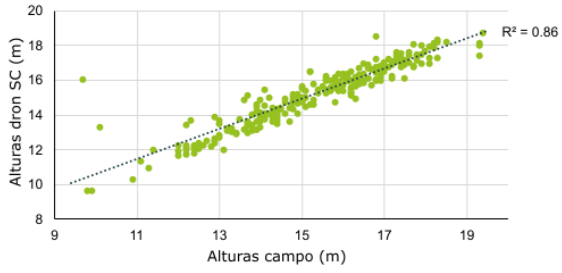


Figura 6. Relación de alturas medidas en campo y derivadas del dron sobre copas.

3.4. Volumen

El volumen estimado exclusivamente con el dron bajo copa presentó 89,75 m³ frente a 99,53 m³ calculados con datos de campo en 236 árboles, con una diferencia de 9,78 m³. Al combinar diámetros del dron bajo copa con alturas del dron sobre copas y aplicar las ecuaciones de del Río *et al*., (2006), para 236, se estimaron 98,12 m³, con una diferencia de 1,41 m³. (Figura 7)

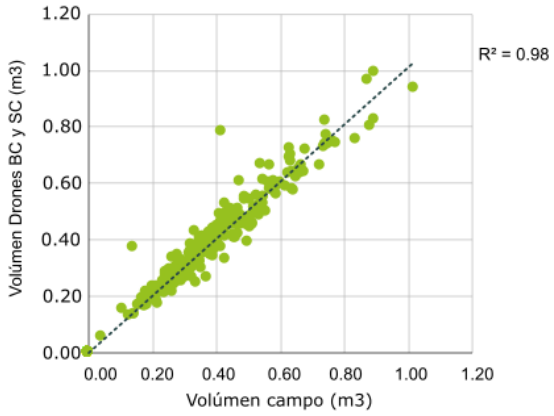


Figura 7. Relación de volúmenes estimados en campo y con drones (altura sobre copa + DBH bajo copa).

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que el uso de sistemas UAV bajo copa permitió obtener mediciones de diámetro normal (DBH) con una precisión elevada (R^2=0,90), validando su capacidad para la caracterización detallada de la geometría del fuste a nivel individual. Sin embargo, la estimación del volumen total del fuste presentó limitaciones cuando se empleó únicamente la perspectiva bajo copa, debido principalmente a la dificultad de capturar de forma completa la altura sobre todo a partir de las primeras ramas. Esta limitación técnica se superó eficazmente mediante la integración de datos de vuelos sobre copa, los cuales aportaron una referencia robusta de la altura total (R^2=0,86). La combinación de ambos sensores permitió reducir la diferencia en la estimación de volumen a tan solo 1,41 m^3 respecto a los datos de campo. Este ajuste casi perfecto demuestra que el flujo de trabajo combinado no solo es viable, sino que proporciona una fiabilidad equiparable o incluso superior a los inventarios tradicionales.

En relación con la precisión de los datos, es fundamental considerar que las mediciones manuales de campo no están exentas de sesgos humanos. El sistema LiDAR del dron ofrece una mayor repetibilidad y trazabilidad, aunque se debe tener en cuenta que al aplicar ecuaciones de cubicación externas se introduce el error inherente al propio modelo alométrico. No obstante, las reducidas desviaciones observadas afianzaron la utilidad de esta tecnología en el sector forestal.

Desde una perspectiva operativa, esta metodología supone una optimización significativa de los trabajos de campo, especialmente en condiciones donde el sotobosque denso o terrenos de difícil acceso (como áreas inundadas) dificultan el tránsito humano. La capacidad de generar nubes de puntos de alta densidad abre la puerta a aplicaciones avanzadas como el señalamiento automatizado y la integración directa con maquinaria forestal (procesadoras y autocargadores). Este avance permitiría cerrar el ciclo de gestión digital, asegurando la trazabilidad del producto bajo marcos regulatorios exigentes como la normativa europea EUDR.

5. CONCLUSIONES

La integración de sistemas UAV bajo y sobre copa constituye una metodología precisa y eficiente para la caracterización dendrométrica de masas forestales, permitiendo superar las limitaciones detectadas en la estimación del volumen. Este enfoque optimiza significativamente los tiempos y costes de inventario, especialmente en condiciones de difícil acceso. Futuros trabajos deberán centrarse en la automatización del proceso completo y la mejora de los algoritmos de individualización para facilitar la gestión forestal digital.

6. REFERENCIAS

Beland, M., Parker, G., Sparrow, B., Harding, D., Chasmer, L., Phinn, S., Antonarakis, A., & Strahler, A. (2019). On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research. *Forest Ecology and Management, 450*, 117484. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117484

Greco, R., Barca, E., Raumonen, P., Persia, M., & Tartarino, P. (2023). Methodology for measuring dendrometric parameters in a mediterranean forest with UAVs flying inside forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 122*, 103426. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103426

Martínez-Rodrigo, R., Gómez, C., Toraño-Caicoya, A., Bohnhorst, L., Uhl, E., & Águeda, B. (2022). Stand Structural Characteristics Derived from Combined TLS and Landsat Data Support Predictions of Mushroom Yields in Mediterranean Forest. *Remote Sensing, 14*(19), 5025. https://doi.org/10.3390/rs14195025

Reyes-Zurita, N., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-Del Valle, J. R., Jiménez-Colmenares, C. L., & Rincón-Ramírez, J. A. (2022). Estimación de variables dasométricas en rodales bajo manejo forestal con vehículos aéreos no tripulados. FIGEMPA: *Investigación y Desarrollo, 13*(1), 22-31. https://doi.org/10.29166/revfig.v13i1.3299

del Río, M., López, E., & Montero, G. (2006). Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de Pinus pinaster Ait., Pinus sylvestris L. y Pinus nigra en Castilla y León. Junta de Castilla y León.

Sánchez Alberola, J., Oliver, P., Estornell, J., & Dopazo, C. (2018). Estimación de variables forestales de Pinus sylvestris L. en el contexto de un inventario forestal aplicando tecnología LiDAR aeroportada. GeoFocus *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 79-99. https://doi.org/10.21138/GF.509

Torres-Rojas, G. T.-R., Romero-Sánchez, M. E., Velasco-Bautista, E., & González-Hernández, A. (2017). Estimación de parámetros forestales en bosques de coníferas con técnicas de percepción remota. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 7*(36), 7-24. https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i36.56

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.200

Seguimiento de servicios ecosistémicos en agrosistemas mediterráneos integrando teledetección

Muñoz-Gómez, M.José [1] **carbonero, M.Dolores** [1] **Calbet, Ana** [1] **Garcia-Moreno, Alma M.** [1] **Villanueva, Anastasio J.** [2] **González-Dugo, M.Pat.** [1]

[1] Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA, 14071 (Córdoba)

[2] Dpto. Economía de la Cadena Alimentaria, IFAPA, 18071 (Granada)

ORCID: Muñoz-Gómez 0000-0003-3444-2459 carbonero 0000-0003-2301-4301 Calbet 0000-0002-2665-4921 Villanueva 0000-0002-1384-8372 González-Dugo 0000-0003-0423-8246

Correspondencia: maria.munoz.gomez@juntadeandalucia.es mariad.carbonero@juntadeandalucia.es ana.calbet@juntadeandalucia.es alma.garcia@juntadeandalucia.es anastasioj.villanueva@juntadeandalucia.es mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es

RESUMEN

Los agrosistemas mediterráneos proporcionan múltiples servicios ecosistémicos cuya valoración en las políticas agrarias requiere indicadores operativos y escalables. Este trabajo analiza las sinergias entre varios servicios ecosistémicos en el olivar tradicional y la dehesa del sur de España, mediante mediciones de campo, modelado y sensores remotos. Empleando la producción de biomasa, estimada a partir de información meteorológica y datos de Sentinel-2, como variable de referencia, se han analizado las relaciones espaciotemporales con la biodiversidad de aves y reptiles, el carbono orgánico del suelo, la protección frente a la erosión y la valoración del paisaje. Los resultados muestran asociaciones consistentes en el olivar, mientras que en la dehesa dichas relaciones están moduladas por la mayor complejidad estructural del ecosistema. En términos generales, se ha contrastado la eficacia de la producción de biomasa herbácea, medible mediante sensores remotos, como indicador integrador y operativo para el seguimiento de varios servicios ecosistémicos en paisajes agrarios mediterráneos.

Palabras clave: *servicios ecosistémicos, agrosistemas mediterráneos, teledetección, políticas agrarias*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Seguimiento de servicios ecosistémicos en agrosistemas mediterráneos integrando teledetección

Muñoz-Gómez, M.José [(1)], carbonero, M.Dolores [(1)], Calbet, Ana [(1)], Garcia-Moreno, Alma M. [(1)], Villanueva, Anastasio J. [(2)], González-Dugo, M.Pat. [(1)]

[(1)] Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA (Córdoba).
0000-0003-3444-2459, maria.munoz.gomez@juntadeandalucia.es
0000-0003-2301-4301, mariad.carbonero@juntadeandalucia.es
0000-0002-2665-4921, ana.calbet@juntadeandalucia.es
alma.garcia@juntadeandalucia.es
0000-0003-0423-8246, mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es

[(2)] Dpto. Economía de la Cadena Alimentaria, IFAPA (Granada).
0000-0002-1384-8372, anastasioj.villanueva@juntadeandalucia.es

Resumen: Los agrosistemas mediterráneos proporcionan múltiples servicios ecosistémicos cuya valoración en las políticas agrarias requiere indicadores operativos y escalables. Este trabajo analiza las sinergias entre varios servicios ecosistémicos en el olivar tradicional y la dehesa del sur de España, mediante mediciones de campo, modelado y sensores remotos. Empleando la producción de biomasa, estimada a partir de información meteorológica y datos de Sentinel-2, como variable de referencia, se han analizado las relaciones espaciotemporales con la biodiversidad de aves y reptiles, el carbono orgánico del suelo, la protección frente a la erosión y la valoración del paisaje. Los resultados muestran asociaciones consistentes en el olivar, mientras que en la dehesa dichas relaciones están moduladas por la mayor complejidad estructural del ecosistema. En términos generales, se ha contrastado la eficacia de la producción de biomasa herbácea, medible mediante sensores remotos, como indicador integrador y operativo para el seguimiento de varios servicios ecosistémicos en paisajes agrarios mediterráneos.

Palabras clave: servicios ecosistémicos, agrosistemas mediterráneos, teledetección, políticas agrarias

Monitoring ecosystem services in Mediterranean agroecosystems through remote sensing integration

***Abstract**: Mediterranean agroecosystems provide multiple ecosystem services, the integration of which into agricultural policies requires operational and scalable indicators. This study analyzes the synergies among ecosystem services in traditional olive groves and dehesas in southern Spain, using field measurements and remote-sensing data. Biomass production, estimated from meteorological and Sentinel-2 data, was used as a reference variable to analyze the spatiotemporal relationships with bird and reptile biodiversity, soil organic carbon, erosion protection, and landscape valuation. The results show consistent associations in olive groves, whereas in the dehesa, these relationships are modulated by the ecosystem's greater structural complexity. Overall, the effectiveness of herbaceous biomass production, as measured by remote sensing, has been assessed as an integrative and operational indicator for monitoring various ecosystem services in Mediterranean agricultural landscapes.*

***Keywords**: ecosystem services, Mediterranean agroecosystems, remote sensing, agricultural policies*

1. INTRODUCCIÓN

La provisión de servicios ecosistémicos (SE) por los agrosistemas es un objetivo central de las políticas agrarias europeas, en las que la producción de alimentos debe compatibilizarse con la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático. Este enfoque se refleja en la Política Agraria Común (PAC), que ha incorporado objetivos de sostenibilidad mediante los esquemas agroambientales. Sin embargo, su aplicación tradicional, basada en el control de prácticas genéricas de manejo, ha mostrado una eficacia limitada, debido a su escasa adaptación a los contextos locales y a la débil relación entre las acciones aplicadas y los resultados ambientales obtenidos. En respuesta a estas limitaciones, los esquemas agroambientales basados en el seguimiento de resultados han cobrado relevancia al vincular los pagos directamente con la provisión de SE, lo que ofrece mayor flexibilidad a los agricultores. No obstante, su aplicación requiere indicadores que permitan cuantificar y monitorizar los SE de forma

objetiva, a gran escala y a coste eficiente en agrosistemas heterogéneos.

En este contexto, la teledetección satelital se ha consolidado como una herramienta clave para el seguimiento de variables biofísicas relacionadas con el funcionamiento de los ecosistemas agrarios. Entre ellas, la biomasa herbácea o producción primaria neta aérea destaca por su estrecha relación con la productividad, el secuestro de carbono, la protección del suelo y la disponibilidad de hábitats, lo que le confiere un elevado potencial como indicador integrador de múltiples SE.

Este estudio se centra en dos agrosistemas mediterráneos de alto valor natural del sur de España, el olivar tradicional y la dehesa, caracterizados por una estructura agroforestal y una cubierta herbácea estacional. Ambos sistemas presentan una elevada multifuncionalidad, pero difieren en su complejidad estructural y en la respuesta de los SE al manejo, lo que los convierte en un marco idóneo para analizar sinergias entre diversos servicios ecosistémicos y las opciones para su seguimiento. El objetivo de este trabajo es analizar estas sinergias en olivares y dehesa mediterráneos a partir de estimaciones de biomasa herbácea obtenidas mediante teledetección, integrando información sobre biodiversidad, carbono orgánico del suelo, protección frente a la erosión y valoración del paisaje, y evaluar su potencial como indicador operativo para esquemas agroambientales basados en resultados.

2. METODOLOGÍA

2.1. Zona de estudio

El estudio se ha desarrollado en el norte de la provincia de Córdoba, en áreas representativas de olivar tradicional en pendiente y dehesa (Fig. 1a), seleccionadas para cubrir un gradiente de condiciones ambientales y de manejo, durante el periodo comprendido entre 2021 y 2023. En total, se estudiaron seis fincas de cada sistema. En el caso del olivar, las fincas presentaron una superficie media de 16 ha (9-27 ha), mientras que en dehesa fue de 118 ha (22-258 ha). Todas ellas están caracterizadas por una estructura de árboles dispersos, en algunos casos acompañados de matorral de escaso porte, y por una cubierta herbácea estacional. En dehesa, las fincas se agruparon en grupos de manejo (1, 2 y 3, dos fincas por grupo), de mayor a menor grado de intensificación, mientras que en olivar se diferenciaron parcelas con y sin cubierta herbácea.

2.2. Estimación de biomasa mediante teledetección

La biomasa herbácea se estimó a partir de datos del satélite Sentinel-2 mediante un modelo basado en la eficiencia de uso de la luz (LUE), originalmente propuesto por Monteith (1977) para cultivos agrícolas. Este modelo permite estimar la producción primaria neta aérea (AGB above-ground biomass) a partir de la radiación absorbida por la vegetación y de variables meteorológicas, integrando la contribución del estrato herbáceo y minimizando la interferencia del arbolado (previamente adaptado a zonas mediterráneas de olivar y dehesa). El análisis cubrió el periodo del 01/09/2020 al 31/08/2023, en el que se emplearon 420 imágenes Sentinel-2 MSI Nivel-2A de la colección S2_HR_HARMONIZED, distribuidas en dos escenas. Los detalles completos sobre la aplicación, calibración y validación del modelo pueden consultarse en trabajos previos (Gómez-Giráldez *et al*., 2019; Blázquez-Carrasco *et al*., 2021; Muñoz-Gómez *et al*., 2024).

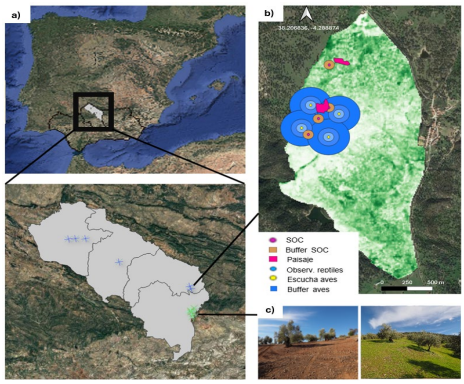


Figura 1. a) Localización de las parcelas de olivar (verde) y dehesa (azul); b) Distribución de las medidas realizadas en una finca piloto de dehesa; c) Ejemplo de olivares con diferentes manejos, con y sin mantenimiento de la cubierta herbácea.

2.3. Servicios ecosistémicos analizados

Las medidas de campo realizadas incluyeron variables relacionadas con la biodiversidad, la producción de biomasa, el carbono orgánico del suelo (SOC) y el paisaje. Metodología descrita en el libro de actas del XX Congreso de la Asociación Española de Teledetección (González-Dugo *et al*., 2024). A continuación, se presenta un breve resumen: **Producción de biomasa**, considerada un servicio de aprovisionamiento y estimada mediante teledetección a partir de la producción primaria neta aérea del estrato herbáceo. **Biodiversidad**, evaluada a partir de aves y reptiles como grupos indicadores, debido a su sensibilidad a los cambios en la estructura del hábitat y al manejo de la cubierta herbácea. **Carbono orgánico del suelo** (SOC), determinado mediante muestreos de suelo a distintas profundidades, como indicador del potencial de secuestro de carbono asociado a la entrada de biomasa en el sistema. **Protección del suelo**, evaluada a partir de la presencia y continuidad de la cubierta herbácea mediante teledetección, considerando su efecto en la reducción del riesgo de erosión. **Paisaje**, analizado mediante encuestas a la población general basadas en fotografías representativas de los sistemas estudiados, con el fin de capturar la valoración social asociada a diferentes niveles de cobertura vegetal (Win *et al*., 2025).

2.4. Análisis de sinergias

La relación entre la biomasa herbácea estimada por teledetección y los distintos servicios ecosistémicos evaluados en campo se analizó mediante un enfoque de correspondencia espacial entre las mediciones de cada indicador y las estimaciones satelitales. Dado que los servicios ecosistémicos operan a distintas escalas espaciales, la biomasa se agregó en zonas de influencia definidas en torno a las unidades de muestreo (Fig. 1b). Para el carbono orgánico en suelo (SOC), la biomasa se

promedió en un *buffer* de 50 m alrededor de los puntos de muestreo. En el caso de los reptiles, también se utilizó un *buffer* de 50 m que cubría el área efectiva de los transectos de muestreo y para las aves *buffers* de hasta 200 m en torno a los puntos de escucha. En el caso del paisaje, la biomasa se analizó en la zona de influencia del encuadre de las fotografías utilizadas en las encuestas de valoración social.

2.5 Análisis socioeconómico

Con el fin de integrar una perspectiva socioeconómica, se realizaron encuestas a gestores agrarios para analizar la aceptación de distintos esquemas agroambientales y de indicadores basados en resultados. El análisis se centró en comparar la preferencia por enfoques basados en prácticas y en resultados (Granado-Díaz *et al*., 2024; Villanueva *et al*., 2024), así como en la percepción del riesgo asociada a diferentes objetivos ambientales y al uso de la monitorización por teledetección. Esta información se integró con los resultados biofísicos para evaluar la viabilidad operativa del indicador propuesto.

3. RESULTADOS

La biomasa herbácea estimada mediante teledetección permitió identificar contrastes en los estados funcionales de los agrosistemas estudiados. En el olivar tradicional, la presencia de cubierta herbácea generó diferencias claras en la biomasa acumulada durante los periodos productivos, con valores superiores a 500 kg ha^{-1} en invierno-primavera, frente a valores muy reducidos en los sin cubierta. En la dehesa, la biomasa mostró una elevada variabilidad estacional, con máximos primaverales de 850-1000 kg ha^{-1} y mínimos durante el verano e invierno, sin generar estados funcionales tan claramente segregados entre los grupos de manejo de diferentes intensidades.

Las relaciones entre biomasa y biodiversidad mostraron patrones que variaron según el tipo de sistema. En el olivar, los valores de biomasa acumulados en las ventanas temporales asociadas a los muestreos se correlacionaron de manera consistente con la abundancia de aves y la actividad de reptiles, lo que configura un dominio funcional de alta biomasa y biodiversidad. En la dehesa, estas relaciones fueron más débiles a escala mensual y solo emergieron al comparar los valores medios anuales de biomasa, lo que indica que la productividad herbácea modula la biodiversidad, pero no actúa como su principal determinante en sistemas estructuralmente complejos.

La relación entre la biomasa y el carbono orgánico del suelo (SOC) se analizó a partir de la biomasa anual acumulada. En el olivar, los sistemas con cubierta herbácea presentaron valores más altos de biomasa anual y de stocks de SOC (32.98 frente a 20.23 Mg ha^{-1} en 0–30 cm), como se observa en la Figura 2, lo que refleja una conexión directa entre la producción herbácea sostenida y la acumulación de carbono en el suelo. En la dehesa, esta relación fue menos directa, observándose valores elevados de SOC incluso en situaciones de menor biomasa anual, lo que pone de manifiesto el papel dominante del arbolado y de los procesos de acumulación a largo plazo.

En cuanto a los servicios de regulación y culturales, la biomasa herbácea presente durante los periodos críticos de erosión se asoció con mejoras simultáneas en la protección del suelo y en la valoración del paisaje, especialmente en el olivar. Los sistemas con mayor biomasa invernal presentaron valores del factor C de la USLE claramente inferiores (0.48 frente a 0.63), lo que implica una reducción del riesgo de erosión cercana al 30 % (Fig. 3), y fueron sistemáticamente mejor valorados en las encuestas de paisaje, coincidiendo con una biomasa acumulada de 500–600 kg ha^{-1} en el momento de las fotografías. En la dehesa, la percepción del paisaje estuvo más ligada a la combinación de biomasa moderada y cobertura arbórea permanente que a la productividad herbácea aislada (Fig. 3).

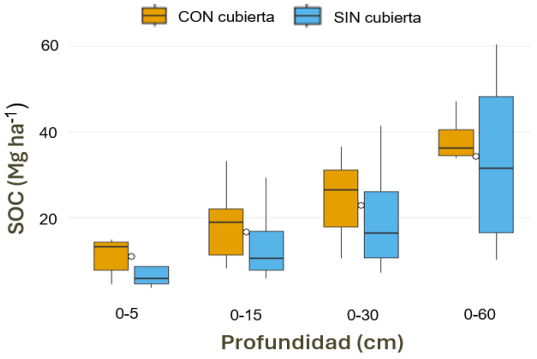


Figura 2. Contenido de carbono orgánico del suelo (SOC, Mg ha^{-1}) en función de la profundidad (0–5, 0–15, 0–30 y 0–60 cm) en olivares con y sin cubierta herbácea.

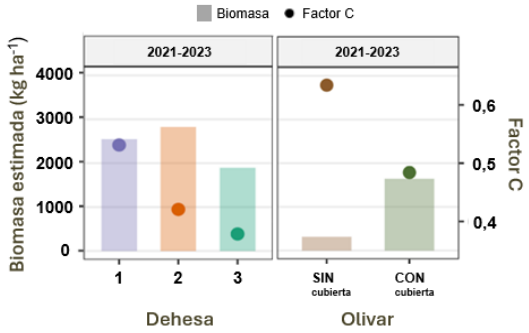


Figura 3. Biomasa herbácea (AGB media acumulada) (2021–2023) en kg ha-1 y el factor C de la USLE en dehesa (tipos 1–3) y en olivar (con y sin cubierta herbácea).

Desde una perspectiva socioeconómica, los patrones biofísicos observados se reflejaron en preferencias contrastadas hacia los esquemas agroambientales. En el olivar se observó una mayor aceptación de programas basados en prácticas, lo que indica, una menor compensación necesaria para incentivar la participación. Estos programas vinculan el pago a la adopción de actuaciones concretas de manejo. En el caso de la dehesa, se observó una mayor disposición a participar en programas basados en resultados, en los que la compensación depende del desempeño ambiental medido mediante indicadores. Asimismo, los programas cuyo objetivo ambiental se centra en el secuestro de carbono presentan una menor compensación que los centrados en la biodiversidad (medida en el número de

especies de aves), debido a la mayor incertidumbre percibida en estos últimos. Estos resultados indican que la viabilidad de los programas basados en indicadores también depende de la percepción del riesgo asociada a su aplicación.

En conjunto, estos resultados indican que la biomasa herbácea estimada por teledetección, interpretada en su dimensión temporal, puede actuar como un indicador integrador y operativo de múltiples servicios ecosistémicos, especialmente en sistemas mediterráneos simplificados como el olivar, y como indicador complementario en sistemas complejos como la dehesa, como se muestra en la Figura 4.

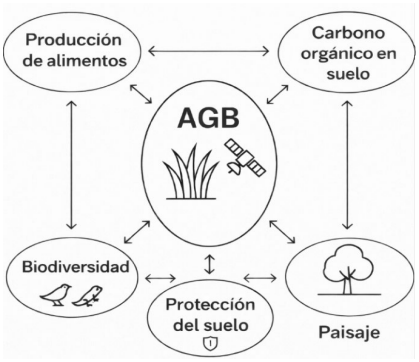


Figura 4. Propuesta de la biomasa aérea (AGB) como indicador operativo de cinco servicios ecosistémicos clave.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran cómo AGB permite integrar de manera coherente información sobre distintos servicios ecosistémicos en agrosistemas mediterráneos, lo que revela patrones diferenciados entre sistemas simplificados y complejos. En el olivar, la biomasa se asocia de manera consistente con servicios de aprovisionamiento, regulación y culturales, así como con indicadores de biodiversidad, lo que refuerza su idoneidad como indicador operativo para esquemas agroambientales basados en resultados, fácilmente monitorizables y escalables. En la dehesa, aunque la biomasa no actúa como determinante principal de la biodiversidad, sí contribuye a caracterizar estados funcionales relevantes cuando se interpreta junto con índices de complejidad estructural y métricas de heterogeneidad del hábitat, que desempeñan un papel dominante en estos sistemas agro-silvopastorales. La incorporación de la dimensión socioeconómica pone de manifiesto que la viabilidad de estos enfoques depende no solo de la robustez biofísica del indicador, sino también de su aceptación por parte de los gestores, especialmente en contextos de incertidumbre. En conjunto, este estudio respalda la producción herbácea como indicador integrador y operativo, con un elevado potencial para apoyar el diseño y el seguimiento de políticas agroambientales orientadas a resultados en paisajes agrarios mediterráneos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de la AEI (PID2019-107693RRC22/AEI/10.13039/501100011033), al proyecto EU Horizon Europe ScaleAgData (101086355), al proyecto DRYAD (nº 101156076) y al proyecto PP.AVA23.INV202301.030 (O.P. Andalucía 2021-2027, 80% cofinanciado por FEDER).

6. REFERENCIAS

Blázquez-Carrasco, Á., Gómez-Giráldez, P. J., Castro-Rodríguez, J., Colombo, S., Carpintero, E., & González-Dugo, M. P. (2021). Estimation of olive groves cover crops net primary productivity using remote sensing data. *Proceedings of SPIE, 11856, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXIII*, 118560S. https://doi.org/10.1117/12.2601181

Granado-Díaz, R., Villanueva, A. J., & Colombo, S. (2024). Land manager preferences for outcome-based payments for environmental services in oak savannahs. *Ecological Economics, 220*, 108158. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108158

Gómez-Giráldez, P.J., Aguilar, C., Caño, A.B., García-Gómez-Giráldez, P. J., Aguilar, C., Caño, A. B., García-Moreno, A., & González-Dugo, M. P. (2019). Remote sensing estimation of net primary production as monitoring indicator of holm oak savanna management. *Ecological Indicators, 106*, 105526. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105526

González-Dugo, M. P., Muñoz-Gómez, M. J., Gálvez, C., Blázquez-Carrasco, Á., Carbonero, M. D., Castro, J. C., Guerrero-Casado, J., Tortosa, F. S., Castro, J., Arriaza, M., Colombo, S., & Villanueva, A. (2024). Integración de la teledetección en el seguimiento de los servicios ecosistémicos como apoyo al desarrollo de políticas agrarias. En *Teledetección y cambio global: Retos y oportunidades para un crecimiento azul* (pp. 333–336). XX Congreso de la AET.

Monteith, J. L., & Moss, C. J. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, *Biological Sciences*, 281(980), 277–294. https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140

Muñoz-Gómez, M. J., Andreu, A., Carbonero, M. D., Blázquez-Carrasco, Á., & González-Dugo, M. P. (2024). Impact of water stress on Mediterranean oak savanna grasslands productivity: Implications for on-farm grazing management. *Agricultural Water Management, 303*, 109025. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109025

Villanueva, A. J., Granado-Díaz, R., & Colombo, S. (2024). Comparing practice- and results-based agri-environmental schemes controlled by remote sensing: An application to olive groves in Spain. *Journal of Agricultural Economics, 75*(2), 524–545. https://doi.org/10.1111/1477-9552.12573

Win, K. Z., Arriaza, M., & Villanueva, A. J. (2025). Monetary and non-monetary valuation of Mediterranean agricultural landscapes: The case of oak savannah and sloping olive groves. *Spanish Journal of Agricultural Research, 23*(2), 21502. https://doi.org/10.5424/sjar/2025232-21502

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.201

Aplicaciones de Google Satellite Embeddings y OPERA DIST-ANN en la cartografía y evaluación de plantaciones forestales

Esteban, Jessica [1] **Navarro, José Antonio** [1] **Tomé, José Luis** [1] **González, Isabel** [1]

[1] Agresta S. Coop., España

ORCID: Esteban 0000-0001-8350-5343 Navarro 0000-0002-8994-3085 Tomé 0000-0003-2298-9115 González 0009-0002-1455-9174

Correspondencia: jesteban@agresta.org janavarro@agresta.org jltome@agresta.org igonzalez@agresta.org

RESUMEN

El aumento de la disponibilidad de series temporales satelitales y de productos preparados para el análisis ha impulsado nuevas aproximaciones operacionales para la monitorización forestal. Este trabajo evalúa el potencial de Google Satellite Embeddings para la cartografía de plantaciones forestales en Uganda a escala nacional. La metodología combina tres componentes: (i) clasificación supervisada para generar una máscara bosque/no bosque, (ii) búsqueda por similitud en el espacio de embeddings a partir de un prototipo de plantación y (iii) análisis de la dinámica temporal para reducir omisiones en áreas con cambios recientes. La validación con la base de datos oficial SPGS mostró una exactitud del productor del 77,0%, con diferencias regionales relevantes y los peores resultados en la región South Western. En comparación con antecedentes basados en Sentinel-2 en entornos tropicales, los resultados obtenidos son comparables, aunque la escala nacional del presente estudio introduce una complejidad adicional en la modelización y la validación. En conjunto, los resultados muestran que los embeddings constituyen una entrada útil para la cartografía de plantaciones en paisajes dinámicos y heterogéneos, y apuntan a la necesidad de futuras validaciones basadas en muestreo estratificado para comparar de forma robusta este enfoque con clasificaciones convencionales.

Palabras clave: *plantaciones forestales; Google Satellite Embeddings; series temporales.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Aplicaciones de Google Satellite Embeddings en la cartografía de plantaciones forestales en Uganda

Esteban, Jessica [(1)], Navarro, José Antonio [(1)], Tomé, José Luis [(1)], González, Isabel [(1)]
[(1)] Agresta S. Coop., España.
0000-0001-8350-5343, jesteban@agresta.org ; 0000-0002-8994-3085, janavarro@agresta.org
0000-0003-2298-9115, jltome@agresta.org ; 0009-0002-1455-9174, igonzalez@agresta.org

Resumen: El aumento de la disponibilidad de series temporales satelitales y de productos preparados para el análisis ha impulsado nuevas aproximaciones operacionales para la monitorización forestal. Este trabajo evalúa el potencial de Google Satellite Embeddings para la cartografía de plantaciones forestales en Uganda a escala nacional. La metodología combina tres componentes: (i) clasificación supervisada para generar una máscara bosque/no bosque, (ii) búsqueda por similitud en el espacio de embeddings a partir de un prototipo de plantación y (iii) análisis de la dinámica temporal para reducir omisiones en áreas con cambios recientes. La validación con la base de datos oficial SPGS mostró una exactitud del productor del 77,0%, con diferencias regionales relevantes y los peores resultados en la región South Western. En comparación con antecedentes basados en Sentinel-2 en entornos tropicales, los resultados obtenidos son comparables, aunque la escala nacional del presente estudio introduce una complejidad adicional en la modelización y la validación. En conjunto, los resultados muestran que los embeddings constituyen una entrada útil para la cartografía de plantaciones en paisajes dinámicos y heterogéneos, y apuntan a la necesidad de futuras validaciones basadas en muestreo estratificado para comparar de forma robusta este enfoque con clasificaciones convencionales.

Palabras clave: plantaciones forestales; Google Satellite Embeddings; series temporales.

Forest Plantation Mapping in Uganda Using Google Satellite Embeddings

***Abstract**: The increasing availability of satellite time series and analysis-ready data has enabled new operational approaches for forest monitoring. This study evaluates the potential of Google Satellite Embeddings for national-scale forest plantation mapping in Uganda. The methodology combines three components: (i) supervised classification to generate a forest/non-forest mask, (ii) similarity search in the embedding space based on a plantation prototype, and (iii) temporal analysis to reduce omission in recently disturbed areas. Validation against the official SPGS database showed a producer's accuracy of 77.0%, with marked regional differences and the lowest performance in the South Western region. Compared with previous Sentinel-2-based studies in tropical environments, the results are comparable, although the national scale of the present study introduces additional complexity in both modelling and validation. Overall, the results show that embeddings provide a useful input for plantation mapping in dynamic and heterogeneous landscapes, and point to the need for future stratified-sampling validation frameworks to support a more robust comparison between embedding-based and conventional classifications.*

***Keywords**: forest plantations; Google Satellite Embeddings; satellite time series.*

1. INTRODUCCIÓN

El uso de datos satelitales ha transformado el conocimiento y la gestión de los bosques al proporcionar información periódica y con una cobertura espacial continua. El programa Landsat, por ejemplo, mantiene un registro continuo de imágenes desde 1972, constituyendo una de las series más largas disponibles para el análisis de cambios. Por su parte, el programa Copernicus, acumula ya más de una década de observaciones sistemáticas con Sentinel-2.

La disponibilidad creciente de datos satelitales de observación de la Tierra, junto con políticas de acceso abierto y mejoras en el preprocesado, ha impulsado flujos de trabajo operacionales a gran escala para la monitorización forestal (Wulder *et al*., 2022). Frente a enfoques basados en un número reducido de imágenes, se ha transitado hacia el uso sistemático de series temporales y de datos preparados para el análisis (análisis-ready-data). En este contexto, destaca la reciente publicación de los *AlphaEarth Foundations' Annual Embeddings* (Brown *et al*., 2025), un conjunto global de datos basados en modelos Deep Learning que ingiere y fusiona observaciones de múltiples sensores (como Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat y variables climáticas) en un único dataset. Cada píxel de 10 metros se describe mediante un vector de 64 dimensiones que codifica las trayectorias temporales y características de la superficie a lo largo del año. Aunque no son interpretables a simple vista, estas representaciones resultan más potentes para técnicas de Machine Learning, como tareas de clasificación, similitud y análisis de cambio (Brown *et al*., 2025).

Esta comunicación evalúa el potencial de estos embeddings para abordar el reto de cartografiar las plantaciones forestales en Uganda, un paisaje heterogéneo y dinámico con ciclos de corta y replantación.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos de entrada

El estudio se basó en la serie anual de Google Satellite Embeddings para el periodo 2017–2025, utilizada como fuente principal para la identificación y delimitación de plantaciones forestales.

Además, se emplearon dos bases de datos independientes para el entrenamiento y la validación de los resultados:

- Base datos de entrenamiento: Se construyó una base multiclase integrada por plantaciones forestales, bosque, no bosque y plantaciones no forestales. Las plantaciones forestales se digitalizaron a partir de coordenadas de plantaciones, proporcionadas por la FAO, y depuradas visualmente con imágenes de alta resolución. Las clases de bosque se apoyaron en la capa global del JRC (Burgoin *et al*., 2024), mientras que las plantaciones no forestales (palma de aceite, té, café, cacao) y áreas no forestales se delimitaron utilizando el mapa de usos post-deforestación de África (Masolelet *et al*., 2024) y ESA WorldCover (Zanaga *et al*., 2022).
- Base de datos de validación: el mapa final de plantaciones se validó con la base de datos oficial del programa SPGS (*Sustainable Plantation Growth System*) del Ministerio del Agua y Medio Ambiente. La muestra estuvo compuesta por 384 puntos distribuidos regionalmente: 74 en Albertine, 47 en Central, 67 en Eastern, 25 en Northern, 55 en South Western y 112 en Western (Figura 1). Dado que esta base recoge localizaciones de plantaciones conocidas, la validación permitió estimar principalmente la exactitud del productor y el error de omisión, pero no evaluar de forma robusta el error de comisión.

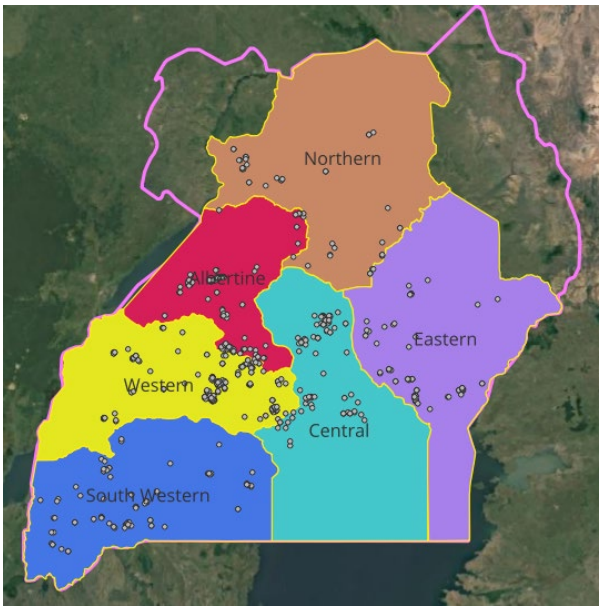


Figura 1. Distribución espacial de la base de datos de validación a lo largo de las regiones de Uganda.

2.2. Cartografía de plantaciones en Uganda

La metodología desarrollada explotó el espacio multidimensional de los embeddings mediante tres componentes complementarias, posteriormente integradas en un mapa final de plantaciones.

- **Clasificación supervisada (Máscara Bosque / No Bosque)**: En una primera etapa, se entrenó un modelo Random Forest con la base de entrenamiento y los embeddings como variables predictoras. Este paso permitió generar una máscara general de bosque/no bosque, útil para excluir áreas agrícolas y otras coberturas herbáceas susceptibles de generar falsos positivos.
- **Búsqueda de similitud (Similarity Search):** A diferencia de las bandas espectrales, en el espacio de 64 dimensiones de los embeddings la similitud se mide por cómo de alineados están dos vectores, no por sus valores absolutos. Se extrajeron las firmas de las plantaciones forestales de entrenamiento para calcular un vector medio de referencia. Al

calcular el coseno del ángulo entre el vector de cada pixel de Uganda y este vector prototipo, se obtiene una puntuación de similitud: los píxeles más alineados (misma dirección) obtienen valores más altos; indicando una fuerte probabilidad de ser plantación. Posteriormente, sobre este ráster continuo de aplicaron umbrales de corte.

- **Detección de cambios temporales:** para reducir el error de omisión, se extrajo la dinámica temporal calculando un producto escalar pixel a pixel entre los embeddings de inicio y final de la serie temporal. De esta manera se logró identificar zonas sometidas a dinámicas de cortas recientes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La inspección visual sistemática muestra patrones coherentes con la realidad observada en las imágenes de alta resolución y una mejora práctica en la delimitación y caracterización del estado de las plantaciones (Figura 2).

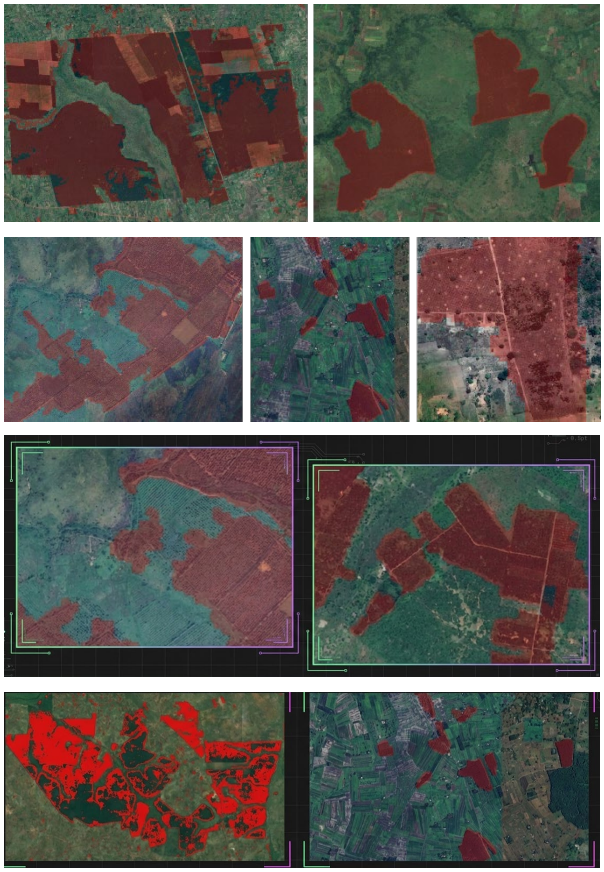


Figura 2. Ejemplos ilustrativos del resultado de clasificación en Uganda.

La validación realizada con la base de datos SPGS mostró una **exactitud del productor del 77,0%**, correspondiente a un **error de omisión del 23%**. Este resultado indica que el modelo es capaz de identificar una proporción elevada de las plantaciones existentes, aunque mantiene limitaciones en la detección completa de todas las áreas plantadas. El análisis por especie no mostró diferencias significativas entre las principales especies comerciales del país, con errores de omisión del 27% para pino y del 22% para eucalipto, lo que sugiere un comportamiento relativamente consistente del modelo entre tipologías de plantación.

Sin embargo, el rendimiento no fue homogéneo espacialmente. Las regiones Albertine (86%), Northern (80%) y Central (79%) presentaron los mejores resultados, mientras que Eastern (76%) y Western (75%) mantuvieron valores elevados. La principal debilidad se localizó en la región South Western, donde la exactitud del productor descendió al 49%, lo que evidencia una mayor dificultad en la detección de plantaciones en este contexto. El mayor relieve y la nubosidad más persistente podrían reducir la separabilidad de las plantaciones respecto a otras coberturas. Aunque en este trabajo se aplicó un flujo metodológico uniforme a escala nacional, estos resultados indican que en regiones con mayor complejidad ambiental podría ser conveniente explorar ajustes metodológicos específicos, por ejemplo, en los umbrales de similitud o en las reglas de integración de resultados.



Figura 2. Omisiones detectadas en la región South Western.

En comparación con enfoques más convencionales basados en Sentinel-2, nuestros resultados son comparables a los obtenidos en otros estudios realizados en entornos tropicales complejos. En Hainan, Li *et al*. (2022) cartografiaron plantaciones de caucho en una gran región insular mediante composiciones fenológicas de Sentinel-2 y Random Forest, obteniendo una exactitud del productor del 81%, una exactitud del usuario del 84,4%. En el sur de Myanmar, Nomura y Mitchard (2018) mostraron que Sentinel-2 permite clasificar pequeñas plantaciones en paisajes forestales complejos, con exactitudes medianas del productor superiores al 93,5% entre clases y valores altos tanto para caucho como para palma aceitera. Asimismo, Htun *et al*. (2019) cartografiaron plantaciones de caucho y palma en Myanmar mediante la combinación de Landsat-8, Sentinel-2 y Sentinel-1, alcanzando una exactitud global del 84%. No obstante, la comparación directa entre estos trabajos y el presente estudio debe hacerse con cautela. Los antecedentes localizados se desarrollan en áreas subnacionales o regionales, con objetivos temáticos más específicos y diseños de validación distintos. En contraste, este trabajo aborda la cartografía de plantaciones a escala nacional en Uganda,

donde el mosaico de usos del suelo es altamente heterogéneo y dinámico, en un contexto en el que la superficie de bosque plantado se sitúa en el orden de varios cientos de miles de hectáreas según la FAO (FRA 2025).

En conjunto, los resultados sugieren que el enfoque es adecuado para una aplicación nacional, pero también que una metodología aplicada de forma uniforme puede no capturar de forma óptima la variabilidad regional del país. Como línea de trabajo futuro, se propone el desarrollo de una validación basada en muestreo estratificado siguiendo las recomendaciones de Olofsson *et al*. (2014), que permita estimar de forma no sesgada tanto errores de omisión como de comisión, así como superficies ajustadas por error. Este marco permitiría además comparar de forma más robusta una clasificación convencional basada en Sentinel-2 con la clasificación basada en embeddings, utilizando un mismo diseño muestral y un mismo protocolo de evaluación.

4. CONCLUSIÓN

Este trabajo muestra que Google Satellite Embeddings pueden utilizarse para apoyar la cartografía nacional de plantaciones forestales en Uganda mediante un flujo metodológico basado en similitud, clasificación supervisada y análisis temporal. El enfoque ha permitido generar un producto cartográfico útil en un contexto espacialmente heterogéneo, confirmando el interés de este tipo de representaciones para aplicaciones operacionales en paisajes forestales dinámicos.

Los resultados también ponen de manifiesto que la respuesta del método no es uniforme en todo el territorio, lo que sugiere la conveniencia de explorar ajustes metodológicos específicos en regiones más complejas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a FAO responsable del proyecto desarrollado en Uganda por la financiación y el apoyo técnico proporcionado para la realización de este trabajo. Asimismo, los autores agradecen a Google por la publicación de los Google Satellite Embeddings a través de Google Earth Engine, que han facilitado el desarrollo del análisis

6. REFERENCIAS

Bourgoin, Clement; Verhegghen, Astrid; Carboni, Silvia; Ameztoy, Iban; Ceccherini, Guido; Colditz, Rene; Achard, Frederic (2024): Global map of forest types 2020 - version 0. European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] PID: http://data.europa.eu/89h/037ca376-ba92-49db-a8f7-0c277c1e5436.

Brown, C. F., Kazmierski, M. R., Pasquarella, V. J., Rucklidge, W. J., Samsikova, M., Zhang, C., Shelhamer, E., Lahera, E., Wiles, O., Ilyushchenko, S., Gorelick, N., Zhang, L. L., Alj, S., Schechter, E., Askay, S., Guinan, O., Moore, R., Boukouvalas, A., & Kohli, P. (2025). *AlphaEarth Foundations: An embedding field model for accurate and efficient global mapping from sparse label data*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2507.22291

FAO (2025). Global Forest Resources Assessment 2025. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.4060/cd6709en

Htun, N. Z., Mizoue, N., Kajisa, T., & Yoshida, S. (2019). Mapping Plantations in Myanmar by Fusing Landsat-8, Sentinel-2 and Sentinel-1 Data along with Systematic Error Quantification. *Remote Sensing, 11*(7), 831. https://doi.org/10.3390/rs11070831

Li, H., Zhao, L., Sun, L., Li, X., Wang, J., Han, Y., Liang, S., & Chen, J. M. (2022). Capability of Phenology-Based Sentinel-2 Composites for Rubber Plantation Mapping in a Large Area with Complex Vegetation Landscapes. *Remote Sensing, 14*(21), 5338. https://doi.org/10.3390/rs14215338

Masolele, R.N., Marcos, D., De Sy, V. *et al*. Mapping the diversity of land uses following deforestation across Africa. *Sci Rep 14*, 1681 (2024). https://doi.org/10.1038/s41598-024-52138-9

Nomura, K., & Mitchard, E. T. A. (2018). More Than Meets the Eye: Using Sentinel-2 to Map Small Plantations in Complex Forest Landscapes. *Remote Sensing, 10*(11), 1693. https://doi.org/10.3390/rs10111693

Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment, 148*, 42-57. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015

Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford, C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Woodcock, C. E., Huntington, J. L., *et al.* (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment, 280*, Article 113195.

Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Lesiv, M., Herold, M., Tsendbazar, N. E., Xu, P., Ramoino, F., & Arino, O. (2022). *ESA WorldCover 10 m 2021 v200* [Data set]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.208

Comparación de métricas de sensores WorldView-3 y Sentinel-2 con escáner láser aerotransportado para la identificación de bosques viejos de *Pinus nigra* en el sureste de España

Guerrero Cubero, Carlos [1] **Calzado Carretero, Anabel** [1] **Aragonés Borrego, David** [2] **Vázquez Piqué, Javier** [1]

[1] Universidad de Huelva, España

[2] Laboratorio SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana (CSIC)

ORCID: Guerrero Cubero 0009-0008-3299-3541 Calzado Carretero 0000-0002-7300-477X Aragonés Borrego 0000-0003-4989-9005 Vázquez Piqué 0000-0002-7133-4142

Correspondencia: carlos.guerrero@dcaf.uhu.es carrete@dcaf.uhu.es daragones@ebd.csic.es jpique@uhu.es

RESUMEN

La protección de los bosques viejos (Old-Growth Forests, OGFs) es una prioridad global para la conservación de la biodiversidad. En los bosques mediterráneos de Pinus nigra subsp. salzmannii, identificarlos es un desafío por su complejidad estructural y distribución fragmentada. Este estudio evalúa el potencial de la teledetección multisensor para estimar un índice de bosque viejo (OGI) en el Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas. Combinamos datos estructurales de referencia (TLS) con predictores LiDAR aerotransportado (ALS, PNOA 2024) e imágenes satelitales (Sentinel-2 y WorldView-3). Aplicamos Regresión Lineal Múltiple (MLR), Random Forests (RF) y Support Vector Regression (SVR) para modelar el OGI. Los resultados demuestran que integrar métricas ALS con datos WorldView-3 mejora significativamente el poder predictivo. El modelo SVR obtuvo el mejor rendimiento (R^2 Cross Validation [CV] = 0,848), capturando la complejidad estructural de los OGFs. Aunque Sentinel-2 mostró un ajuste inferior (R^2 CV = 0,767), su gratuidad y resolución temporal, junto al LiDAR PNOA, lo perfilan como la herramienta más viable para el monitoreo a gran escala exigido por las políticas de conservación. Esta metodología híbrida proporciona una herramienta robusta para cartografiar y monitorizar los OGFs mediterráneos.

Palabras clave: *Índice de bosque viejo, Escáner Láser Aéreo, Regresión lineal múltiple, Random Forest, Support Vector Regression*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Comparación de métricas de sensores WorldView-3 y Sentinel-2 con escáner láser aerotransportado para la identificación de bosques viejos de *Pinus nigra* en el sureste de España

Guerrero Cubero, Carlos [1], Calzado Carretero, Anabel [1], Aragonés Borrego, David [2], Vázquez Piqué, Javier [1]

[1] Universidad de Huelva, España.

0009-0008-3299-3541, carlos.guerrero@dcaf.uhu.es ; 0000-0002-7300-477X, carrete@dcaf.uhu.es

0000-0002-7133-4142, jpique@uhu.es

[2] Laboratorio SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana (CSIC).

0000-0003-4989-9005, daragones@ebd.csic.es

Resumen: La protección de los bosques viejos (*Old-Growth Forests*, OGFs) es una prioridad global para la conservación de la biodiversidad. En los bosques mediterráneos de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*, identificarlos es un desafío por su complejidad estructural y distribución fragmentada. Este estudio evalúa el potencial de la teledetección multisensor para estimar un índice de bosque viejo (OGI) en el Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas. Combinamos datos estructurales de referencia (TLS) con predictores LiDAR aerotransportado (ALS, PNOA 2024) e imágenes satelitales (*Sentinel-2* y *WorldView-3*). Aplicamos Regresión Lineal Múltiple (MLR), *Random Forests* (RF) y *Support Vector Regression* (SVR) para modelar el OGI. Los resultados demuestran que integrar métricas ALS con datos *WorldView-3* mejora significativamente el poder predictivo. El modelo SVR obtuvo el mejor rendimiento (R^2 *Cross Validation* [CV] = 0,848), capturando la complejidad estructural de los OGFs. Aunque Sentinel-2 mostró un ajuste inferior (R^2 CV = 0,767), su gratuidad y resolución temporal, junto al LiDAR PNOA, lo perfilan como la herramienta más viable para el monitoreo a gran escala exigido por las políticas de conservación. Esta metodología híbrida proporciona una herramienta robusta para cartografiar y monitorizar los OGFs mediterráneos.

Palabras clave: Índice de bosque viejo, Escáner Láser Aéreo, Regresión lineal múltiple, *Random Forest*, *Support Vector Regression*

Comparison of WorldView-3 and Sentinel-2 Sensor Metrics with Airborne Laser Scanning for Identifying Old-Growth Pinus nigra Forests in Southeastern Spain

Abstract: *The protection of OGFs is a global priority for biodiversity conservation. In Mediterranean Pinus nigra subsp. salzmannii forests, identifying these stands is challenging due to their structural complexity and fragmented distribution. This study evaluates the potential of multi-sensor remote sensing to estimate an OGI in the Sierra de Cazorla, Segura, and Las Villas Natural Park. We combined structural reference data from TLS with predictors derived from Airborne Laser Scanning (ALS, PNOA 2024) and satellite imagery (Sentinel-2 and WorldView-3). Multiple Linear Regression (MLR), Random Forest (RF), and Support Vector Regression (SVR) were applied to model the OGI. The results demonstrate that integrating ALS metrics with WorldView-3 data significantly enhances predictive power. The SVR model yielded the best performance (cross-validation R^2 CV = 0.848), effectively capturing the structural complexity of OGFs. Although Sentinel-2 showed lower accuracy (R^2 CV = 0.767), its free availability and temporal resolution, combined with PNOA LiDAR, position it as the most viable tool for large-scale monitoring required by conservation policies. This hybrid methodology provides a robust tool for mapping and monitoring Mediterranean OGFs.*

Keywords*: Old-Growth Index, Airborne Laser Scanning, Multiple Linear Regression, Random Forest, Support Vector Regression*

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques viejos (*old-growth forests*, OGFs) se definen como rodales en estadios avanzados de la dinámica sucesional natural, caracterizados por una mínima intervención humana y la presencia de estructuras complejas que han tardado siglos en desarrollarse. Estos ecosistemas son refugios insustituibles de biodiversidad, donde los OGFs no gestionados albergan una riqueza de especies significativamente mayor que las masas gestionadas. Además, los OGFs desempeñan un papel crítico en la mitigación del cambio climático al actuar como sumideros de carbono estables y duraderos, tanto en la biomasa aérea como en el suelo.

A pesar de su valor, estos bosques son extremadamente escasos en Europa, ocupando menos del 3% de la superficie forestal, a menudo en un estado altamente fragmentado. En este contexto, la Estrategia de Biodiversidad de la UE para 2030 obliga a la identificación, cartografía y protección estricta de todos los bosques primarios y viejos. Sin embargo, los estudios sobre OGFs en la región mediterránea siguen siendo escasos; esta carencia resulta especialmente relevante para los OGFs de *P. nigra*. localizados en zonas montañosas del sureste español (Tíscar & Lucas-Borja, 2016), lo que evidencia la necesidad de desarrollar cartografía específica para los OGFs de esta especie en el ámbito mediterráneo.

Un avance tecnológico decisivo para este objetivo es la disponibilidad de datos LiDAR aerotransportado (ALS) actualizados periódicamente a través de programas nacionales como el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA 2024). Mientras que el estudio previo desarrollado por Hevia *et al*. (2022) en el sureste español se basó en densidades de pulso bajas (0.5 pts/m²), los nuevos vuelos proporcionan densidades superiores a 5 pts/m², permitiendo una caracterización mucho más fina de la estructura vertical y la dinámica de huecos del dosel.

Por otra parte, estudios recientes como el de Adiningrat *et al*. (2024) señalan que la fusión de métricas ALS con índices espectrales de sensores de alta resolución es una estrategia eficaz para discriminar estadios sucesionales avanzados en bosques templados. La complementariedad de estas fuentes de datos está bien establecida: mientras el LiDAR captura la complejidad estructural 3D, los datos ópticos aportan información sobre el contenido de pigmentos y la estructura interna de la hoja, así como el vigor de la vegetación. Este trabajo explora si la integración de datos ALS con imágenes de diferente resolución espacial, como *WorldView-3* y *Sentinel-2*, permite obtener cartografía de precisión de los OGFs de *P. nigra* en el sureste español.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y caracterización de las masas

El estudio se localiza en el sector sur del Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas (Jaén), una de las zonas con mayor presencia de rodales naturales de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. El clima es típicamente mediterráneo, con sequías estivales severas y precipitaciones anuales que oscilan entre los 400 y 1900 mm.

Se establecieron 30 parcelas cuadradas de 0.25 ha, 15 en masas jóvenes y 15 en masas viejas. Las masas jóvenes se seleccionaron considerando como criterio que el diámetro normal (DBH) medio fuera menor de 20 cm, mientras que las masas viejas se eligieron teniendo en cuenta la estructura, la edad y la baja intensidad de la gestión.

2.2. Cálculo del Índice de Bosque Viejo (OGI)

Para cuantificar el nivel de madurez estructural, se empleó un índice de bosque viejo forestal (*Old-Growth Index*, OGI) basado en el índice definido por Spies y Franklin (1991) y adaptado para *P. nigra*. Este índice se basa en cuatro variables estructurales (Hevia *et al*., 2022): (1) desviación estándar del diámetro normal (DBH), (2) densidad de árboles grandes (DBH >50 cm), (3) DBH medio y (4) densidad total de pies. A partir de estas cuatro variables se calculó el OGI, siguiendo la Ecuación 1:

$$\mathrm{OGI} = 25 \sum_{i=1}^{i=4} \left| \frac{\mathrm{x_i} - \mathrm{x_{i\ jóven}}}{\mathrm{x_{i\ viejo}} - \mathrm{x_{i\ jóven}}} \right| \qquad (1)$$

donde i corresponde a cada una de las cuatro variables estructurales (1–4), x_i es el valor observado para la i-ésima variable estructural; $x_{i\ joven}$ es el valor característico de la i-ésima variable estructural para masas jóvenes; $x_{i\ viejo}$ es el valor característico de la i-ésima variable estructural para masas viejas. Mediante esta ecuación, el OGI escala los valores entre 0 (rodales muy jóvenes) y 100 (rodales muy viejos).

Los valores de referencia para masas jóvenes ($x_{i\ joven}$) y viejas ($x_{i\ viejo}$) se obtuvieron del estudio de Hevia *et al*. (2022), realizado en la misma zona de estudio, donde se emplearon 21 parcelas de bosque viejo y 18 parcelas de bosque joven para definir los extremos del gradiente de madurez. Sobre esta base, se calculó el OGI para las 30 parcelas de este estudio (15 jóvenes y 15 viejas) siguiendo la ecuación 1.

2.3. Adquisición y procesado de datos de teledetección

Para obtener los datos de referencia estructurales de cada parcela, se utilizó un LiDAR terrestre (TLS) manual (BLK2GO, Leica Geosystems) con una densidad media de 420.000 pts/m². El procesado de las nubes de puntos TLS permitió reconstruir con exactitud la geometría de cada árbol y extraer el DBH de todos los árboles.

Los predictores ALS se derivaron del vuelo PNOA 2024, con una densidad de pulso media de 19.88 pts/m². El procesado se realizó con el paquete *lidR* en R, filtrando los retornos de vegetación entre 3 y 32 m de altura. Para asegurar la robustez ecológica, se priorizaron métricas que resumen la distribución vertical (percentiles, curtosis, rango intercuartílico). En total, se extrajeron 43 métricas ALS para cada parcela.

Además, a partir de ortofotos RGB-NIR del PNOA (0.25 m píxel) se calculó la fracción de cabida cubierta (FCC), un descriptor clave de la estructura horizontal.

Se utilizó una imagen *Sentinel-2* del 21 de junio de 2024, coincidiendo con el máximo desarrollo del dosel, y una imagen *WorldView-3* del 5 de febrero de 2025, cuando el NDVI de *Pinus nigra* alcanza su máxima distintividad en ambientes mediterráneos (Aragones *et al*., 2019).

Para evaluar el aporte específico de la resolución espacial y espectral, se construyeron y compararon dos conjuntos de predictores. Ambos conjuntos compartían el núcleo estructural de las 43 métricas ALS y la variable FCC. La diferencia radicaba en las variables espectrales añadidas:

$SENT2_{set}$: Incluyó 10 bandas originales de *Sentinel-2* y 12 índices de vegetación, cada uno caracterizado por su media, percentil 10 (P10) y percentil 90 (P90), totalizando 46 variables espectrales.

$WVIEW3_{set}$: Incluyó 7 bandas originales de *WorldView-3* y 15 índices de vegetación en formato media/P10/P90, totalizando 52 variables espectrales. Esta mayor resolución permite capturar la heterogeneidad espectral intra-parcela con mayor detalle.

2.4. Modelización Estadística

Se evaluaron tres algoritmos de modelización para identificar el que mejor capturase la relación entre las distintas variables predictoras señaladas y el OGI:

- Multiple Linear Regression (MLR): Limitados a un máximo de cinco variables predictoras no colineales (VIF < 5), seleccionando el mejor ajuste mediante el criterio de información de Akaike (AIC).
- Random Forest (RF): Se aplicó un filtro de correlación (>0.94) y selección por importancia (%IncMSE) para reducir predictores, utilizando 1,500 árboles y optimizando mtry mediante CV de 5-fold (Breiman, 2001).
- Support Vector Regression (SVR): El ajuste óptimo de C (coste) y γ (gamma) se realizó mediante CV de 5-fold; la coherencia entre R^2 entrenamiento y validación evidencia ausencia de sobreajuste, gracias al uso de funciones de núcleo (kernels) ante la alta dimensionalidad (Cortes & Vapnik, 1995).

3. RESULTADOS

La combinación de datos de $WVIEW3_{set}$ superó a la de $SENT2_{set}$ en todos los algoritmos probados. La Tabla 1 (a y b) resume el rendimiento de los modelos más competitivos.

Tabla 1a. Rendimiento predictivo para la estimación del OGI a partir de $WVIEW3_{set}$. (E) Entrenamiento; (OOB) Out of Bag; (CV) Validación Cruzada

Modelo	R^2 ajustado (E)(OOB*)	Validación (R^2 CV)	RMSE (CV*)
MLR	0.881	—	9.57
RF	0.678*	0.810	12.61*
SVR	0.903	0.848	11.20*

Tabla 1b. Rendimiento predictivo para la estimación del OGI a partir de $SENT2_{set}$.

Modelo	R^2 ajustado (E)(OOB*)	Validación (R^2 CV)	RMSE (CV*)
MLR	0.852	—	10.67
RF	0.658*	0.735	16.05*
SVR	0.986	0.767	13.83*

El análisis de importancia de variables en el modelo más robusto (SVR con $WVIEW3_{set}$) reveló que la FCC y el EVI_{mean} fueron los predictores más influyentes. Se observó una relación positiva entre la FCC y el OGI, lo que indica que los rodales con mayor madurez estructural mantienen una cobertura de copas elevada en el estrato superior. En cuanto a las métricas LiDAR, el modelo detectó que una menor curtosis (h_{kurt}) asociada a la presencia de múltiples estratos (mayor madurez) y valores reducidos de ARA3.TFR (proporción de retornos sobre 3 m) son determinantes para identificar el OGI.

El comportamiento de los residuos y las predicciones de los tres métodos se puede visualizar en la Figura 1.

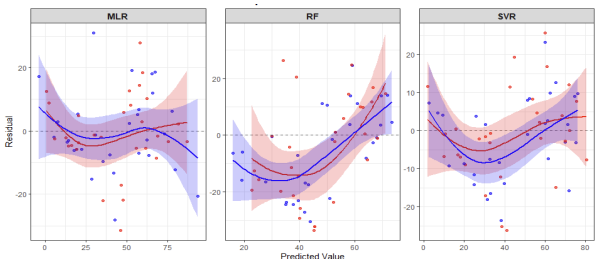


Figura 1. Comparativa de residuos frente a valores predichos de OGI para los modelos MLR, RF y SVR utilizando los datos de $SENT2_{set}$ (rojo) y $WVIEW3_{set}$ (azul).

Finalmente, se generó un mapa predictivo continuo del OGI (Figura 2) como producto cartográfico aplicado del modelo más robusto, a una resolución espacial de 50 m.

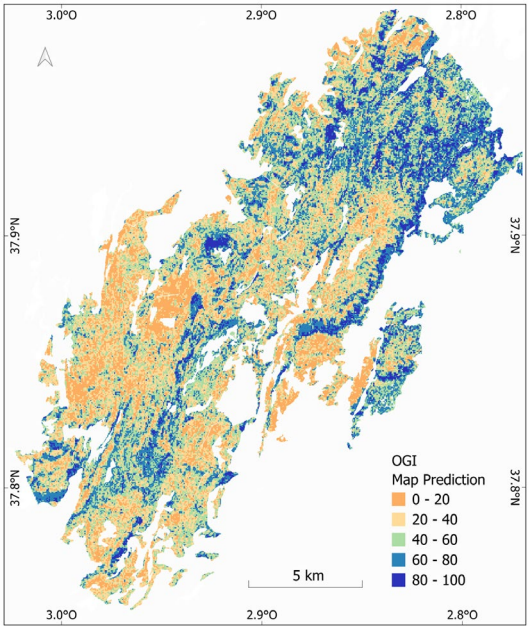


Figura 2. Mapa predictivo de OGI a través del modelo SVR con $WVIEW3_{set}$.

4. DISCUSIÓN

El modelo SVR con WorldView-3 mostró el mejor equilibrio entre ajuste y generalización (R^2 CV = 0.848; RMSE = 11.20), con una diferencia reducida respecto al entrenamiento (ΔR^2 = 0.055), lo que sugiere ausencia de sobreajuste. Como sugieren Smola y Schölkopf (2004), la superioridad de SVR radica en su capacidad para manejar muestras moderadas y capturar dependencias no lineales, superando las rigideces del modelo lineal para describir rodales viejos altamente irregulares. Por su parte, RF mostró un rendimiento inferior (R^2 CV = 0.810; RMSE = 12.61) y mayor sesgo en los extremos del gradiente, tendencia a la convergencia hacia la media característica de los modelos bagging (Breiman, 2001).

El éxito general de estos modelos mejora sustancialmente el R^2 de 0.42 reportado por Hevia *et al*. (2022) con baja densidad LiDAR (0.5 pts/m²). Esta mejora no se atribuye únicamente a la mayor densidad del PNOA 2024 (>5 pts/m²), sino a la sinergia entre LiDAR y datos espectrales, ausente en el estudio previo. Este hallazgo coincide con Adiningrat *et al*. (2024), quienes demuestran que la combinación de LiDAR de alta densidad con datos ópticos es determinante para clasificar OGFs. Asimismo, la superioridad de WorldView-3 respalda la importancia de la alta resolución espacial para capturar patrones de claros, especialmente mediante índices de banda amarilla como GSI e YNDVI (Jackson & Adam, 2022).

Desde un punto de vista ecológico, la relación positiva entre FCC y OGI revela que los pinos centenarios desarrollan copas amplias que compensan los huecos del dosel, manteniendo una cobertura alta en el estrato superior. La importancia de hkurt (baja curtosis) refleja la multiestratificación propia de masas maduras no gestionadas, mientras que el coeficiente negativo de ARA3.TFR indica una estructura compleja donde el sotobosque reduce la señal del dosel superior, coincidiendo con Hevia *et al*. (2022) y la dinámica de huecos descrita por Rugani *et al*. (2013).

Aunque WorldView-3 ofrece mayor precisión (R^2 CV = 0.848; RMSE = 11.20), Sentinel-2 alcanza un rendimiento competitivo (R^2 CV = 0.767; RMSE = 13.83) con una diferencia de error absoluto de solo 2.63 unidades en la escala OGI. Su gratuidad y resolución temporal de 5 días lo posicionan como la herramienta más viable para el monitoreo a largo plazo requerido por políticas europeas.

5. CONCLUSIONES

La sinergia entre el ALS del PNOA 2024 y los sensores multiespectrales permite realizar una cartografía precisa de los OGFs de *P. nigra* en la región mediterránea. El modelo SVR constituye la mejor aproximación estadística al abordar de manera más eficiente las relaciones no lineales entre las métricas analizadas y el grado de madurez del bosque. Se concluye que, aunque la alta resolución de *WorldView-3* mejora el ajuste, *Sentinel-2* ofrece una alternativa operativa robusta para la cartografía y el seguimiento temporal de estos OGFs requeridos por la Estrategia de la Biodiversidad de la UE para 2030.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto PID2022-136906OB-C22 (MICIU/AEI/FEDER, UE). Agradecemos a los servicios forestales del P.N. de Cazorla por su apoyo técnico.

7. REFERENCIAS

Adiningrat, D. P., Schlund, M., Skidmore, A. K., Abdullah, H., Wang, T., & Heurich, M. (2024). Mapping temperate old-growth forests in Central Europe using ALS and Sentinel-2A multispectral data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(9), 826. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12993-5

Aragones, D., Rodriguez-Galiano, V.F., Caparros-Santiago, J.A., & Navarro-Cerrillo, R.M. (2019). Could land surface phenology be used to discriminate Mediterranean pine species? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 281-294. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.003

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5-32.

Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273-297. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Hevia, A., Calzado, A., Alejano, R., & Vázquez-Piqué, J. (2022). Identification of Old-Growth Mediterranean Forests Using Airborne Laser Scanning and Geostatistical Analysis. *Remote Sensing, 14*(16), 4040. https://doi.org/10.3390/rs14164040

Jackson, C. M., & Adam, E. (2022). A machine learning approach to mapping canopy gaps in an indigenous tropical submontane forest using WorldView-3 multispectral satellite imagery. *Environmental Conservation*,*49*(4), 255-262. https://doi.org/10.1017/S0376892922000339

Rugani, T., Diaci, J., & Hladnik, D. (2013). Gap dynamics and structure of two old-growth beech forest remnants in Slovenia. *PLoS ONE, 8*(1), e52641. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052641

Smola, A. J., & Schölkopf, B. (2004). A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing, 14*(3), 199–222. https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88

Spies, T. A., & Franklin, J. F. (1991). The structure of natural young, mature, and old-growth Douglas-fir forests in Oregon and Washington. *En* L. F. Ruggiero, K. B. Aubry, A. B. Carey, & M. H. Huff (Coords. téc.), *Wildlife and vegetation of unmanaged Douglas-fir forests* (Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-285, pp. 1-28). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.

Tíscar, P. A., & Lucas-Borja, M. E. (2016). Structure of old-growth and managed stands and growth of old trees in a Mediterranean *Pinus nigra* forest in southern Spain. *Forestry: An International Journal of Forest Research, 89*(4), 393–401. https://doi.org/10.1093/forestry/cpw002

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.214

Estudio de perturbaciones forestales en Andalucía oriental a partir de series temporales de Sentinel-2 y la aplicación del algoritmo BFAST

Ollega Caro, Jose M. [1] **López-Nieta, Diego** [1] **Rodriguez-Galiano, Victor** [1] **Canero, Francisco M.** [1]

[1] " Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla, 41004 Sevilla, España"

ORCID: López-Nieta 0000-0002-6408-2637 Rodriguez-Galiano 0000-0002-5422-8305 Canero 0000-0002-7813-1487

Correspondencia: jollega@us.es dlopezdelanieta@us.es vrgaliano@us.es fcanero@us.es

RESUMEN

El estudio y monitorización de las perturbaciones forestales (forest disturbances), resulta esencial para la gestión sostenible del medio natural, especialmente en contextos mediterráneos donde la vegetación se ve sometida a múltiples factores de estrés. El objetivo de este trabajo es identificar y caracterizar las perturbaciones forestales entre 2018 y 2024 existentes en un área forestal de 276.500 ha de Andalucía oriental, empleando series temporales de compuestos decenales de NDVI, NDWI y NBR calculados a partir de Sentinel-2. El algoritmo Breaks For Additive Season and Trend (BFAST) fue aplicado a las series temporales de índices, identificando puntos de ruptura asociados a perturbaciones. Los resultados obtenidos mostraron una mayor exactitud para NDVI, llegando a alcanzar una exactitud global (accuracy) del 73,64%.

Palabras clave: *bosque, gestión sostenible, índices espectrales, Sentinel-2, puntos de ruptura.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Estudio de perturbaciones forestales en Andalucía oriental a partir de series temporales de Sentinel-2 y la aplicación del algoritmo BFAST

Ollega Caro, Jose M. [(1)], López-Nieta, Diego [(1)], Rodriguez-Galiano, Victor [(1)], Canero, Francisco M. [(1)]

[(1)] Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla Sevilla, España.

jollega@us.es ; 0000-0002-6408-2637, dlopezdelanieta@us.es

0000-0002-5422-8305, vrgaliano@us.es ; 0000-0002-7813-1487, fcanero@us.es

Resumen: El estudio y monitorización de las perturbaciones forestales (*forest disturbance*s), resulta esencial para la gestión sostenible del medio natural, especialmente en contextos mediterráneos donde la vegetación se ve sometida a múltiples factores de estrés. El objetivo de este trabajo es identificar y caracterizar las perturbaciones forestales entre 2018 y 2024 existentes en un área forestal de 276.500 ha de Andalucía oriental, empleando series temporales de compuestos decenales de NDVI, NDWI y NBR calculados a partir de Sentinel-2. El algoritmo *Breaks For Additive Season and Trend* (BFAST) fue aplicado a las series temporales de índices, identificando puntos de ruptura asociados a perturbaciones. Los resultados obtenidos mostraron una mayor exactitud para NDVI, llegando a alcanzar una exactitud global (*accuracy*) del 73,64%.

Palabras clave: bosque, gestión sostenible, índices espectrales, Sentinel-2, puntos de ruptura.

Estimation of forest disturbances from satellite image time series and the application of the BFAST algorithm

Abstract: *The study and monitoring of forest disturbances are essential for the sustainable management of natural environments, particularly in Mediterranean contexts where vegetation is exposed to multiple stress factors. The objective of this work is to identify and characterize forest disturbances in a 276,500 ha forested area of eastern Andalusia, using time series of Sentinel-2 satellite images and the calculation of spectral indices: NDVI, NDWI, and NBR. This information was processed using the Breaks For Additive Season and Trend (BFAST) algorithm, which allowed the identification of breakpoints associated with disturbances. The results showed a higher effectiveness of the NDVI spectral index for detecting disturbances in the Mediterranean context, reaching an overall accuracy of 73.64%. for forest disturbance estimation.*

Keywords: *forest, sustanaible management, spectral indices, Sentinel-2, breakpoints.*

1. INTRODUCCIÓN

Las perturbaciones en áreas forestales hacen referencia a la pérdida de biomasa o cobertura del dosel arbóreo por factores de origen tanto natural como antrópico tales como: tormentas, incendios forestales, sequías, plagas o actuaciones selvícolas (Seidl *et al*., 2017). A diferencia del decaimiento forestal, estos procesos se caracterizan por estar más vinculados con eventos puntuales de corta duración, con impactos abruptos sobre la estructura y funcionamiento del ecosistema (Gnilke & Sanders, 2022).

En las últimas décadas se han documentado cambios significativos en la frecuencia, intensidad y extensión espacial de los regímenes de perturbaciones a nivel global, especialmente en áreas forestales (Seidl *et al*., 2017). El cambio climático, junto con la intensificación de eventos extremos climáticos han provocado un cambio en el patrón de actuación de las perturbaciones naturales, tanto en ocurrencia, magnitud como en sincronía. En este contexto, resulta imprescindible implementar herramientas de monitoreo operativo que integren la dimensión espacial y temporal de las perturbaciones, así como la identificación de los principales agentes causales de su desarrollo.

Existen diferentes algoritmos capaces de extraer información de series temporales de imágenes de satélite y aplicarlos al sector forestal (Gitelson *et al*., 2002), entre ellos destacan: *Continuous Change Detection and Classification* (CCDC), *Landsat-based Trends in Disturbance and Recovery Detection* (LandTrendr) y *Breaks for Additive Season and Trend* (BFAST). No obstante, este tipo de algoritmos presentan la limitación de ser más efectivos en la detección de cambios amplios que en la identificación y caracterización de degradaciones sutiles, por lo que en ocasiones se combinan con otras técnicas analíticas como clasificadores de *Random Forest* o análisis de anomalías. En Andalucía, ya existe algún estudio relativo al análisis de perturbaciones forestales, en cuyo caso se analizan las perturbaciones mediante un enfoque integral del riesgo basado en: valor expuesto, magnitud

del peligro, susceptibilidad del ecosistema y la falta de capacidad adaptativa empleando para ello: datos climáticos y forestales como variables auxiliares predictivas en el entorno de Sierra Nevada y Sierra de las Nieves (Navarro & Ariza, 2024).

En este contexto, el objetivo general de esta contribución es identificar perturbaciones forestales presentes en distintas áreas forestales del territorio andaluz. Los objetivos específicos son: (i) evaluar la extensión de las perturbaciones existentes y explorar la severidad de las mismas en base a sus valores de magnitud relatva; (ii) evaluar los índices espectrales NDVI, NDWI y NBR como variables para detectar perturbaciones.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La zona de estudio corresponde con la tesela de Sentinel-2: 30SVG (12.000 km2) en la parte oriental de Andalucía, dentro de la cual se ha trabajado con las superficies forestales arboladas (276.500 ha). Engloba total o parcialmente algunos espacios naturales protegidos de relevancia para el territorio andaluz como es el caso de los Parques Naturales de: Sierra Mágina, Sierra de Cazorla, Segura y las Villas, Sierra de Huétor, Sierra de Baza y Sierra Nevada.

La gama de especies y formaciones forestales es variada, destacando los bosques de frondosas, los bosques mixtos y los bosques de coníferas (Figura 1).Desde 2018 en la zona se han producido distintas perturbaciones derivadas de incendios forestales, sequías, así como una inadecuada gestión forestal. La superficie forestal arbolada cuya información fue obtenida del Mapa Forestal Español (escala 1:50.000) está cubierta principalmente por encinares (*Quercus Ilex), y pinares (Pinus halepensis* y *Pinus nigra).*

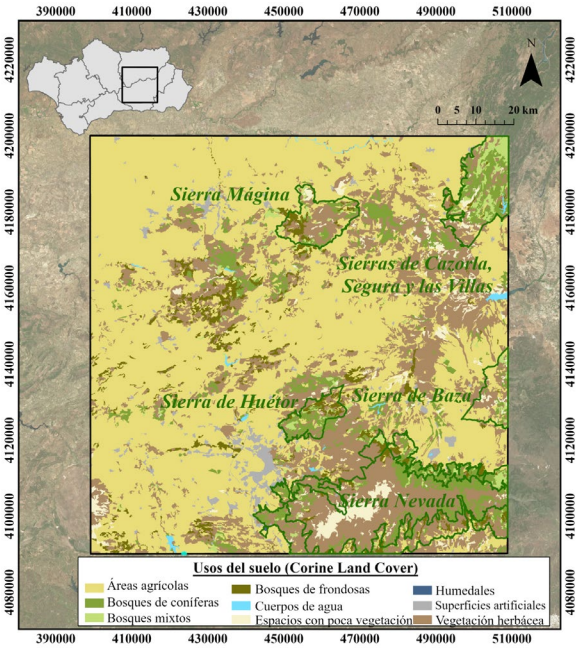


Figura 1. Se utilizó una zona de estudio ubicada en Andalucía oriental que abarcaba una extensión en torno a 12.000 km y que coincidía con una tesela de Sentinel-2.

2.2. Métodos

El algoritmo BFAST fue seleccionado por su capacidad para identificar rupturas significativas en la serie temporal asociada al desarrollo de perturbaciones, lo que permite analizar y detectar perturbaciones a lo largo de toda la serie temporal de análisis: 2018-2024 (Verbesselt *et al*., 2010.).

El algoritmo BFAST modela mediante una descomposición aditiva, la cual representa los datos mediante la suma de tres componentes principales: tendencia, estacionalidad y ruido, haciendo uso para ello de modelos lineales segmentados y funciones armónicas para detectar cambios abruptos en la señal espectral (Verbesselt *et al*., 2010). Este algoritmo es capaz de analizar la serie temporal completa de forma iterativa mediante la división en segmentos temporales independientes estimados por los puntos de ruptura detectados.

La detección de cambios se realizó considerando la magnitud del cambio, definida como la diferencia entre el valor inicial y final de cada segmento de tendencia obtenido mediante el algoritmo BFAST. Se clasificaron como píxeles perturbados aquellos cuya magnitud de cambio se situó por debajo de un umbral relativo definido como: $\mu - 2\sigma$. donde μ representa el valor medio de la distribución de cambios y σ su desviación típica. Este criterio permitió adaptar el umbral a la distribución específica de los datos en cada caso, focalizando el análisis exclusivamente en procesos de degradación. Con el fin de evitar la detección de cambios puntuales o espurios, únicamente se consideraron aquellos casos en los que la dinámica previa y posterior a la ruptura se mantuvo durante un periodo suficientemente prolongado. Para ello, se estableció un tamaño mínimo de segmento temporal de $h = 0{,}125$, asegurando así la persistencia del cambio detectado.

BFAST se aplicó a series temporales Sentinel-2 (reflectancia de superficie) adquiridas de Google Earth Engine mediante el producto Copernicus Sentinel-2 Surface Reflectance Harmonized ("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED") trabajando a una resolución espacial de 10m y aplicando un remuestreo informacional de las bandas originalmente a 20m. Para reducir el impacto de la nubosidad se aplicó un enmascarado de nubes y sombras basado en *S2CloudLess* y se generaron compuestos decenales mediante el cálculo de la mediana de los valores disponibles y se calcularon los índices NDVI, NDWI y NBR como variables de entrada del algoritmo BFAST. Con el objetivo de optimizar el procesamiento y centrar el análisis en masas forestales, el área de estudio se restringió a coberturas forestales medianamente consolidadas, combinando información de los usos forestales del Corine Land Cover y un umbral medio de NDVI por encima de 0,2. Dado que el análisis opera a nivel de píxel, se seleccionó una muestra representativa de 1000 puntos distribuida entre los tres tipos de bosque presentes en el área de estudio a partir de un muestreo aleatorio estratificado y la información del Corine Land Cover, con el propósito de garantizar una adecuada distribución entre los tipos de bosque presente. La validación se llevó a cabo mediante fotointerpretación

visual, considerando el contexto espacial en el que se ubica cada píxel, a partir de la ortofotografía del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) correspondiente al año 2022, adoptado como periodo de referencia para la validación. Asimismo, se definió una ventana temporal de validación 2018–2022 para el estrato no perturbado con el objetivo de mejorar la exactitud espacial en relación con el producto de referencia. La muestra de validación se diseñó mediante un muestreo aleatorio estratificado, seleccionándose 100 píxeles en el estrato no perturbado, mientras que para el estrato perturbado se realizó una validación exhaustiva mediante la inclusión de la totalidad de las áreas identificadas como perturbadas según el umbral relativo previamente definido.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La descomposición de la serie temporal del índice NBR (2018-2024) evidenció la presencia de rupturas espectrales significativas en determinadas zonas del área de estudio; no obstante, únicamente el 2,3 % de los píxeles analizados fueron clasificados como perturbados conforme al criterio de detección establecido, mientras que el NDVI identificó un 3,06% de píxeles perturbados, así como el NDWI un total de 2,27%. A pesar de la relativa concordancia en la proporción total de áreas detectadas entre los tres índices, debemos considerar que las diferencias existentes pueden devenir de la configuración espectral de los índices, donde el NBR responde con mayor eficiencia a alteraciones abruptas, mientras que el NDVI y el NDWI pueden responder a cambios más sutiles en vegetación y humedad.

La distribución de los valores de magnitud de las áreas perturbadas indican una mayor sensibilidad a perturbaciones intensas por parte del índice NBR, ya que nos encontramos ante el valor medio más negativo: μ = −0,2938, así como el valor mínimo más extremo: -0,6982, siendo un comportamiento esperado debido a la respuesta de este índice para identificar alteraciones abruptas. El NDWI en su caso presenta una respuesta más homogénea en dicha detección relacionado con la sensibilidad del contenido hídrico en la vegetación, presentando una media algo más baja: μ = −0,2863 y una menor dispersión de los valores existentes.

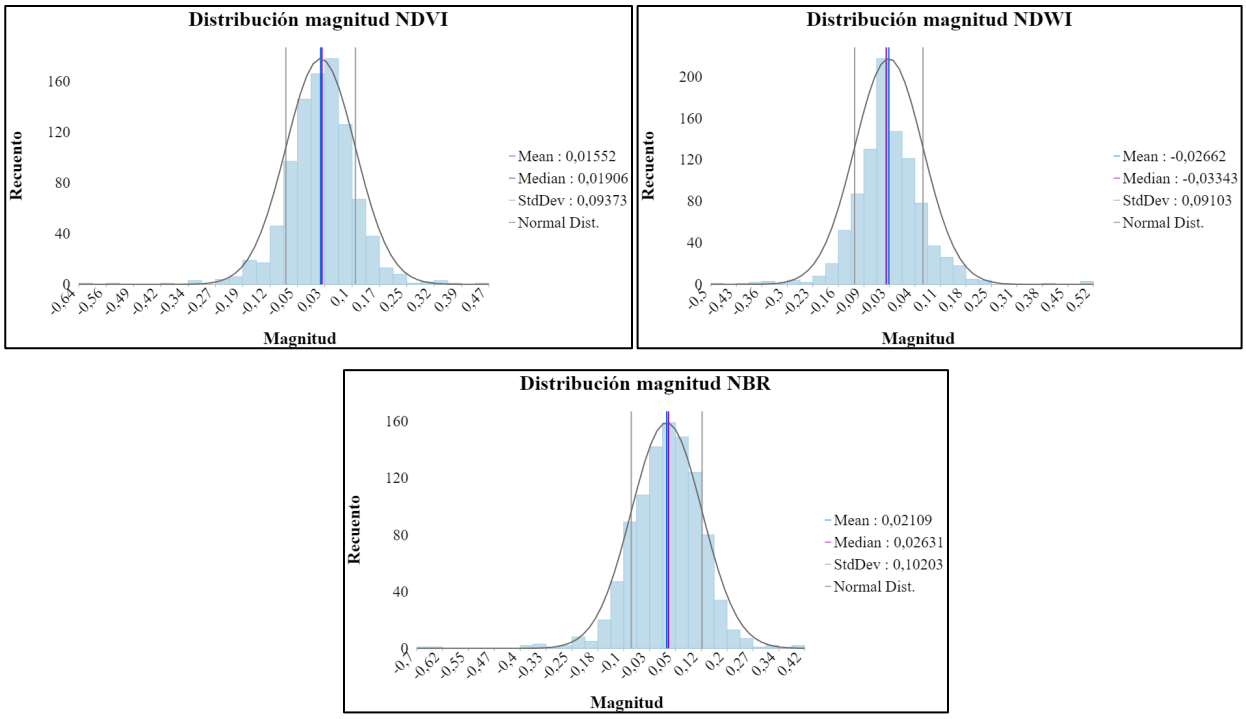


Figura 2. Histograma de distribución de los valores de magnitud del cambio para las tres series temporales analizadas.

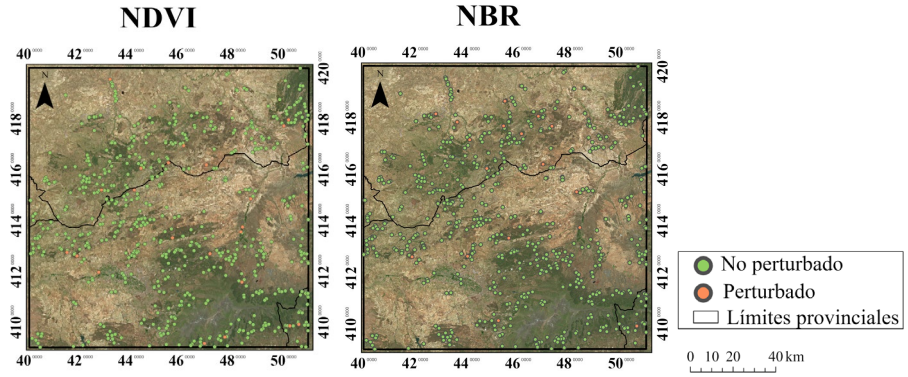


Figura 3. Identificación de áreas perturbadas y no perturbadas para las series temporales de análisis del NDVI y NBR (2018-2024).

Considerando que, con anterioridad, se había identificado que los píxeles de las masas forestales de coníferas eran las más afectadas por perturbaciones y la operatividad del algoritmo para trabajar a nivel de píxel, se optó por analizar un caso concreto de perturbación severa en masas forestales de coníferas detectado por el índice NDWI. En dicha serie podemos observar valores que oscilan entre -1 y -0,2, lo que indica un bajo contenido hídrico en el follaje arbóreo, el ciclo estacional además es ciertamente marcado, donde el contenido en agua es mayor durante las fases de crecimiento activo y menores durante el estrés hídrico del periodo estival. El análisis de la tendencia refleja cambios abruptos tanto a principios del 2022 como a finales del 2023 que pudieran estar asociados a procesos de perturbación, pudiendo indicar cambios relevantes en materia de contenido de agua existente.

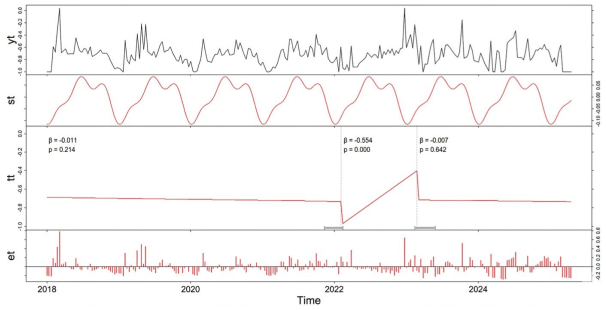


Figura 4. Ejemplo de descomposición de la serie temporal de NDWI en estacionalidad, tendencia y ruido para un píxel de bosque de coníferas.

Tal como se puede ver en la tabla 1, el NDVI fue el índice con mejor desempeño, al presentar un error de comisión moderado (24,14%), y la mayor exactitud global (73,64%). NDWI mostró un comportamiento similar, aunque ligeramente inferior en términos de exactitud global (comisión 22,73%, exactitud global 71,31%). En cambio, NBR registró los mayores errores de comisión (26,09%) y la menor exactitud global (69,92%), lo que indicó una tendencia a sobredetectar perturbaciones y, por tanto, a generar un mayor número de falsos positivos.

Nuestros resultados presentan cierta concordancia con lo reportado por Alonso *et al*. (2023), donde el NDVI presentó el mayor desempeño con una exactitud global cercana al 82%, mientras que el NBR alcanzó una exactitud inferior (70%) asociada a un elevado número de falsos positivos , presentando por tanto, los resultados obtenidos en este estudio un patrón consistente con la literatura existente. Pudiendo provenir las diferencias existentes de las características del área de análisis centrada en Galicia, de la metodología de detección de perturbaciones consistente en arboles de decisión supervisado o del proceso de validación implementado con un mayor número de muestras de validación (Alonso *et al*., 2023).

Tabla 1. Distribución de las métricas de validación.

Índice	Error Comisión	Precisión usuario	Exactitud Global
NDVI	24,14%	75,86%	73,64%
NDWI	22,73%	77,27%	71,31%
NBR	26,09%	73,91%	69,92%

4. CONCLUSIONES

La validación mostró que NDVI fue el índice más adecuado para detectar perturbaciones forestales, en este caso específco, aunque los resultados son similares entre los tres índices como se puede observar en el buen desempeño del NDWI, especialmente en eventos asociados al estrés hídrico. Como líneas de mejora, se planteó incorporar nuevos índices espectrales y comparar BFAST con otros algoritmos de detección de cambios (p. ej., CCDC o LandTrendr). Finalmente, se consideró relevante evaluar la transferibilidad del enfoque a otros contextos similares al andaluz (p. ej., Grecia, Italia y sur de Portugal).

5. AGRADECIMIENTOS

El autor principal de este artículo cuenta con la financiación de la ayuda “Contrato Fundación Ramón Areces de Formación de Investigadores para la elaboración de su tesis doctoral”.

6. REFERENCIAS

Alonso, L., Picos, J., & Armesto, J. (2023). Automatic forest change detection through a bi-annual time series of satellite imagery: Toward production of an integrated land cover map. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *118*, Artículo 103289. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103289

Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment, 80*(1), 76–87. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9

Gnilke, A., & Sanders, T. G. M. (2022). Distinguishing abrupt and gradual forest disturbances with MODIS-based phenological anomaly series. *Frontiers in Plant Science, 13*.

Navarro-Cerrillo, R. M., & Ariza-Salamanca, A. J. (2024). Uncovering hazards and adaptive capacity: A comprehensive risk assessment study in three conservation areas in Spain. *Forest Ecology and Management, 572*, 122324.

Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., *et al*. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change, 7*(6), 395–402.

Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., *et al*. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment, 114*(1), 106–115. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.219

Avances en la clasificación de tipos de bosque en el Sistema Ibérico español: comparación entre series temporales Landsat y AlphaEarth Foundations de Google

Munuera Irurzun, Saioa [1] **Gómez, Cristina** [1,2] **Oli, Aman** [1] **Domingo, Darío** [1,3] **Rodriguez Puerta, Francisco** [1]

[1] iuFOR, EiFAB, Universidad de Valladolid, Soria, España

[2] Department of Geography and Environment, School of Geosciences, University of Aberdeen, UK.

[3] GEOFOREST-IUCA, Department of Geography, University of Zaragoza, España

ORCID: Munuera Irurzun 0009-0008-0512-1465 Gómez 0000-0002-2756-0863 Oli 0000-0003-0748-2607 Domingo 0000-0002-8362-7559 Rodriguez Puerta 0000-0002-4844-1759

Correspondencia: saioa.munuera@uva.es cgomez@uva.es amanwoli1@gmail.com dario.domingo@uva.es francisco.rodriguez.puerta@uva.es

RESUMEN

El estudio compara la clasificación de nueve tipos de bosque en el Sistema Ibérico Norte mediante dos fuentes de datos de teledetección: compuestos estacionales Landsat 8 y 9 y embeddings de AlphaEarth Foundations (AEF) de Google. Los tipos de bosque se distinguen por la morfología foliar (aciculiforme o planifolia) y el hábito foliar (perennifolio, marcescente o caducifolio), incluyendo formaciones puras y mixtas. Se generó una máscara forestal a partir del Mapa Forestal de España y se seleccionaron muestras de entrenamiento. En el caso de Landsat, se calcularon índices espectrales y compuestos estacionales como variables predictoras. Los embeddings de AEF integran información multifuente (óptica, radar, LiDAR y climática) en vectores latentes que sintetizan la dinámica anual y la estructura de la vegetación. Ambas bases de datos se clasificaron con Random Forest y los resultados se compararon píxel a píxel mediante una matriz de confusión. Los resultados muestran mayor estabilidad en las clases puras, especialmente coníferas y caducifolias, y mayor confusión en las clases mixtas. Landsat captó mejor los patrones de hábito foliar, mientras que AEF proporcionó una delimitación espacial más precisa y mejor discriminación estructural.

Palabras clave: *fenología, morfología foliar, embedding, Landsat*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Avances en la clasificación de tipos de bosque en el Sistema Ibérico español: comparación entre series temporales Landsat y AlphaEarth Foundations de Google

Munuera Irurzun, Saioa [(1)], Gómez, Cristina [(1,2)], Oli, Aman [(1)], Domingo, Darío [(1,3)], Rodriguez Puerta, Francisco [(1)]

[(1)] iuFOR, EiFAB, Universidad de Valladolid, España

0009-0008-0512-1465, saioa.munuera@uva.es ; 0000-0003-0748-2607, amanwoli1@gmail.com

0000-0002-4844-1759, francisco.rodriguez.puerta@uva.es

[(2)] Department of Geography and Environment, School of Geosciences, University of Aberdeen.

0000-0002-2756-0863, cgomez@uva.es

[(3)] GEOFOREST-IUCA, Department of Geography, University of Zaragoza, España

0000-0002-8362-7559, dario.domingo@uva.es

Resumen: El estudio compara la clasificación de nueve tipos de bosque en el Sistema Ibérico Norte mediante dos fuentes de datos de teledetección: compuestos estacionales Landsat 8 y 9 y *embeddings* de *AlphaEarth Foundations* (AEF) de Google. Los tipos de bosque se distinguen por la morfología foliar (aciculiforme o planifolia) y el hábito foliar (perennifolio, marcescente o caducifolio), incluyendo formaciones puras y mixtas. Se generó una máscara forestal a partir del Mapa Forestal de España y se seleccionaron muestras de entrenamiento. En el caso de Landsat, se calcularon índices espectrales y compuestos estacionales como variables predictoras. Los *embeddings* de AEF integran información multifuente (óptica, radar, LiDAR y climática) en vectores latentes que sintetizan la dinámica anual y la estructura de la vegetación. Ambas bases de datos se clasificaron con Random Forest y los resultados se compararon píxel a píxel mediante una matriz de confusión. Los resultados muestran mayor estabilidad en las clases puras, especialmente coníferas y caducifolias, y mayor confusión en las clases mixtas. Landsat captó mejor los patrones de hábito foliar, mientras que AEF proporcionó una delimitación espacial más precisa y mejor discriminación estructural.

Palabras clave: fenología, morfología foliar, teledetección, embedding

Advancing forest type classification in the Spanish Iberian System: a comparison between Landsat time series and Google's Alpha Earth Foundations

Abstract: The study compares the classification of nine forest types in the Northern Iberian System using two remote sensing sources: seasonal composites from Landsat 8 and 9 and *embeddings* from *Google's AlphaEarth Foundations* (AEF). Forest types were defined according to leaf morphology (acicular or planifolia) and leaf habit (evergreen, marcescent, or deciduous), including pure and mixed formations. A forest mask was generated from the Forest Map of Spain, and training samples were selected. In the case of Landsat, spectral indices and seasonal composites were calculated as predictor variables. AEF *embeddings* integrate multi-source information (optical, radar, LiDAR, and climatic) into latent vectors that synthesize the annual dynamics and structure of vegetation. Both databases were classified with Random Forest and compared pixel by pixel using a cross-confusion matrix. The results show greater stability in pure classes, especially conifers and deciduous trees, and greater confusion in mixed classes. Landsat better captured phenological patterns, while AEF provided more accurate spatial delimitation and better structural discrimination.

Keywords: spectrophenology, leaf morphology, remote sensing, embedding

1. INTRODUCCIÓN

Conocer y cuantificar la distribución de los tipos de bosque clasificados por su morfología foliar (aciculiforme o plana), y el tipo de hábito foliar (perennifolia, marcescente o caducifolia), es relevante para comprender el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas forestales (Wang *et al*. 2025) y su

adaptabilidad a cambios ambientales (Wang *et al*., 2024). La morfología foliar refleja compromisos ecofisiológicos en la adquisición y conservación de recursos y condiciona la respuesta frente a sequías y heladas (Kim *et al*. 2021). El hábito foliar determina la duración de la temporada fotosintética y por tanto la productividad primaria y los ciclos de carbono y nutrientes, influyendo directamente en el balance energético e hídrico (Reich *et al*., 1995). La distribución espacial de los tipos de morfología y hábitos foliares está regulada por los regímenes térmicos y las propiedades del suelo (Ma *et al*., 2023). Identificar la fenología dominante contribuye a mejorar la modelización de la productividad, los balances de carbono y refuerza la base científica para una gestión forestal resiliente (Andreatta *et al*., 2025).

Las series temporales de teledetección reflejan la dinámica de la fenología foliar, lo que permite realizar clasificaciones coherentes a escala regional y global (Zhang *et al*., 2003; Bolton *et al*., 2020). Para cartografiar la fenología y los tipos de bosque según su hábito foliar se han empleado datos procedentes de múltiples sensores, entre ellos MODIS, Landsat, Sentinel-2 y Sentinel-1 (e.g. Caparrós *et al*., 2019; Bolton *et al*., 2020). Sin embargo, debido a su distribución restringida principalmente al ámbito mediterráneo, los bosques marcescentes han recibido una atención limitada en la literatura. De forma similar, la complejidad estructural y espectral de los bosques mixtos ha dificultado su análisis y clasificación detallada. La creciente disponibilidad de datos, junto con nuevas fuentes y productos derivados, ofrece una oportunidad para avanzar en el nivel de detalle y la especificidad de las clasificaciones espectrales, con el objetivo de generar cartografías más precisas y diferenciadas.

El objetivo de este trabajo es comparar el desempeño de los compuestos estacionales de Landsat y los *embeddings* de *AlphaEarth Foundations* (AEF) de Google para la clasificación de áreas forestales dominadas por nueve tipos de bosque. Estos tipos se definen en función de la morfología foliar (aciculiforme o plana) y del hábito foliar (perennifolia, caducifolia o marcescente), incluyendo además formaciones mixtas resultantes de la combinación de las categorías descritas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Este estudio se desarrolla en el Sistema Ibérico Norte, ámbito que abarca sectores de las provincias de Burgos, Soria y La Rioja, sobre una superficie de aproximadamente 1.5×10^6 hectáreas. La región presenta diversidad de formaciones arbóreas, con existencia de especies aciculifolias y planifolias. Entre las perennifolias predominan coníferas como el pino albar (*Pinus sylvestris*), el pino marítimo (*Pinus pinaster*) y la sabina (*Juniperus thurifera*), así como frondosas esclerófilas como la encina (*Quercus ilex*). Son también abundantes las planifolias marcescentes, como el rebollo (*Quercus pyrenaica*) y el quejigo (*Q. faginea*), junto con planifolias caducifolias como el haya (*Fagus sylvatica*) y el roble albar (*Q. petraea*). La frecuente coexistencia de estas especies da lugar a bosques mixtos con una amplia variedad de combinaciones florísticas y estructurales, lo que incrementa la complejidad ecológica y espectral del territorio.

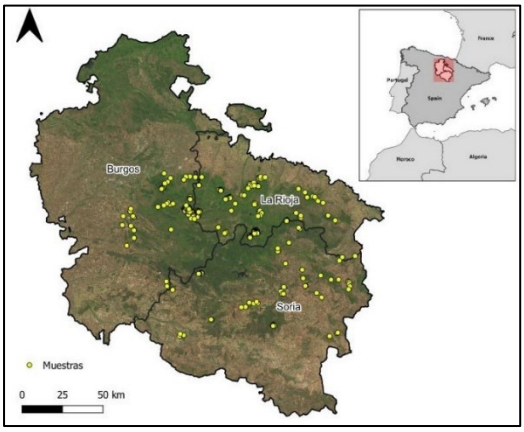


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

2.2. Materiales

2.2.1. Máscara forestal

Se generó una máscara forestal a partir del Mapa Forestal de España (MFE) (MITECO, 2023) seleccionando los polígonos de las clases "arbolado" y "arbolado ralo" para representar las áreas forestales arboladas y excluir el resto de las coberturas. Esta máscara se aplicó para seleccionar los pixeles a considerar en la clasificación de los tipos de bosque.

2.2.2. Muestreo

En el área de estudio se consideraron nueve tipos de bosque. Cuatro de estos tipos están dominados por un solo tipo de especie en cuanto a su morfología y hábito foliar: coníferas (C), frondosas perennifolias (E), frondosas marcescentes (M), y frondosas caducifolias (D). Los otros cinco tipos de bosque presentan una combinación de especies con dos tipos fundamentales de hábito foliar y son los considerados en este trabajo como bosques mixtos, en los cuales las especies dominantes son: conífera y frondosa perennifolia (CE), conífera y frondosa marcescente (CM), conífera y frondosa caducifolia (CD), frondosa caducifolia y frondosa perennifolia (DE), frondosa caducifolia y frondosa marcescente (DM) (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de bosque considerados en este estudio.

Identificador	Tipo foliar	Especies dominantes ejemplo
C	Perenne aciculifolia	*P. sylvestris, P. pinaster, J. thurifera*
E	Perenne planifolia	*Q. ilex*
M	Marcescente planifolia	*Q. pyrenaica, Q. faginea*
D	Decidua planifolia	*F. sylvatica, Q. petraea*
CE	C + E	*J. thurifera + Q. ilex*
CM	C + M	*P. pinaster + Q. faginea*
CD	C + D	*P. sylvestris + F. sylvatica*
EM	E + M	*Q. ilex + Q.faginea*
DM	D + M	*F. slvatica + Q. pyrenaica*

Para la clasificación de los nueve tipos de bosque, se diseñó un muestreo aleatorio simple de 250 muestras, distribuidas proporcionalmente a la superficie de cada cobertura dentro del MFE, garantizando su representatividad. Las muestras de entrenamiento y validación se seleccionaron en zonas representativas mediante inspección visual de imágenes de Google Earth, procurando una distribución espacial homogénea para captar la variabilidad interna de cada clase y minimizar sesgos espaciales (Figura 1).

2.2.3. Fuentes de datos

Se emplearon imágenes Landsat 8 y 9 Collection 2, Level 2 de reflectancia superficial disponibles en *Google Earth Engine* (GEE) correspondientes al periodo comprendido entre diciembre de 2024 y noviembre de 2025. Las imágenes, con tamaño de pixel 30x30m, fueron procesadas para eliminar nubes, sombras y nieve mediante el enmascaramiento de los pixeles identificados en la banda QA_PIXEL (valores 1-5). Posteriormente se calcularon cuatro índices espectrales (NDVI, EVI, NDMI y NBR2) y se generaron compuestos estacionales de invierno (diciembre-febrero), primavera (marzo-mayo), verano (junio-agosto) y otoño (septiembre-noviembre), utilizando la mediana de los datos de cada estación. De este modo, se obtuvo un conjunto de 40 variables predictoras, correspondientes a 10 variables por cada una de las cuatro estaciones.

Como segunda fuente de datos se emplearon los *embeddings* generados por el modelo AEF de Google disponibles en GEE. Estos *embeddings* sintetizan trayectorias temporales coherentes a escala anual, integrando de forma conjunta múltiples fuentes de información geoespacial. Entre ellas se incluyen datos ópticos y térmicos procedentes de satélites como Sentinel-2 y Landsat 8 y 9, datos de radar (Sentinel-1C, ALOS-PALSAR-2), mediciones tridimensionales derivadas de LiDAR (GEDI), modelos digitales de elevación (GLO-30), variables climáticas (ERA5-Land), campos gravitacionales (GRACE) y descripciones textuales asociadas al territorio (Brown *et al*., 2025). Cada píxel de 10x10 m se caracteriza mediante un vector de 64 dimensiones sin unidades físicas directas; cada dimensión forma parte de una representación latente aprendida y no es interpretable de manera independiente.

2.2.4. Procesamiento y clasificación de los datos de teledetección

La clasificación espectral se realizó mediante el algoritmo Random Forest parametrizado con 300 árboles, seleccionando 7 variables aleatorias por nodo, una fracción de muestreo (bagging) de 0.7 y una semilla fija (42) para garantizar la reproducibilidad. Las muestras se dividieron aleatoriamente en 70 % para entrenamiento y 30 % para validación. El modelo se aplicó para clasificar los tipos forestales en el área de estudio, asignando valores numéricos del 1 al 9 a las clases forestales.

El mismo procedimiento de clasificación se aplicó al conjunto de datos AEF, entrenando igualmente un modelo Random Forest con la misma configuración. Este enfoque permitió comparar el rendimiento de ambos conjuntos de datos y determinar cuál ofrecía mejores resultados en la clasificación de tipos de bosque.

2.2.5. Comparación de resultados

Con el fin de analizar las diferencias espaciales entre la clasificación generada mediante el modelo del conjunto de *embeddings* y la clasificación derivada de datos Landsat, se realizó una comparación píxel a píxel entre ambos mapas temáticos. Los datos raster clasificados se armonizaron en términos de sistema de referencia, resolución espacial, extensión geográfica y asegurando la correspondencia espacial exacta entre píxeles. A partir de esta superposición se construyó una matriz de confusión, en la que las filas representan las clases del modelo *embeddings* y las columnas las clases del modelo Landsat. Cada celda de la matriz recoge el número de píxeles asignados simultáneamente a la clase *i* en la primera clasificación y a la clase *j* en la segunda.

La matriz fue posteriormente normalizada por filas para obtener frecuencias relativas (%) que describen la redistribución de cada clase original entre categorías del segundo modelo. El análisis se centró en evaluar las diferencias estructurales entre clasificaciones mediante el estudio de las probabilidades de transición y la representación gráfica de las frecuencias de cambio entre clases. Este enfoque permite identificar patrones sistemáticos de discrepancia entre clasificaciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación píxel a píxel entre las clasificaciones derivadas de los *embeddings* y de los datos Landsat evidenció diferencias significativas entre clases. El análisis de la matriz de confusión normalizada por filas mostró mayor coincidencia en los tipos de bosque puro, destacando C (68.3%), D (58.0%). En contraste, las clases mixtas (CD, CM y DM) mostraron niveles menores de coincidencia (15% - 32%) (ver Tabla 2).

Tabla 2. Matriz de confusión normalizada por filas (%) entre la clasificación de AEF (filas) y Landsat (columnas).

		Landsat								
		C	**D**	**E**	**M**	**CD**	**CM**	**DM**	**EC**	**EM**
Embeddings	**C**	68	0	17	0.2	3.2	3.3	0	7.2	0.4
	D	0.8	58	1.4	12	5	3.3	5	3.8	10
	E	6.8	0.1	41	0.1	0.9	1.1	0.1	45	5.3
	M	0.3	25	0.6	36	1.6	1.1	23	0.7	12
	CD	29	1.5	7.8	2.2	19	15	1.2	16	9.2
	CM	18	1.8	2.9	3.3	7.8	15	3.4	29	18
	DM	0.2	9.4	1.4	12	2.7	5.3	32	2.8	34
	EC	2.3	0	20	0.1	0.6	0.5	0.1	69	7.2
	EM	0.5	0.4	4.5	1.9	0.8	0.9	3.5	42	45

Se identificaron discrepancias entre clases próximas, como E y EC: el 44.8% de los píxeles clasificados como E en los e*mbedding* fueron asignados como EC con Landsat. De forma similar, la clase EM presentó una elevada confusión con EC (42.2%). Estos resultados sugieren que las mayores discrepancias entre modelos

se concentran en clases mixtas o en transiciones entre formaciones estructuralmente afines.

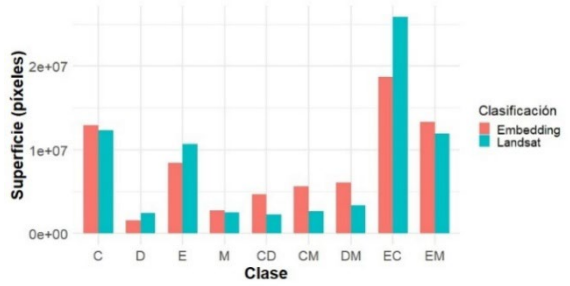


Figura 2. Comparación de la superficie total asignada a cada tipo de bosque por las clasificaciones de embeddings y Landsat.

La Figura 3 compara la clasificación obtenida con imágenes Landsat (A, C, E) y con *embeddings* (B, D, F). En A-B se observa que Landsat capta la estacionalidad y la marcescencia, mientras que estas diferencias no se reflejan en los *embeddings*. En C-D, la menor resolución de Landsat hace que los caminos aparezcan como una clase diferenciada, mientras que en los *embeddings* desaparecen al no corresponder a ninguna categoría temática. Finalmente, en E-F, Landsat confunde *Q. ilex* con *P. halepensis*, mientras que el modelo basado en *embeddings*, al incorporar información estructural, evita esta confusión y clasifica homogéneamente como pinar.

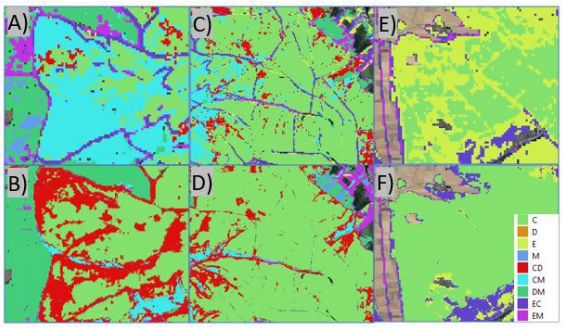


Figura 3. Comparativa entre clasificaciones; Landsat (A, C, E) y embeddings (B, D, F).

4. CONCLUSIÓN

La comparación de los resultados obtenidos en la clasificación de tipos de bosque en el Sistema Ibérico Norte español, mediante compuestos estacionales de Landsat y *embeddings* de *AlphaEarth Foundations (AEF)*, revela una elevada capacidad de ambas fuentes para discriminar con detalle distintas morfologías y hábitos foliares. No obstante, se identificaron diferencias atribuibles a características intrínsecas de los datos: la mayor resolución espacial de AEF permitió una delimitación más precisa de formaciones heterogéneas, mientras que la mayor riqueza temporal de los datos Landsat favoreció una mejor captación de los patrones fenológicos de los distintos tipos de bosque.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido en parte financiado con fondos de la Agencia Estatal de Investigación (AEI) a través del proyecto PID2023-147393OB-I00. Saioa Munuera disfruta de una beca predoctoral Banco Santander (CONTPR-2024-315).

6. REFERENCIAS

Andreatta, D., Buchmann, N., Jucker, T., *et al*. 2025. Diverging trends in plant phenology and productivity across European mountains in a warming world, *Agricultural and Forest Meteorology,375*, 110874, https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110874

Bolton, D.K., Gray, J.M., Melaas, E.K., *et al*. 2020. Continental-scale land surface phenology from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment, 240*, 111685, https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111685.

Brown, C.F., Kazmierski, M.R., Pasquarella, V.J., *et al*. 2025. AlphaEarth Foundations: An embedding field model for accurate and efficient global mapping from sparse label data (Version 2). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2507.22291.

Caparros-Santiago, J.A., Rodriguez-Galiano, V. 2024. Analysing long-term spatiotemporal land surface phenology patterns over the Iberian Peninsula using 250 m MODIS EVI2 data. *Science of The Total Environment, 954*, 176453, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176453

Kim, J., Kim, Y., Zona, D. *et al*. 2021. Carbon response of tundra ecosystems to advancing greenup and snowmelt in Alaska. *Nat Commun 12*, 6879. https://doi.org/10.1038/s41467-021-26876-7

Ma, H., Crowther, T.W., Mo, L. *et al*. 2023. The global biogeography of tree leaf form and habit. *Nat. Plants 9*, 1795–1809. https://doi.org/10.1038/s41477-023-01543-5

MITECO. 2023. "Most Up-to-Date Version of the Spanish Forest Map." https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/biodiversidad/mfe.html.

Reich, P.B., Walters, M.B., Ellsworth, D.S. 1992. Leaf life-span in relation to leaf, plant, and stand characteristics among diverse ecosystems. *Ecological Monographs 62* (3), 365-392. https://doi.org/10.2307/2937116

Wang, Y., Yang, D., Vargas, G., *et al*. 2024. Leaf habit differentiation explains trait tradeoffs across savanna woody plants. *Forest Ecosystems, 11*, 100190. https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100190.

Wang, L., Li, P., Peng, Y., Ren, P. *et al*. 2025. The widely increasing sensitivity of vegetation productivity to phenology in northern middle and high latitudes. *Geophysical Research Letters, 52*, e2024GL113892. https://doi.org/10.1029/2024GL113892

Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., *et al*. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment, 84*(3), 471–475. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.224

Clasificación automatizada basada en series temporales y variables estructurales a partir de sensores remotos (S2, S1 y LiDAR).

Pugni Stanek, Tomas Luis [1,2] **González González, Isabel** [1] **Tomé, Jose Luis** [1] **Esteban Cava, Jessica** [1] **Algeet Abaquero, Nur** [1] **Recuero Pavon, Laura** [2] **Merino De Miguel, Silvia** [2]

[1] Agresta Sociedad Cooperativa, C/ Duque de Fernán Núñez, 2, 1º, 28012, Madrid, España.

[2] Grupo de investigación Geo-QuBiDy, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Ramiro de Maeztu. s/n 28040 Madrid. España

ORCID: Pugni Stanek 0009-0000-2527-1657 González González 0009-0002-1455-9174 Tomé 0000-0003-2298-9115 Esteban Cava 0000-0001-8350-5343 Algeet Abaquero 0000-0003-0819-6549 Recuero Pavon 0000-0001-5474-4900 Merino De Miguel 0000-0002-4764-5311

Correspondencia: tomas.pugni@upm.es igonzalez@agresta.org jltome@agresta.org jesteban@agresta.org nalgeet@agresta.org laura.recuero@upm.es silvia.merino@upm.es

RESUMEN

La clasificación precisa de las masas forestales es esencial para la gestión sostenible y la modelización de riesgos naturales. Este estudio evalúa la capacidad de discriminación de tres especies forestales (Pinus sylvestris, Quercus pyrenaica y Fagus sylvatica) en el Monte de Utilidad Pública de Villoslada de Cameros (La Rioja), mediante un enfoque de teledetección multitemporal y multisensor. Se integraron datos ópticos (Sentinel-2), de radar (Sentinel-1) y estructurales (LiDAR-PNOA) para caracterizar la fenología y estructura de la vegetación. La metodología partió de parcelas monoespecíficas del Inventario Forestal Nacional (IFN4) y datos locales, aplicando un sobremuestreo espacial mediante puntos aleatorios para corregir el desbalanceo de clases entre coníferas y frondosas. Tras generar un vector de 416 características, se utilizó el algoritmo de Eliminación Recursiva de Características con Validación Cruzada (RFECV) para seleccionar las 20 variables más robustas, optimizando el modelo. Los resultados mostraron una precisión global del 96,1%, identificando como predictores críticos la banda del Red-Edge (B6), el índice de Verdor del Tasseled Cap (TCG) y la polarización VH. Aunque la separación entre coníferas y frondosas fue excelente, se observó una ligera confusión entre las especies de frondosas debido a su similitud fenológica. Se concluye que las series temporales y las variables estructurales podrían ser determinante para mejorar la precisión en la automatización de la identificación de especies en inventarios forestales a gran escala.

Palabras clave: *Fusión de Datos, Inventario nacional, Fenología, Periodograma, RFECV, Retrodispersión*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Clasificación automatizada basada en series temporales y variables estructurales a partir de sensores remotos (S2, S1 y LiDAR).

Pugni Stanek, Tomas Luis [1,2], González González, Isabel [1], Tomé, Jose Luis [1], Esteban Cava, Jessica [1], Algeet Abaquero, Nur [1], Recuero Pavon, Laura [2], Merino De Miguel, Silvia [2]

[1] Agresta Sociedad Cooperativa, 1º, España.

0009-0002-1455-9174, igonzalez@agresta.org ; 0000-0003-2298-9115, jltome@agresta.org

0000-0001-8350-5343, jesteban@agresta.org ; 0000-0003-0819-6549, nalgeet@agresta.org

[2]Grupo de investigación Geo-QuBiDy, Universidad Politécnica de Madrid.

0009-0000-2527-1657, tomas.pugni@upm.es ; 0000-0001-5474-4900, laura.recuero@upm.es

0000-0002-4764-5311, silvia.merino@upm.es

Resumen: La clasificación precisa de las masas forestales es esencial para la gestión sostenible y la modelización de riesgos naturales. Este estudio evalúa la capacidad de discriminación de tres especies forestales (*Pinus sylvestris*, *Quercus pyrenaica* y *Fagus sylvatica*) en el Monte de Utilidad Pública de Villoslada de Cameros (La Rioja), mediante un enfoque de teledetección multitemporal y multisensor. Se integraron datos ópticos (Sentinel-2), de radar (Sentinel-1) y estructurales (LiDAR-PNOA) para caracterizar la fenología y estructura de la vegetación. La metodología partió de parcelas monoespecíficas del Inventario Forestal Nacional (IFN4) y datos locales, aplicando un sobremuestreo espacial mediante puntos aleatorios para corregir el desbalanceo de clases entre coníferas y frondosas. Tras generar un vector de 416 características, se utilizó el algoritmo de Eliminación Recursiva de Características con Validación Cruzada (RFECV) para seleccionar las 20 variables más robustas, optimizando el modelo. Los resultados mostraron una precisión global del 96,1%, identificando como predictores críticos la banda del *Red-Edge* (B6), el índice de Verdor del Tasseled Cap (TCG) y la polarización VH. Aunque la separación entre coníferas y frondosas fue excelente, se observó una ligera confusión entre las especies de frondosas debido a su similitud fenológica. Se concluye que las series temporales y las variables estructurales podrían ser determinante para mejorar la precisión en la automatización de la identificación de especies en inventarios forestales a gran escala.

Palabras clave: Fusión de Datos, Inventario nacional, Fenología, Periodograma, RFECV, Retrodispersión.

Advances in National Forest Inventory: Automated Classification Based on Time Series and Structural Variables Using Remote Sensing (S2, S1, and LiDAR).

***Abstract**: Accurate classification of forest stands is essential for sustainable management and natural hazard modeling. This study evaluates the discrimination capability of three forest species (Pinus sylvestris, Quercus pyrenaica, and Fagus sylvatica) in the "Monte de Utilidad Pública" of Villoslada de Cameros (La Rioja), using a multi-temporal and multi-sensor remote sensing approach. Optical (Sentinel-2), radar (Sentinel-1), and structural (LiDAR-PNOA) data were integrated to characterize vegetation phenology and structure. The methodology was based on monospecific plots from the National Forest Inventory (IFN4) and local data, applying spatial oversampling with random points to correct class imbalance between conifers and broadleaves. After generating a vector of 416 features, the Recursive Feature Elimination with Cross-Validation (RFECV) algorithm was used to select the 20 most robust variables, optimizing model parsimony. The results showed an overall accuracy of 96.1%, identifying the Red-Edge band (B6), the Tasseled Cap Greenness index (TCG), and VH polarization as critical predictors. Although the separation between conifers and broadleaves was excellent, slight confusion was observed among broadleaf species due to their phenological similarity. It is concluded that time series and structural variables are decisive for automating large-scale forest inventory.*

***Keywords**: Data Fusion, Phenology, Forest Inventory, RFECV, Backscatter.*

1. INTRODUCCIÓN

La clasificación de masas forestales mediante teledetección ha evolucionado más allá del inventario tradicional, convirtiéndose en un recurso clave para la gestión de riesgos naturales (Shaban, 2022). Disponer de información detallada sobre la composición específica y la estructura de la vegetación es crítico para la modelización de incendios forestales, permitiendo estimar la propagación y la intensidad de llama potencial. Asimismo, estos datos son fundamentales para la planificación de tratamientos de selvicultura preventiva y para obtener la caracterización precisa del territorio.

Actualmente, la disponibilidad de datos provenientes de sensores multiespectrales como Sentinel-2 y Landsat (Shaban, 2022), hiperespectrales como PRISMA y de radar de apertura sintética (SAR) como Sentinel-1, facilita la monitorización de la estructura y fenología forestal. Sin embargo, la integración de estas fuentes masivas requiere metodologías precisas para evitar la redundancia de información y optimizar los modelos predictivos mediante algoritmos de Machine Learning (Maxwell *et al*., 2018).

Estudios previos han demostrado la eficacia de combinar series temporales con variables estructurales (Immitzer *et al*. 2016). Complementariamente, los sensores SAR permiten caracterizar la estructura forestal y el contenido de humedad mediante el análisis de sus distintas polarizaciones, siendo capaces de detectar cambios independientemente de la cobertura nubosa (Woodhouse *et al*., 2012). Finalmente, la tecnología LiDAR se consolida como la herramienta más precisa para la modelización tridimensional de la estructura del bosque (Wulder *et al*., 2012).

En este contexto, Immitzer *et al*. (2016) evaluaron la clasificación de especies basada en firmas espectrales, obteniendo una precisión global del 63,5% mediante un enfoque basado en píxeles. No obstante, la inclusión de series temporales resulta determinante, ya que permite capturar las dinámicas fenológicas particulares de cada especie, aportando información que va más allá de la respuesta espectral en una única fecha(Persson *et al*., 2018).

El objetivo de este estudio es clasificar las especies forestales arboladas presentes en el Monte de Utilidad Pública de Villoslada de Cameros (La Rioja), con el fin evaluar el rendimiento de la integración de datos de diferentes sensores, concretamente Sentinel 1, Sentinel 2 y LiDAR, en la discriminación entre distintas especies forestales.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de Estudio

La zona de estudio (Figura 1) corresponde al Monte de Utilidad Pública n.º 141, ubicado en el término municipal de Villoslada de Cameros (La Rioja) con una superficie total de 14.646,88 ha. Las principales formaciones forestales presentes en el área son el pinar (*Pinus sylvestris*), el rebollar (*Quercus pyrenaica*) y el hayedo (*Fagus sylvatica*). **Figura 1**

2.2. Materiales

2.2.1. Datos de campo (Verdad terreno)

Para garantizar una muestra representativa, el estudio combina datos del Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4) con parcelas propias de AGRESTA, que complementan la información oficial.

2.2.2. Sensores remotos

Se han integrado tres fuentes de datos complementarias. **Sentinel-2 (Óptico):** Datos multiespectrales para obtener reflectancia de la cubierta (2018-2025), **Sentinel-1 (Radar):** Datos de retrodispersión (SAR) en banda C (2018-2025), y **LiDAR (PNOA):** Datos de la tercera cobertura del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (2024).

2.3. Métodos

El estudio se fundamenta en el análisis multitemporal y multisensor de parcelas dominadas por una única especie. Para entrenar el modelo *Random Forest*, se aplicó un algoritmo de Eliminación Recursiva de Características con Validación Cruzada (RFECV), seleccionando las variables explicativas óptimas a partir del vector de características inicial. Debido al desbalanceo de las muestras detectado (dominancia de *Pinus sylvestris* sobre *Quercus pyrenaica* y *Fagus sylvatica*), se realizó un sobremuestreo (oversampling) mediante la generación de puntos aleatorios en rodales puros de las citadas especies obtenidos a partir de la cartografía de la ordenación del monte en 2024 obteniendo un total de 486 puntos. Este procedimiento garantiza la equitatividad de la muestra y la robustez estadística del análisis posterior (**Figura** 1).

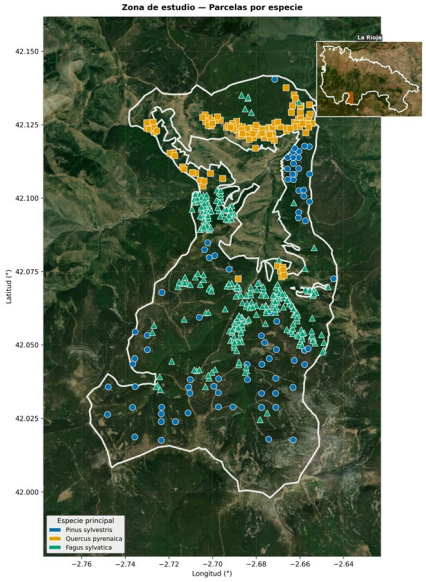


Figura 1 Mapa de la distribución de parcelas por especies.

A partir de la información de Sentinel 2, se analizaron las dinámicas de las bandas espectrales y se calcularon los índices Tasseled Cap; y a partir de los datos Sentinel 1, se utilizaron las polarizaciones ascendentes y descendentes, el Radar Vegetation Index y el Normalized

Difference Polarization Index. Se obtuvieron todas las imágenes derivadas de Sentinel-1 y 2 aplicando a este último la máscara de nubes (SCL), se regularizaron las series a una frecuencia semanal (52 imágenes por año), se imputaron los valores faltantes mediante una interpolación lineal y se descompusieron en tendencia, estacionalidad y residuo, (**Figura 3**).

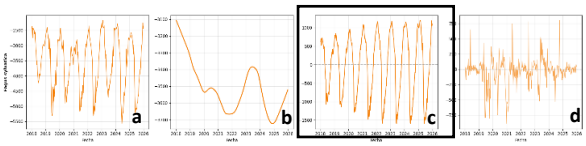


Figura 1 Serie de tiempo (a) descompuesta en tendencia (b), estacionalidad (c) y residuo (d), remarcando la estacionalidad.

La dinámica de las series temporales se analizó únicamente a través de la componente de estacionalidad utilizando dos métodos complementarios que exploran diferentes dimensiones de la serie (Box *et al*., 2016)(Figura 4). Desde la perspectiva temporal, la función de autocorrelación se utilizó para evaluar la memoria de la serie a los retardos de 6, 12, 18 y 24 meses, caracterizando así la persistencia de la serie (Sáenz *et al*., 2024). Además, se utilizó el test Q de Ljung-Box para evaluar el contenido de información de la componente estacional Desde la perspectiva frecuencial, el periodograma, permitió la identificación del periodo dominante caracterizando así la estacionalidad en función del número, la amplitud y estabilidad de los ciclos estacionales. La significancia de la estacionalidad se evaluó mediante la prueba Kappa de Fisher (Recuero *et al*., 2019).

Además, a partir de la componente de estacionalidad, se calcularon las siguientes métricas: media y desviación estándar, el área bajo la curva, los valores máximos y mínimos, y estadísticas anuales.

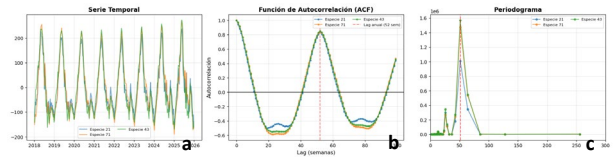


Figura 2. Ejemplo de la Componente de estacionalidad (a), función de autocorrelación (b) y periodograma (c) para la banda 5.

Finalmente, se normalizaron los datos LiDAR respecto a la trayectoria de vuelo para derivar métricas estructurales y radiométricas, incluyendo estadísticos de altura (extremos, media, percentiles), cobertura ($> 2m$, FHD) y momentos de la distribución de intensidad (media, desviación, asimetría y curtosis) y del primer retorno (Wulder *et al*., 2012).

La integración de los sensores generó un vector inicial de 416 características por parcela. Dada la alta dimensionalidad de este conjunto de datos, que dificulta la reproducibilidad y la interpretación ecológica de las dinámicas estudiadas, el primer paso del análisis consistió en una selección rigurosa de variables. El objetivo fue identificar el mínimo de predictores necesario para maximizar la precisión del modelo.

Se empleó el algoritmo RFECV, para seleccionar un subconjunto óptimo de 20 variables. Este método, basado en validación cruzada, maximiza la precisión predictiva evitando el sobreajuste y garantiza la escalabilidad computacional del modelo. La **Tabla 1** muestra las variables seleccionadas.

Tabla 1. Variables seleccionadas por categoría.

Categoría	Variables
Bandas Ópticas	$B6_{AMP}, B6_{VER}, B6_{IN}, B6_{PR}, B6_{MIN}, B6_{MAX}, B5_{L104}, B5_{Q1}, B5_{Q104}$
Índices Tasseled Cap	$TCG_{PR}, TCG_{OT}, TCG_{AMP}, TCG_{MAX}, TCG_{MIN}, TCW_{IN}, TCW_{VER}, TCB_{DESV-}$
Radar Sentinel-1	$VH^{ASC}{}_{PR}, VH^{ASC}{}_{VER}, VH^{ASC}{}_{IN}$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La selección de variables subraya la importancia de los estadísticos estacionales, especialmente los calculados para la banda B6 (740 nm). Su ubicación en la zona de transición del *Red Edge* permite capturar variaciones en el contenido de clorofila, resultando estratégico para discriminar dinámicas fenológicas. Por su parte, la información estructural y de humedad del SWIR se integra de forma optimizada mediante los componentes del *Tasseled Cap*, complementando la caracterización fisiológica de las especies.

El índice de Verdor (TCG) del *Tasseled Cap* resultó crucial para la diferenciación de especies, especialmente durante las fases de primavera y otoño. Además, métricas derivadas como la amplitud de la estación permitieron cuantificar la *fuerza del ciclo* vegetativo (Recuero *et al*., 2019), aportando información clave sobre la intensidad de la respuesta fenológica de cada especie.

En cuanto a la caracterización estructural, la polarización cruzada VH de Sentinel-1 (órbita ascendente) resultó determinante. Esta variable captura la dispersión volumétrica del dosel, permitiendo diferenciarla en momentos clave (primavera, verano e invierno). Por último, el análisis de autocorrelación aportó información sobre la estabilidad fenológica: la media de los valores de autocorrelación en el retardo 104 (Lag_{104}) y el estadístico Q a este mismo retardo revelaron la consistencia del ciclo a dos años vista. Los resultados del modelo, desglosados por especie y a nivel global, se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2 Resultados del modelo tras la prueba.

Clase / Métrica	Precisión	Recall	F1-Score
Pinus sylvestris	0.94	1.00	0.97
Quercus pyrenaica	0.94	1.00	0.97
Fagus sylvatica	1.00	0.95	0.98
Macro promedio	0.96	0.98	0.97
Promedio ponderado	0.97	0.97	0.97
Accuracy global	—	—	0.97

El modelo demostró un alto rendimiento general, reflejado en métricas elevadas de Precisión, *Recall* y *F1-Score*. La discriminación a nivel de grupo funcional (coníferas vs. frondosas) fue excelente, aportando el mayor peso a la precisión global y evidenciando una baja tasa de error. Sin embargo, al descender al nivel de especie dentro de las frondosas (*Fagus sylvatica vs. Quercus pyrenaica*), se observó una leve disminución en la precisión. A pesar de ello, los resultados confirman que las series temporales y las bandas del Red Edge son determinantes para la caracterización forestal en el entorno de Villoslada de Cameros.

De acuerdo con los resultados obtenidos tras la clasificación multitemporal, se observa una gran capacidad de distinguir las especies dominantes en la zona de estudio. Esto se alinea con resultados obtenidos en otros estudios (Esteban Cava *et al*., 2025; Persson *et al*., 2018). Estos estudios muestran la capacidad de Sentinel 2 de discriminar las especies forestales mediante Random Forest. Si bien el enfoque realizado en este estudio nos muestra que el enfoque temporal y las dinámicas de las especies nos permiten alcanzar unos resultados muy buenos para la zona de estudio, es necesario ampliar la zona para obtener mayores puntos de muestreo y conocer la precisión a una escala mayor de esta metodología. También será interesante conocer como es el rendimiento en zonas de masas mixtas.

4. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que la integración de series temporales es determinante para la discriminación de especies forestales en el entorno de Villoslada de Cameros. Los resultados validan que las bandas del Red-Edge y los índices derivados de Tasseled Cap poseen la sensibilidad suficiente para separar especies con dinámicas similares. Futuras investigaciones se orientarán a ampliar la zona de estudio para evaluar la capacidad de generalización del modelo ante una mayor diversidad de especies.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Copernicus por aportar datos multiespectrales y radar, al IGN por la cesión de los datos LiDAR y a la Comunidad de Madrid por la cofinanciación del doctorado industrial de Tomás Pugni Stanek (IND2024/AMB-34193).

6. REFERENCIAS

Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2016). *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons, Inc.

Esteban Cava, J., González, I., & Tomé, J. L. (2025). *Discriminación de especies de pino mediante imágenes satelitales de Sentinel-2 y PRISMA en el distrito forestal Terra de Lemos*. http://prisma-i.it/index.php/en.

Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016). First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central Europe. *Remote Sensing*, *8*(3). https://doi.org/10.3390/rs8030166

Maxwell, A. E., Warner, T. A., & Fang, F. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: an applied review. *International Journal of Remote Sensing*, *39*(9), 2784–2817. https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343

Persson, M., Lindberg, E., & Reese, H. (2018). Tree Species Classification with Multi-Temporal Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, *10*(11), 1794. https://doi.org/10.3390/rs10111794

Recuero, L., Litago, J., Pinzón, J. E., Huesca, M., Moyano, M. C., & Palacios-Orueta, A. (2019). Mapping Periodic Patterns of Global Vegetation Based on Spectral Analysis of NDVI Time Series. *Remote Sensing*, *11*(21), 2497. https://doi.org/10.3390/rs11212497

Sáenz, C., Cicuéndez, V., García, G., Madruga, D., Recuero, L., Bermejo-Saiz, A., Litago, J., de la Calle, I., & Palacios-Orueta, A. (2024). New Insights on the Information Content of the Normalized Difference Vegetation Index Sentinel-2 Time Series for Assessing Vegetation Dynamics. *Remote Sensing*, *16*(16). https://doi.org/10.3390/rs16162980

Shaban, A. (2022). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing* (pp. 1–14). https://doi.org/10.1007/978-3-031-15549-9_1

Woodhouse, I. H., Mitchard, E. T. A., Brolly, M., Maniatis, D., & Ryan, C. M. (2012). Radar backscatter is not a “direct measure” of forest biomass. *Nature Climate Change*, *2*(8), 556–557. https://doi.org/10.1038/nclimate1601

Wulder, M. A., White, J. C., Nelson, R. F., Næsset, E., Ørka, H. O., Coops, N. C., Hilker, T., Bater, C. W., & Gobakken, T. (2012). Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, *121*(47), 196–209. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.001

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.226

Estimación de la edad de los bosques de la península Ibérica a partir de datos de Inventario Forestal Nacional y de teledetección

Rodes Blanco, Marina [1,2] **Astigarraga, Julen** [3] **Pugh, Thomas A. M.** [3] **Cruz-Alonso, Verónica** [1] **Miguel, Sofía** [1,2] **Bravo-Hernández, Miriam** [1] **Grajera-Antolín, Cristina** [1] **Tijerín-Triviño, Julián** [1,2] **Zavala, Miguel A.** [1] **Vayreda, Jordi** [4] **Vilà-Cabrera, Albert** [5] **Ruiz-Benito, Paloma** [1,2]

[1] Universidad de Alcalá. Department of Life Sciences, Forest Ecology and Restoration Group (FORECO), Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares 28805, Spain

[2] Universidad de Alcalá. Department of Geology, Geography and Environment. Environmental Remote Sensing Research Group (GITA), Alcalá de Henares 28805, Spain

[3] Department of Earth and Environmental Sciences, Lund University, Lund S-223 62, Sweden

[4] CREAF, Campus Bellaterra (UAB), Cerdanyola del Vallès, Catalonia, Spain

[5] Biosciences Department. Faculty of Science, Technology and Engineering. University of Vic – Central University of Catalonia (UVic–UCC), C. de la Laura, 13, 08500, Vic, Catalonia, Spain

ORCID: Rodes Blanco 0000-0001-9326-5101 Astigarraga 0000-0001-9520-3713 Pugh 0000-0002-6242-7371 Cruz-Alonso 0000-0002-0642-036X Miguel 0000-0002-1341-8022 Bravo-Hernández 0009-0001-6117-507X Grajera-Antolín 0000-0002-3694-5909 Tijerín-Triviño 0000-0001-9576-4780 Zavala 0000-0003-1456-0132 Vayreda 0000-0002-9538-7361 Vilà-Cabrera 0000-0001-7589-7797 Ruiz-Benito 0000-0002-2781-5870

Correspondencia: marina.rodes@uah.es julenastigarraga@gmail.com thomas.pugh@mgeo.lu.se veronica.cruz@uah.es sofia.miguelr@uah.es miriam.bravo@uah.es cristina.grajera@uah.es julian.tijerin@uah.es ma.zavala@uah.es j.vayreda@creaf.uab.cat albert.vila@uvic.cat paloma.ruizb@uah.es

RESUMEN

Los bosques desempeñan un papel esencial en la regulación del ciclo de carbono, y la edad forestal es una variable clave para estimar su capacidad de almacenar carbono en la biomasa. Sin embargo, la falta de información espacialmente continua y detallada sobre la distribución de edades limita su uso. La estimación de edad a nivel nacional enfrenta importantes desafíos por la dependencia de datos de campo obtenidos en parcelas de inventarios forestales, los cuales ofrecen alta precisión, pero son espacialmente discontinuos y costosos de obtener. En este contexto, la teledetección ofrece una oportunidad para complementar la información de campo mediante el uso combinado de series temporales de Landsat y datos LiDAR, lo que permite generar estimaciones de edad más precisas y a mayores resoluciones. El objetivo de este trabajo es generar un mapa nacional de edad forestal para 2010 a 0.5 ° y 30 m de resolución, integrando inventarios nacionales, perturbaciones forestales detectadas a partir de series Landsat y alturas derivadas de LiDAR. Para ello, primero generamos un mapa de distribuciones de edad a 0.5 ° de resolución a partir de datos de inventario y de perturbaciones. Posteriormente, reescalamos la distribución de edades a una resolución de 30 m a partir de alturas derivadas de LiDAR, utilizando la relación que existe entre la edad y la altura de los árboles.

Palabras clave: *Edad forestal, estimaciones de edad, observación de la tierra, Inventario Forestal Nacional, modelización espacial*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Estimación de la edad de los bosques de la península Ibérica a partir de datos de Inventario Forestal Nacional y de teledetección

Rodes Blanco, Marina [1,2], Astigarraga, Julen [3], Pugh, Thomas A. M. [3], Cruz-Alonso, Verónica [1], Miguel, Sofía [1,2], Bravo-Hernández, Miriam [1], Grajera-Antolín, Cristina [1], Tijerín-Triviño, Julián [1,2], Zavala, Miguel A. [1], Vayreda, Jordi [4], Vilà-Cabrera, Albert [5], Ruiz-Benito, Paloma [1,2]

[1] Universidad de Alcalá. Department of Life Sciences, Forest Ecology and Restoration Group (FORECO), Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares 28805, Spain.
0000-0002-0642-036X, veronica.cruz@uah.es ; 0009-0001-6117-507X, miriam.bravo@uah.es
0000-0002-3694-5909, cristina.grajera@uah.es; 0000-0003-1456-0132, ma.zavala@uah.es

[2]Universidad de Alcalá. Department of Geology, Geography and Environment. Environmental Remote Sensing Research Group (GITA), Alcalá de Henares 28805, Spain.
0000-0001-9326-5101, marina.rodes@uah.es ; 0000-0002-1341-8022, sofia.miguelr@uah.es
0000-0001-9576-4780, julian.tijerin@uah.es ; 0000-0002-2781-5870, paloma.ruizb@uah.es

[3] Department of Earth and Environmental Sciences, Lund University, Lund S-223 62, Sweden.
0000-0001-9520-3713, julenastigarraga@gmail.com ; 0000-0002-6242-7371, thomas.pugh@mgeo.lu.se

[4] CREAF, Catalonia, Spain.
0000-0002-9538-7361, j.vayreda@creaf.uab.cat

[5] Biosciences Department. Faculty of Science, Technology and Engineering. University of Vic – Central University of Catalonia (UVic–UCC), C. de la Laura, Catalonia, Spain.
0000-0001-7589-7797, albert.vila@uvic.cat

Resumen: Los bosques desempeñan un papel esencial en la regulación del ciclo de carbono, y la edad forestal es una variable clave para estimar su capacidad de almacenar carbono en la biomasa. Sin embargo, la falta de información espacialmente continua y detallada sobre la distribución de edades limita su uso. La estimación de edad a nivel nacional enfrenta importantes desafíos por la dependencia de datos de campo obtenidos en parcelas de inventarios forestales, los cuales ofrecen alta precisión, pero son espacialmente discontinuos y costosos de obtener. En este contexto, la teledetección ofrece una oportunidad para complementar la información de campo mediante el uso combinado de series temporales de Landsat y datos LiDAR, lo que permite generar estimaciones de edad más precisas y a mayores resoluciones. El objetivo de este trabajo es generar un mapa nacional de edad forestal para 2010 a 0.5 º y 30 m de resolución, integrando inventarios nacionales, perturbaciones forestales detectadas a partir de series Landsat y alturas derivadas de LiDAR. Para ello, primero generamos un mapa de distribuciones de edad a 0.5 ° de resolución a partir de datos de inventario y de perturbaciones. Posteriormente, reescalamos la distribución de edades a una resolución de 30 m a partir de alturas derivadas de LiDAR, utilizando la relación que existe entre la edad y la altura de los árboles.

Palabras clave: Edad forestal, estimaciones de edad, observación de la tierra, Inventario Forestal Nacional, modelización espacial

Estimation of forest age in the Iberian Peninsula fr NFI and remote sensing data

***Abstract**: Forests play a key role in regulating the carbon cycle, and forest age is a critical variable for estimating their carbon storage capacity in biomass. However, the lack of spatially continuous and detailed information on age distribution limits its use. Estimating forest age at the national scale faces major challenges due to the reliance on field data from forest inventory plots, which provide high accuracy but are spatially discontinuous and costly to obtain. In this context, remote sensing offers an opportunity to complement field information by combining Landsat time series with LiDAR data, enabling more accurate and higher-resolution age estimates. The aim of this study is to produce a national forest age map for 2010 at 0.5 ° and 30 m resolution, integrating national inventories, forest disturbances detected from Landsat time series, and LiDAR-derived*

heights. To this end, we first generated an age-distribution map at 0.5 ° resolution using inventory and disturbance data. We then rescaled this distribution to 30 m resolution using LiDAR-derived heights and the relationship between tree age and height.

***Keywords**: Forest age, Age estimations, Earth observation, National Forest Inventory, Spatial modelling*

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques juegan un papel crucial en la regulación del ciclo de carbono, fijando CO_2 atmosférico en su biomasa y amortiguando los efectos del cambio global (Bonan, 2008; Harris *et al*., 2021; Sha *et al*., 2022). La edad de los bosques influye directamente en la absorción y almacenamiento de este elemento en los ecosistemas forestales puesto que es uno de los principales determinantes de la cantidad de carbono que los bosques pueden almacenar (Hoover & Smith, 2023; Wei *et al*., 2013). Además, constituye un atributo esencial para la gestión forestal, pues es un factor a tener en cuenta en decisiones relacionadas con la planificación de aprovechamientos, priorización de áreas de conservación y la evaluación de riesgos. Sin embargo, la falta de datos detallados espacialmente continuos dificulta el uso de la edad como una variable clave en análisis a gran escala.

A pesar de los avances recientes en datos globales de edad forestal (Besnard *et al*., 2021; Poulter *et al*., 2018), los productos disponibles presentan una resolución espacial limitada e incertidumbres relativamente elevadas, lo que limita su utilidad en aplicaciones que requieren mayor detalle. Persiste así la necesidad de desarrollar productos con resoluciones más finas y metodologías que permitan capturar patrones locales con mayor precisión.

Uno de los principales desafíos para estimar la edad del bosque a escalas espaciales nacionales y continuas radica en la disponibilidad y calidad de los datos de referencia que cubra adecuadamente la diversidad de condiciones climáticas, estructurales y de legado de uso. Esto es especialmente relevante en zonas de elevada diversidad de composición y estructura, como es el caso de la península Ibérica. Tradicionalmente, la información de edad proviene de parcelas del Inventario Forestal Nacional (IFN), donde se obtienen estimaciones por técnicas directas o indirectas de manera sistemática pero espacialmente discontinua (Villaneva, 2005).

La existencia misiones satelitales de acceso abierto como Landsat, el desarrollo de técnicas de análisis de series temporales y el aumento de la capacidad de procesamiento computacional ha permitido detectar perturbaciones anuales que generan reemplazamiento del bosque a partir de cambios espectrales en series temporales (Senf & Seidl, 2021), proporcionando así una vía para inferir la edad de rodales jóvenes que han experimentado eventos de perturbación recientes, desde 1986. Sin embargo, esta aproximación presenta limitaciones para bosques cuya edad excede el periodo de observación de la serie. En estos casos, sigue siendo indispensable contar con registros de campo u otras fuentes de información histórica que permitan datar adecuadamente los bosques establecidos antes del inicio de la misión Landsat.

Dada la relación bien establecida entre la edad del bosque y su altura (ej.- Zhang *et al*., 2014), la reciente disponibilidad de datos de altura derivados de sensores LiDAR ofrece una oportunidad valiosa para generar estimaciones espacialmente continuas. Estos datos permiten complementar y ampliar la información obtenida en campo, facilitando la producción de mapas de edad a nivel nacional a mayores resoluciones.

El objetivo de este trabajo es generar un mapa de edad de bosques para el año 2010 a 0.5 º y 30 m de resolución, integrando: (i) datos provenientes del Inventario Forestal Nacional, (ii) registros de perturbaciones forestales derivados de la serie temporal Landsat (Senf & Seidl, 2021) y (iii) estimaciones de altura obtenidas a partir de datos LiDAR (Turubanova, 2023). Esta combinación de fuentes de datos permite proporcionar información espacial de la edad de los bosques y avanzar hacia productos precisos y consistentes a escala nacional.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Distribuciones de edad a 1º de resolución

El primer lugar se generaron distribuciones de edad a 1º de resolución. Para ello se usaron datos de edad provenientes del Inventario Nacional Forestal (IFN) y datos del mapa europeo de perturbaciones de Senf & Seidl (2021) que usan compuestos anuales derivados de Landsat (Fig. 1).

2.1.1. Inventario Forestal Nacional

Para considerar el efecto de las condiciones ambientales en las distribuciones de edad se generó esta información en mallas de 1° utilizando los datos del IFN3 (1997-2007) e IFN4 (2008-2022). Los IFN estiman la edad mediante métodos indirectos, como consultas y directos mediante barrenado de los árboles dominantes. La resolución de 1° se seleccionó para garantizar un número mínimo de parcelas con información de edad dentro de cada celda. Se seleccionó el año 2010 por ser el año más próximo al levantamiento de información de las parcelas de inventario utilizadas. Para cada celda, se calculó la mediana de las fechas de realización de los censos.

2.1.2. Perturbaciones

Se calcularon los píxeles perturbados entre 1986 y la mediana de la fecha del censo del IFN por celda, obteniendo distribuciones de edad en la malla de 1º de resolución para los bosques más jóvenes. La edad se calculó como la diferencia entre el año del censo y el año de mayor perturbación.

2.1.3. Distribuciones de edad a 1º de resolución

Las distribuciones finales de edad a 1º de resolución se obtuvieron integrando la información procedente del IFN y de las perturbaciones. Para ello, las edades de rodal derivadas de perturbaciones y las obtenidas a partir del IFN se transformaron en fracciones, ponderándolas según el número de píxeles y de parcelas, respectivamente. Dado que el número de parcelas era muy inferior al de píxeles, las fracciones a nivel de parcela se ajustaron en función de la proporción de bosque no perturbado desde 1986, dentro de cada celda de 1º (i.e. bosques relativamente maduros).

A continuación, se combinaron ambas distribuciones, optando por utilizar exclusivamente la información de perturbaciones para caracterizar los bosques jóvenes (i.e. perturbados posteriormente a 1986) debido a su mayor precisión y cobertura espacial continua en comparación con el IFN. Finalmente, las distribuciones se desplazaron al año 2010 con base en la mediana del año de censo en cada celda.

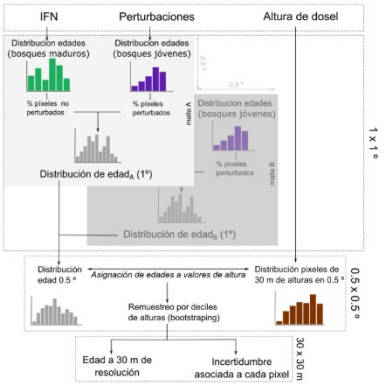


Figura 1: Flujo de trabajo para generar información de edad a 0.5 º y 30 m de resolución.

2.2. Distribuciones de edad a 0.5 º de resolución

El proceso descrito en el punto 2.1 se aplicó a dos mallas de 1º, desplazados entre sí 0.5 º tanto en latitud como en longitud (malla$_A$ y malla$_B$ en Fig. 1), obteniéndose así distribuciones de edad en cada celda de 1 º de ambas mallas. Las distribuciones a 0.5 º se calcularon a partir del promedio de las distribuciones a 1 º, ya que cada celda de 0.5° corresponde a una combinación única de las celdas de malla$_A$ y malla$_B$. Posteriormente se agruparon los resultados en clases de edad de 5 años.

2.3. Estimaciones de edad a 30 m de resolución

Para la obtención del producto final a 30 m de resolución se utilizó la base de datos de altura de bosques europeos de Turbanova (2023) para el año 2010 y disponible para alturas mayores de 5 m. En concordancia, la distribución de edades a 0.5° se acotó usando el tiempo medio que cada celda tardaba en alcanzar los primeros 5 m de altura. Para ello, se identificaron los píxeles perturbados en 1986, se estimó su altura en 2010 y, mediante interpolación lineal, se calculó el número de años promedio necesarios para llegar a 5 m en cada celda.

Se estimaron las edades a 30 m a partir de la distribución de edades de referencia y la distribución de alturas a 30 m en cada celda de 0.5 º. Este proceso se realizó por celda para tener en cuenta las condiciones ambientales en la edad de los rodales. Para ello, se generaron distribuciones de edad manteniendo la proporción de las clases de edad, pero para el número total de los pixeles de bosque con datos de altura en cada celda. Las distribuciones de alturas y edades, ahora con el mismo número de pixeles, se ordenaron de manera creciente y se asignaron por pares de manera que los pixeles de más altura correspondieran a pixeles de más edad asignada. A continuación, los datos se agruparon en deciles de altura, y se tomaron 100 muestras con reemplazo (bootstraps) de cada decil. Este procedimiento, por el rango de alturas mucho menor que el de edades, generó un conjunto de posibles edades para cada píxel de altura, a partir de la cual se calcularon la media (edad asignada) y los intervalos de confianza al 95%. Los datos finales de edad se limitaron superiormente en 140 años ya que la relación entre altura y edad no es lineal y tiende a saturar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

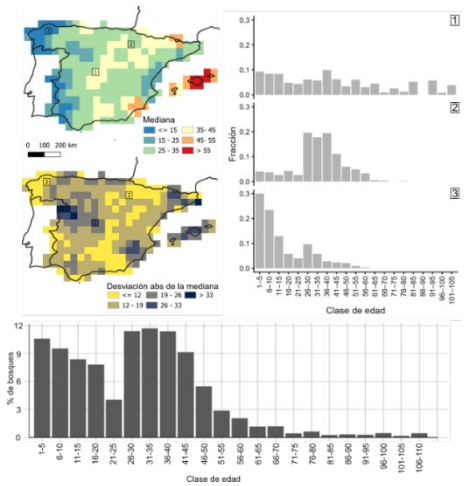


Figura 2: (A) Mediana de las distribuciones de edad en pixeles de 0.5 º y desviación absoluta de la mediana; (C) ejemplos de distribuciones para las celdas señalada en A y B (D) distribución de edades para todo el país.

Las distribuciones de edad calculadas a 0.5 º presentaron medianas de edad entre 7.76 y 64.2 años con una desviación absoluta respecto a la mediana comprendía entre 5.9 y 37 años según la celda (Fig. 2A y 2B). A nivel nacional se observa que las clases dominantes de edad se sitúan entre 1-15 años y entre 26-45 años según los datos de inventario y de perturbaciones (Fig. 2D).

A 30 m el rango de edades se encuentra entre 24 y 110 años con una incertidumbre entre 0 y 64, con una mediana de la incertidumbre de 4 años. Los píxeles de mayor incertidumbre son aquellos que presentan unos mayores valores para la edad.

Al comparar este resultado con otros estudios que cuantifican la edad de las masas forestales en Europa (Besnard *et al*., 2010; Poulter *et al*., 2019; Vilén *et al*.,

2018), en general obtenemos menores incertidumbres, mayor resolución espacial y clases de edad en rangos menos amplios.

Una de las principales limitaciones de la base de datos presentada se debe a que las distribuciones de edad reflejan pocos bosques con más de 100 años, a pesar de que existen numerosos registros que confirman su existencia en la zona de estudio. Esto se debe a la falta de datos de edad disponibles para bosques maduros en el IFN y a que el tamaño del árbol puede no ser altamente representativo de la edad por constricciones ambientales y de legado de uso. Además, la falta de coordinadas precisas en las parcelas del IFN (Schadauer, 2024) dificultan la validación. No obstante, la metodología aquí propuesta permite reescalar los datos de campo y de perturbaciones a resolución de píxel de 30 m, lo que facilita la actualización del producto mejorando las estimaciones de las distribuciones de edad a medida que se incorporen nuevos datos en futuros censos del IFN.

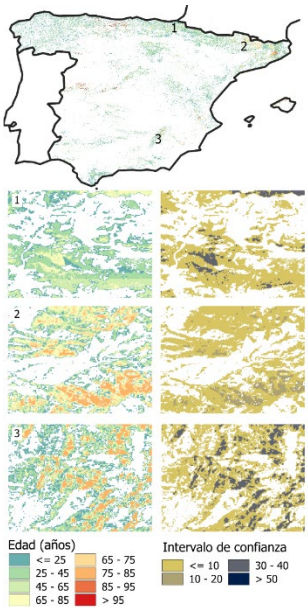


Figura 3: (A) Edad a 30 m de resolución. (B) Ampliación de las zonas 1, 2 y 3 en A, a la izquierda edades a la derecha intervalo de confianza.

4. AGRADECIMIENTOS

Financiación: CLIMB-FOREST Horizon Europe project (No. 101059888), Unión Europea. Las opiniones y puntos de vista expresados son únicamente de los/as autores/as y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea. La Unión Europea no puede ser considerada responsable de ellos. J.A. recibió el apoyo del Programa Posdoctoral de Perfeccionamiento de Personal Investigador Doctor del Gobierno Vasco (POS_2024_1_0026).

Agradecemos a todas las organizaciones y personas que hacen posible la creciente disponibilidad de datos de alta calidad como el caso de los procedentes de los Inventarios Forestales Nacionales, incluido el MITECO (Ministerio de Transición Ecológica y del reto demográfico) en el caso de España; Senf & Seidl en el caso del mapa de perturbaciones; y Turubanova y colaboradores en el caso de los mapas de altura.

5. REFERENCIAS

Besnard, S., Koirala, S., Santoro, M., Weber, U., Nelson, J., Gütter, J., ... & Carvalhais, N. (2021). Mapping global forest age from forest inventories, biomass and climate data. *Earth System Science Data Discussions*, *2021*, 1-22.

Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, *320*(5882), 1444-1449.

Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., De Bruin, S., Farina, M., ... & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, *11*(3), 234-240.

Hoover, C. M., & Smith, J. E. (2023). Aboveground live tree carbon stock and change in forests of conterminous United States: influence of stand age. *Carbon balance and management*, *18*(1), 7.

Poulter, B. *et al.* The global forest age dataset and its uncertainties (GFADv1.1). *NASA National Aeronautics and Space Administration* PANGAEA https://doi.org/10.1594/PANGAEA.897392 (2019).

Senf, C. & Seidl, R. Mapping the forest disturbance regimes of Europe. *Nature Sustainability* **4**, 63–70 (2021).

Schadauer, K., Astrup, R., Breidenbach, J., Fridman, J., Gräber, S., Köhl, M., ... & Riedel, T. (2024). Access to exact National Forest Inventory plot locations must be carefully evaluated. New Phytologist, 242(2).

Sha, Z., Bai, Y., Li, R., Lan, H., Zhang, X., Li, J., ... & Xie, Y. (2022). The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 8.

Turubanova, S., Potapov, P., Hansen, M. C., Li, X., Tyukavina, A., Pickens, A. H., ... & Stolle, F. (2023). Tree canopy extent and height change in Europe, 2001–2021, quantified using Landsat data archive. *Remote Sensing of Environment*, *298*, 113797.

Villanueva, J.A. Tercer Inventario Forestal Nacional (1997-2007) (Ministerio de Medio Ambiente, 2005).

Vilén, T., Gunia, K., Verkerk, P. J., Seidl, R., Schelhaas, M. J., Lindner, M., & Bellassen, V. (2012). Reconstructed forest age structure in Europe 1950–2010. *Forest Ecology and Management*, *286*, 203-218.

Wei, Y., Li, M., Chen, H., Lewis, B. J., Yu, D., Zhou, L., ... & Dai, L. (2013). Variation in carbon storage and its distribution by stand age and forest type in boreal and temperate forests in northeastern China. *PloS one*, *8*(8), e72201.

Zhang, C., Ju, W., Chen, J. M., Li, D., Wang, X., Fan, W., ... & Zan, M. (2014). Mapping forest stand age in China using remotely sensed forest height and observation data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *119*(6), 1163-1179.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.229

Evaluación de la representatividad del producto fenológico "High Resolution-Vegetation Phenology and Productivity" en la España mediterránea

Jeannet Chaves, Guilhem Nicolás [1] **Rodríguez Galiano, Víctor Francisco** [1] **Caparrós Santiago, José Antonio** [1]

[1] Universidad de Sevilla, Andalucía, España

ORCID: Jeannet Chaves 0000-0002-6824-4840 Rodríguez Galiano 0000-0002-5422-8305 Caparrós Santiago 0000-0003-3369-8356

Correspondencia: gjeannet@us.es vrgaliano@us.es jacaparros@us.es

RESUMEN

La fenología vegetal, o fitofenología, constituye un indicador clave de la dinámica ecológica y de la respuesta al cambio global. El producto fenológico High-Resolution Vegetation Phenology and Productivity (HR-VPP), desarrollado en el marco del Copernicus Land Monitoring Service (CLMS), proporciona métricas fenológicas (fenométricas) derivadas de Sentinel-2 a una alta resolución espacial (10 m). Sin embargo, la evaluación de su exactitud en regiones mediterráneas, caracterizadas por una elevada heterogeneidad paisajística y fenológica, apenas se ha empezado a abordar recientemente. Este trabajo analiza la representatividad de las fenométricas de HR-VPP en la España mediterránea mediante su validación frente a las observaciones fenológicas de campo gestionadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Se comparan las fenométricas del inicio y final de la estación de crecimiento (SOS y EOS) con fenofases observadas en campo durante el periodo 2018–2020, considerando distintos tipos funcionales de vegetación (i.e., frondosas caducifolias y frondosas perennifolias). La validación se basa en una agregación por fenofases, cubiertas y tipos funcionales en un buffer de 4 km alrededor de cada estación de campo y un posterior análisis de correlación y sesgo temporal. Los resultados muestran una concordancia moderada-alta entre el producto y las observaciones de AEMET, especialmente para EOS (End Of Season, final de la estación de crecimiento). La correlación media para EOS fue de r=0.60 mientras que para el SOS (Start of Season, comienzo de la estación de crecimiento), fue de r=0.58. Las especies perennifolias exhiben los mayores valores de correlación (r=0.75 en promedio), aunque acompañados de sesgos temporales relevantes en primavera. Estos prometedores resultados confirman la utilidad operativa de HR-VPP para el seguimiento fenológico en la España mediterránea. Además, el diferente comportamiento con respecto a otras regiones biogeográficas de Europa subraya la importancia de emplear redes de observación regionales para una validación representativa en biomas complejos.

Palabras clave: *fenología, Mediterráneo, validación, HR-VPP, AEMET*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación de la representatividad del producto fenológico “High Resolution-Vegetation Phenology and Productivity” en la España mediterránea

Jeannet Chaves, Guilhem Nicolás [(1)], Rodríguez Galiano, Víctor Francisco [(1)], Caparrós Santiago, José Antonio [(1)]

[(1)] Universidad de Sevilla, Andalucía, España.

0000-0002-6824-4840, gjeannet@us.es ; 0000-0002-5422-8305, vrgaliano@us.es.

0000-0003-3369-8356, jacaparros@us.es.

Resumen: La fenología vegetal, o fitofenología, constituye un indicador clave de la dinámica ecológica y de la respuesta al cambio global. El producto fenológico High-Resolution Vegetation Phenology and Productivity (HR-VPP), desarrollado en el marco del Copernicus Land Monitoring Service (CLMS), proporciona métricas fenológicas (fenométricas) derivadas de Sentinel-2 a una alta resolución espacial (10 m). Sin embargo, la evaluación de su exactitud en regiones mediterráneas, caracterizadas por una elevada heterogeneidad paisajística y fenológica, apenas se ha empezado a abordar recientemente. Este trabajo analiza la representatividad de las fenométricas de HR-VPP en la España mediterránea mediante su validación frente a las observaciones fenológicas de campo gestionadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Se comparan las fenométricas del inicio y final de la estación de crecimiento (SOS y EOS) con fenofases observadas en campo durante el periodo 2018–2020, considerando distintos tipos funcionales de vegetación (i.e., frondosas caducifolias y frondosas perennifolias). La validación se basa en una agregación por fenofases, cubiertas y tipos funcionales en un buffer de 4 km alrededor de cada estación de campo y un posterior análisis de correlación y sesgo temporal. Los resultados muestran una concordancia moderada-alta entre el producto y las observaciones de AEMET, especialmente para EOS (*End Of Season*, final de la estación de crecimiento). La correlación media para EOS fue de r=0.60 mientras que para el SOS (*Start of Season*, comienzo de la estación de crecimiento), fue de r=0.58. Las especies perennifolias exhiben los mayores valores de correlación (r=0.75 en promedio), aunque acompañados de sesgos temporales relevantes en primavera. Estos prometedores resultados confirman la utilidad operativa de HR-VPP para el seguimiento fenológico en la España mediterránea. Además, el diferente comportamiento con respecto a otras regiones biogeográficas de Europa subraya la importancia de emplear redes de observación regionales para una validación representativa en biomas complejos.

Palabras clave: fenología, Mediterráneo, validación, HR-VPP, AEMET

Evaluating the Representativeness of “High Resolution-Vegetation Phenology and Productivity” phenological product in Mediterranean Spain

***Abstract**: Plant phenology, or phytophenology, is a key indicator of ecological dynamics and response to global change. The High-Resolution Vegetation Phenology and Productivity (HR-VPP) phenological product, developed within the framework of the Copernicus Land Monitoring Service (CLMS), provides phenological (phenometric) metrics derived from Sentinel-2 at high spatial resolution (10 m). However, the assessment of its accuracy in Mediterranean regions, characterized by high landscape and phenological heterogeneity, has only recently begun to be addressed. This study analyzes the representativeness of HR-VPP phenometrics in Mediterranean Spain by validating them against field phenological observations managed by the State Meteorological Agency (AEMET). The phenometrics of the beginning and end of the growing season (SOS and EOS) are compared with phenophases observed in the field during the period 2018–2020, considering different functional types of vegetation (i.e., deciduous broadleaves and evergreen broadleaves). The validation is based on an aggregation by phenophases, coverages, and functional types in a 4 km buffer around each field station and a subsequent correlation and temporal bias analysis. The results show a moderate-high agreement between the product and the AEMET observations, especially for EOS (End Of Season). The average correlation for EOS was r=0.60, while for SOS (Start of Season) it was r=0.58. Evergreen species exhibit the highest*

correlation values (r=0.75 on average), although accompanied by significant temporal biases in spring. These promising results confirm the operational usefulness of HR-VPP for phenological monitoring in Mediterranean Spain.

***Keywords**: phenology, Mediterranean, validation, HR-VPP, AEMET*

1. INTRODUCCIÓN

La fenología vegetal analiza los eventos cíclicos de las plantas como respuesta a factores ambientales (Lieth, 1974). Es un indicador fundamental de la dinámica ecológica y de los impactos del cambio global. En las últimas décadas, el desarrollo de la fenología de superficie terrestre (Land Surface Phenology, LSP) ha permitido estimar métricas fenológicas a partir de series temporales de índices de vegetación derivados de programas de observación de la Tierra, complementando a las tradicionales observaciones fenológicas de campo (Caparros-Santiago *et al*., 2021).

El producto High Resolution Vegetation Phenology and Productivity (HR-VPP), basado en los datos de la misión Sentinel-2, representa un avance significativo proporcionando fenométricas anuales a 10 m de resolución para gran parte de Europa (Copernicus Land Monitoring Service - European Environment Agency, 2024). Sin embargo, casi todos los esfuerzos de calibración y validación se han centrado en regiones templadas oceánicas y continentales, especialmente en Europa Central y Noroccidental para el caso de HR-VPP (Tian *et al*., 2021a)mientras que los paisajes mediterráneos quedan escasamente representados. La complejidad estructural de los ecosistemas mediterráneos, la coexistencia de estratos herbáceos y leñosos con ciclos fenológicos antagónicos, y la elevada diversidad funcional y paisajística dificultan a priori la correspondencia entre la señal satelital y la observación de campo (Caparros-Santiago *et al*., 2021).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Fenología de campo: observaciones fenológicas de AEMET

El estudio se centra en la España mediterránea y submediterránea, definida a partir de las ecorregiones de la WWF. La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) desarrolla y mantiene desde 1990 una red fenológica distribuida por la España peninsular, Baleares y Canarias. En este caso se seleccionaron las observaciones correspondientes al periodo 2018-2020, excluyendo especies agrícolas y herbáceas. Se consideraron las fenofases primaverales (primeras hojas desplegadas, segundas hojas desplegadas) y otoñales (coloración otoñal al 50 % y caída foliar al 50 %), codificadas mediante la escala BBCH. Las especies se agruparon en dos tipos funcionales: frondosas caducifolias (FC) y frondosas perennifolias (FP) (ver Tabla 1).

Tabla 1. Correspondencia entre tipo funcional (TF), género y cubierta del CORINE Land Cover map (CLC).

TF	Géneros	Cubierta CLC
Frondosas caducifolias	Acer, Aesculus, Alnus, Betula, Castanea, Celtis, Corylus, Crataegus, Fagus, Fraxinus, Juglans, Morus, Pistacia, Platanus, Populus, Prunus, Pyrus, Quercus, Robinia, Rosa, Salix, Sambucus, Sorbus, Syringa, Ulmus	Bosque de frondosas (311), bosque mixto (313), monte arbolado y arbustivo de transición (324), áreas verdes urbanas (141)
Frondosas perennifolias	Arbutus, Cistus, Quercus	Bosque de frondosas (311), bosque mixto (313), vegetación esclerófila (323), monte arbolado y arbustivo de transición (324)

2.2. Datos del producto HR-VPP

Se consideraron las fenométricas SOS y EOS, que se derivan del índice *Plant Phenology Index* (PPI) a partir de trayectorias suavizadas mediante funciones dobles logísticas (Jin & Eklundh, 2014). El inicio y final de la estación de crecimiento se definen mediante umbrales, el 25% y el 15% de la amplitud, respectivamente. La resolución espacial de HR-VPP es alta, de 10 m (Copernicus Land Monitoring Service - European Environment Agency, 2024).

2.3. Estrategia de validación

La estrategia de validación se resume esquemáticamente en la Figura 2. En primer lugar, las observaciones de campo filtradas se agregaron y promediaron dentro de la misma estación, tipo funcional, estadio fenológico y año. Para cada estación de observación de AEMET se definió un buffer de 4 km de radio, dentro del cual se agregaron las fenométricas de los píxeles correspondientes a las coberturas del mapa CLC asociadas a cada tipo funcional (Fig. 2). De esta forma se pretende reducir el desajuste entre observaciones puntuales y datos satelitales (Rodriguez-Galiano *et al*., 2015). La comparación entre fenofases y fenométricas se realizó mediante correlación lineal, cálculo del sesgo medio y error absoluto medio, diferenciando varios modelos para cada TF y estadio.

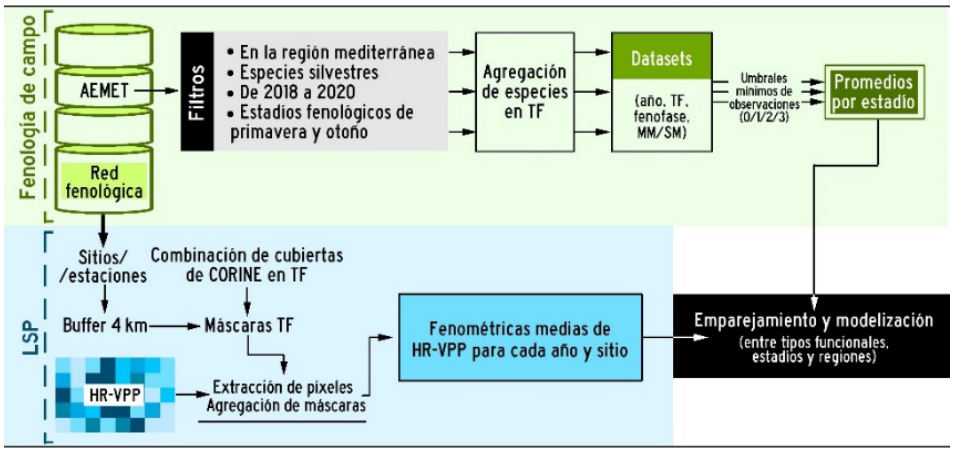


Figura 1. Esquema de la metodología

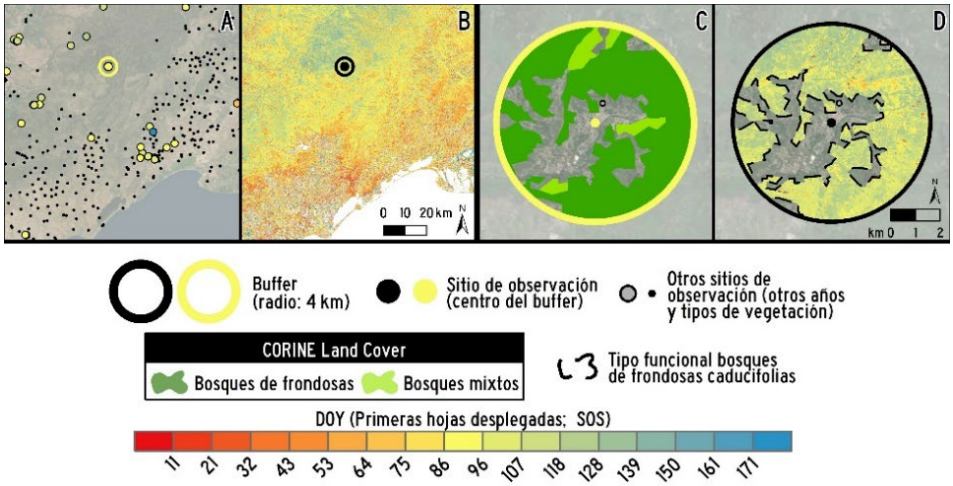


Figura 2. Muestreo, enmascarado y correspondencia dentro de un buffer de 4 km alrededor de una estación de observación fenológica. A) Observaciones de campo distribuidas por la región, mostrando el valor medio del SOS para las frondosas caducifolias para 2018. B) Valor medio del SOS estimado por HR-VPP. C) Coberturas CORINE correspondientes al tipo funcional dentro de un radio de 4 km alrededor de la estación de observación considerada. D) Valores de SOS del producto HR-VPP tras aplicar la máscara dentro del radio de 4 km.

3. RESULTADOS

Los resultados muestran una concordancia consistente entre las fenométricas HR-VPP y las observaciones de campo de AEMET, aunque con claras diferencias entre primavera y otoño. En general, EOS presenta correlaciones superiores a las del SOS, lo cual sugiere una mayor correspondencia entre la señal satelital y la senescencia observada en campo (Fig. 3).

Para las especies FC, las correlaciones son moderadas, especialmente en otoño, con sesgos reducidos. Por su parte, en primavera (r=0,33 y r=0,50 para ambas fenofases), HR-VPP tiende a anticipar el inicio de la estación con respecto a las observaciones de campo. Por otro lado, las FP muestran los valores de correlación más elevados (r=0.62 y r=0.88), alcanzando las correlaciones más altas en primavera, aunque con sesgos negativos importantes, reflejando una anticipación sistemática del reverdecimiento.

Estos patrones sugieren que HR-VPP capta adecuadamente la dinámica estacional en ecosistemas mediterráneos, aunque con limitaciones en la estimación precisa de los eventos primaverales.

4. DISCUSIÓN

La validación con datos de AEMET confirma la utilidad del producto HR-VPP para el seguimiento fenológico de la España mediterránea, especialmente para el EOS. La mejor correspondencia observada en EOS contrasta con estudios previos en otras regiones templadas, donde el SOS suele mostrar mayor robustez, lo que parece deberse a las especificidades fenológicas del dominio mediterráneo, además de su heterogeneidad (Tian *et al*., 2021). Los elevados sesgos primaverales, sobre todo en las especies perennifolias, podrían deberse a la mezcla de señales contrapuestas procedentes del estrato herbáceo y leñoso, así como la diferente definición conceptual entre fenofases observadas y fenométricas satelitales (Jeong *et al*., 2011; Stöckli *et al*., 2008).

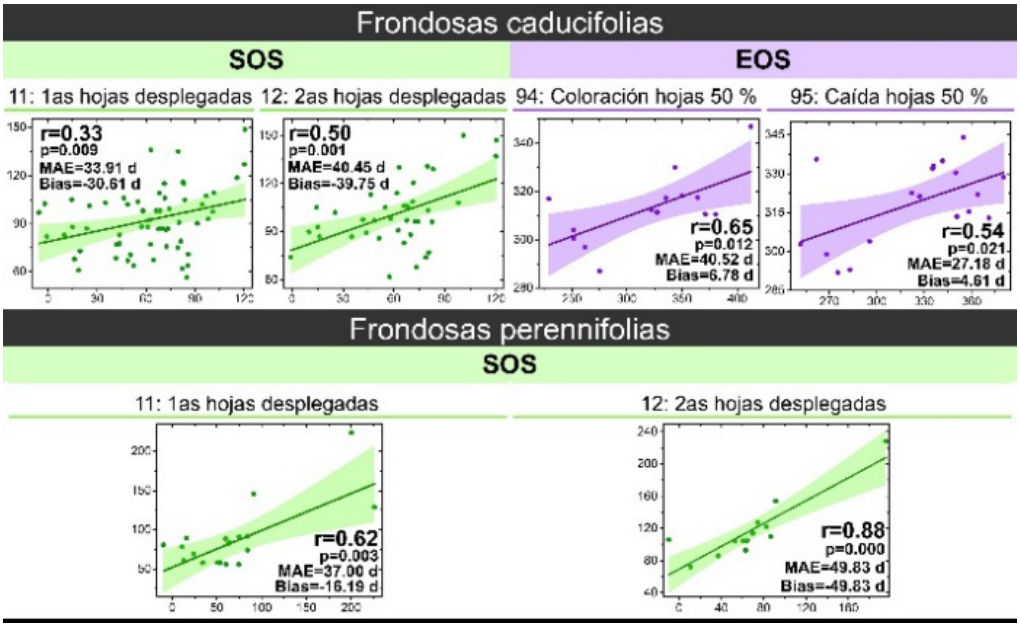


Figura 3 Resultados para cada estadio y TF

Además, la heterogeneidad de los paisajes mediterráneos, así como las limitaciones inherentes a los mapas de cobertura introducen incertidumbre en el proceso de validación. El buen desempeño del producto obtenido con AEMET pone de manifiesto la importancia de emplear redes de observación regionales y ecológicamente representativas en las validaciones de productos fenológicos de alta resolución.

5. CONCLUSIONES

Los resultados indican que el producto fenológico HR-VPP es capaz de representar de forma consistente la fenología de la vegetación mediterránea de España. Aunque se detectan sesgos temporales en primavera, las correlaciones obtenidas respaldan su uso operativo para el monitoreo de la vegetación mediterránea. Esto refuerza la necesidad de validaciones específicas para otros biomas y escalas, más allá de las regiones templadas oceánicas y continentales de Europa Central y Noroccidental. Además, sitúa la red de AEMET como un recurso clave para futuras evaluaciones y ajustes de productos fenológicos en contextos mediterráneos.

6. AGRADECIMIENTOS

Se reconoce a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) la cesión de los datos fenológicos empleados, fundamentales para el desarrollo de este trabajo. También se agradece al proyecto "Desarrollo de productos basados en los nuevos sensores satelitales hiperespectrales europeos e IA para la caracterización de estresores en tierras de cultivo (HiProEstres)", del Plan Estatal 2021-23, con referencia PID2023-152656OB-I00.

7. REFERENCIAS

Caparros-Santiago, J. A., Rodriguez-Galiano, V., & Dash, J. (2021). Land surface phenology as indicator of global terrestrial ecosystem dynamics: A systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *171*, 330–347.

Copernicus Land Monitoring Service - European Environment Agency. (2024). High Resolution Vegetation Phenology and Productivity (HR-VPP), Seasonal Trajectories and VPP parameters. User manual. *European Environment Agency (EEA)*.

Jeong, S. J., Ho, C. H., Gim, H. J., & Brown, M. E. (2011). Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008. *Global Change Biology*, *17*(7), 2385–2399.

Jin, H., & Eklundh, L. (2014). A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. *Remote Sensing of Environment*, *152*, 512–525.

Lieth, H. (1974). *Phenology and Seasonality Modeling*. Springer Berlin.

Rodriguez-Galiano, V. F., Dash, J., & Atkinson, P. M. (2015). Characterising the land surface phenology of Europe using decadal MERIS data. *Remote Sensing*, *7*(7), 9390–9409.

Stöckli, R., Rutishauser, T., Dragoni, D., O'Keefe, J., Thornton, P. E., Jolly, *et al*. (2008). Remote sensing data assimilation for a prognostic phenology model. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *113*(4), 1–19.

Tian, F., Cai, Z., Jin, H., Hufkens, K., Scheifinger, Eklundh, L. *et al*. (2021). Calibrating vegetation phenology from Sentinel-2 using eddy covariance, PhenoCam, and PEP725 networks across Europe. *Remote Sensing of Environment*, *260*.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.234

Análisis comparativo de productos globales de fenología de la superficie terrestre derivados de MODIS, VIIRS y OLCI frente a observaciones in situ de despliegue foliar de la red PEP725

Caparrós Santiago, José Antonio [1] **Jeannet Chaves, Guilhem Nicolás** [1] **Rodríguez Galiano, Víctor** [1]

[1] Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla

ORCID: Caparrós Santiago 0000-0003-3369-8356 Jeannet Chaves 0000-0002-6824-4840 Rodríguez Galiano 0000-0002-5422-8305

Correspondencia: jacaparros@us.es gjeannet@us.es vrgaliano@us.es

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar la coherencia entre las fechas del inicio de la estación de crecimiento (Start Of Season; SOS) derivadas de los productos fenológicos globales MCD12Q2, VNP22Q2 y CLMS LSP y las fechas del primer despliegue foliar registradas mediante observaciones humanas in situ de la red fenológica PEP725 para 2023. Las fechas del SOS se agregaron espacialmente mediante zonas de influencia (buffer) alrededor de cada estación fenológica y se emparejaron con las fechas medianas del primer despliegue foliar por grupos funcionales de vegetación, evaluando su relación mediante el coeficiente de correlación de Pearson (R), el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el sesgo medio. En frondosas caducifolias, el SOS del producto CLMS LSP mostró la mayor coherencia con las observaciones in situ (R = 0,56; RMSE = 15 días; MAE = 13 días; sesgo = 10 días). En coníferas caducifolias, todos los productos alcanzaron correlaciones similares (R ≈ 0,61), aunque el SOS del VNP22Q2 registró las menores discrepancias con las observaciones del primer despliegue foliar (RMSE = 16 días; MAE = 13 días; sesgo medio = -10 días). En coníferas perennifolias, el SOS derivado de MCD12Q2 y VNP22Q2 alcanzó correlaciones elevadas con las observaciones in situ (R = 0,70-0,82), pero los errores y el sesgo fueron muy altos (RMSE, MAE y sesgo ≥ 36 días). En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que no existe un producto universalmente superior y subrayan la necesidad de validar los datos fenológicos derivados de satélite mediante observaciones independientes para una interpretación ecológica más robusta de las fenométricas.

Palabras clave: *Fenología de la vegetación; Validación; Fenométricas; Europa.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis comparativo de productos globales de fenología de la superficie terrestre derivados de MODIS, VIIRS y OLCI frente a observaciones in situ de despliegue foliar de la red PEP725

Caparrós Santiago, José Antonio [(1)], Jeannet Chaves, Guilhem Nicolás [(1)], Rodríguez Galiano, Víctor [(1)]

[(1)] Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla.
0000-0003-3369-8356, jacaparros@us.es ; 0000-0002-6824-4840, gjeannet@us.es
0000-0002-5422-8305, vrgaliano@us.es

Resumen: El objetivo de este estudio fue evaluar la coherencia entre las fechas del inicio de la estación de crecimiento (Start Of Season; SOS) derivadas de los productos fenológicos globales MCD12Q2, VNP22Q2 y CLMS LSP y las fechas del primer despliegue foliar registradas mediante observaciones humanas *in situ* de la red fenológica PEP725 para 2023. Las fechas del SOS se agregaron espacialmente mediante zonas de influencia (buffer) alrededor de cada estación fenológica y se emparejaron con las fechas medianas del primer despliegue foliar por grupos funcionales de vegetación, evaluando su relación mediante el coeficiente de correlación de Pearson (R), el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el sesgo medio. En frondosas caducifolias, el SOS del producto CLMS LSP mostró la mayor coherencia con las observaciones *in situ* (R = 0,56; RMSE = 15 días; MAE = 13 días; sesgo = 10 días). En coníferas caducifolias, todos los productos alcanzaron correlaciones similares (R ≈ 0,61), aunque el SOS del VNP22Q2 registró las menores discrepancias con las observaciones del primer despliegue foliar (RMSE = 16 días; MAE = 13 días; sesgo medio = -10 días). En coníferas perennifolias, el SOS derivado de MCD12Q2 y VNP22Q2 alcanzó correlaciones elevadas con las observaciones *in situ* (R = 0,70-0,82), pero los errores y el sesgo fueron muy altos (RMSE, MAE y sesgo ≥ 36 días). En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que no existe un producto universalmente superior y subrayan la necesidad de validar los datos fenológicos derivados de satélite mediante observaciones independientes para una interpretación ecológica más robusta de las fenométricas.

Palabras clave: Fenología de la vegetación; Validación; Fenométricas; Europa.

Comparative analysis of global land surface phenology products derived from MODIS, VIIRS, and OLCI against in situ leaf unfolding observations from the PEP725 network

***Abstract**: The aim of this study was to assess the consistency between start of season (SOS) dates derived from the global phenological products MCD12Q2, VNP22Q2 and CLMS LSP, and in-situ human observations of the first leaf unfolding recorded by the PEP725 phenological network for the year 2023. SOS dates were spatially aggregated using buffer zones around each phenological station and paired with median leaf unfolding dates by vegetation functional group. Their relationships were evaluated using Pearson's correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and mean bias. For deciduous broadleaf species, SOS derived from CLMS LSP product showed the strongest agreement with in-situ observations (R = 0.56; RMSE = 15 days; MAE = 13 days; bias = 10 days). In deciduous conifers, all products achieved comparable correlations (R ≈ 0.61), although SOS derived from VNP22Q2 exhibited the lowest discrepancies relative to first leaf unfolding (RMSE = 16 days; MAE = 13 days; mean bias = -10 days). For evergreen conifers, SOS estimated from MCD12Q2 and VNP22Q2 showed high correlations with in-situ observations (R = 0.70-0.82) yet were associated with very large errors and pronounced bias (RMSE, MAE and mean bias ≥ 36 days). Overall, these findings indicate that no single product is universally superior and highlight the need to validate satellite-derived phenological data using independent observations to achieve a more robust ecological interpretation of phenometrics.*

***Keywords**: Vegetation phenology; Validation; Phenometrics; Europe.*

1. INTRODUCCIÓN

La fenología de la superficie terrestre (*Land Surface Phenology*; LSP) se define como el estudio de la dinámica de los ciclos estacionales de la vegetación observados desde sensores satelitales (Helman, 2018). Este enfoque fenológico se basa en el análisis de series temporales de índices de vegetación, a partir de las cuales se pueden extraer un conjunto de métricas fenológicas, o fenométricas, asociadas con momentos clave del ciclo estacional, como el inicio (*Start of Season*; SOS) o el final de la estación de crecimiento (*End of Season*; EOS) (Zeng *et al*., 2020).

La importancia de la LSP radica en su capacidad para monitorizar, de forma temporalmente continua y global, la dinámica estacional de la vegetación. Esto la convierte en una herramienta fundamental para el estudio de las interacciones clima–vegetación y la detección de respuestas a la variabilidad climática y al cambio global, así como para aplicaciones en modelización ecológica, agrícola y climática (Caparros-Santiago *et al*., 2021) . Sin embargo, la estimación de fenométricas no está exenta de incertidumbre. Esta incertidumbre está relacionada tanto con las características intrínsecas de los sensores satelitales (e.g., resolución espacial, resolución temporal) como por el índice de vegetación y la metodología empleada para la estimación de LSP (White *et al*., 2009).

En este contexto, la validación de LSP mediante observaciones fenológicas independientes (e.g., observaciones humanas *in situ* a nivel de organismo) resulta esencial para cuantificar las incertidumbres asociadas, identificar posibles sesgos sistemáticos y mejorar la interpretación ecológica de las fenométricas (White *et al*., 2009). Así, en este estudio se pretende evaluar la coherencia entre las fechas del SOS estimadas a partir de los productos globales de LSP derivados de los sensores MODIS (MCD12Q2), VIIRS (VNP22Q2) y OLCI (CLMS LSP), y las fechas de primer despliegue foliar registradas por la red fenológica PEP725, obtenidas mediante observaciones humanas directas a nivel de organismo para el año 2023 (único año común disponible para los tres productos).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos

En este estudio se emplearon tres tipos principales de datos: (i) los productos globales MCD12Q2 (versión 6.1), VNP22Q2 (versión 2.0) y *Copernicus Land Monitoring Service* (CLMS) LSP; (ii) los datos sobre el primer despliegue foliar registrados por la red fenológica PEP725, obtenidos a partir de observaciones humanas directas a nivel de organismo; y (iii) la información cartográfica de las cubiertas del suelo procedente del producto anual MCD12Q1.

El SOS fue obtenido a partir de tres productos globales de LSP: MCD12Q2, VNP22Q2 y CLMS LSP. El producto MCD12Q2 (versión 6.1) proporciona fenométricas globales desde el año 2001 basadas en datos MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*). Estas métricas se generan a partir de series temporales de EVI2 (*two-band Enhanced Vegetation Index*) derivadas de compuestos temporales de 8 días a una resolución espacial de 500 m. Las series temporales son suavizadas mediante *splines* y el SOS se estima empleando una técnica basada en umbrales. Por su parte, el producto VNP22Q2 (versión 2) proporciona fenométricas globales desde 2013 a partir de observaciones del sensor VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*). Estas métricas se derivan de series temporales de EVI2 basadas en compuestos temporales de 3 días a una resolución espacial de 500 m. Las trayectorias fenológicas se ajustan mediante funciones logísticas, a partir de las cuales el SOS se identifica mediante técnicas basadas en derivadas. Finalmente, el producto CLMS LSP, derivado del sensor OLCI (*Ocean and Land Colour Instrument*) a bordo del satélite Sentinel-3, proporciona fenométricas desde el año 2023. Estas métricas se generan a partir de series temporales de PPI (*Plant Phenology Index*), basadas en compuestos de imágenes de 5 días a una resolución espacial de 300 m. Las trayectorias estacionales son suavizadas mediante *splines*, y el SOS se determina empleando una técnica basada en umbrales.

Los datos correspondientes a las fechas del primer despliegue foliar de distintas especies vegetales se obtuvieron a partir de observaciones fenológicas *in situ* registradas en la red paneuropea PEP725, y se utilizaron para la comparación con el SOS derivado de los productos fenológicos satelitales de MODIS, VIIRS y OLCI. Para el año 2023, el estadio fenológico correspondiente al primer despliegue foliar fue registrado en 1.921 estaciones de observación distribuidas a lo largo del continente europeo (Fig. 1).

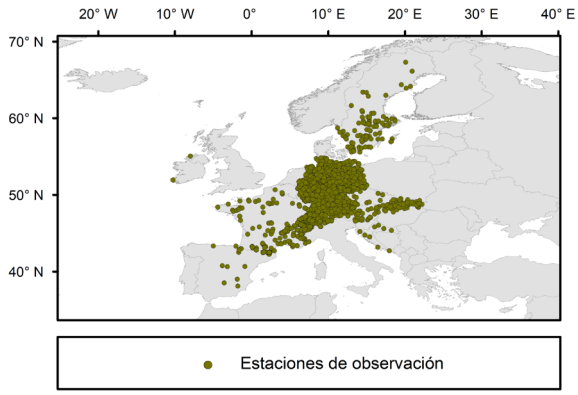


Figura 1. Distribución espacial de las estaciones de observación de la red PEP725 en las que se registraron las fechas del primer despliegue foliar a nivel de organismo durante el año 2023.

La información relativa a las cubiertas del suelo se extrajo del producto anual de clasificación de coberturas de MODIS (MCD12Q1), disponible a una resolución espacial de 500 m. Específicamente, se utilizó el esquema de clasificación del *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP), con el objetivo de identificar las clases de vegetación natural correspondientes al año 2023 en el entorno de cada estación de observación. Dichas clases se emplearon para establecer la correspondencia con los grupos

funcionales de vegetación de los organismos registrados mediante observaciones fenológicas en campo.

2.2. Comparación entre el SOS y el primer despliegue foliar

Los datos fenológicos procedentes de la red PEP725 no suelen incluir la localización espacial precisa de los individuos vegetales dentro de cada estación de observación. Esta limitación introduce una fuente relevante de incertidumbre al relacionar las fenométricas (píxel) con las observaciones fenológicas *in situ* (punto), ya que la señal espectral registrada por el sensor puede no corresponder exactamente a los individuos cuyo estado fenológico se registra en campo. En consecuencia, la comparación directa entre las observaciones fenológicas a nivel de organismo y las fenométricas extraídas del píxel coincidente con la localización de la estación no resulta aconsejable (Tian *et al*., 2021).

Para abordar esta limitación, se definió una zona de influencia (buffer) de 4 km de radio alrededor de cada estación fenológica, con el fin de vincular de forma más robusta las fechas del SOS con las fechas del primer despliegue foliar observadas en campo. Dentro de cada zona de influencia (buffer), las fechas del SOS fueron agregadas calculando el valor mediano de todos los píxeles seleccionados para cada producto. Únicamente se consideraron píxeles clasificados como de máxima calidad según los criterios de calidad específicas de cada producto. Adicionalmente, la selección de píxeles se restringió a los tipos de cobertura del suelo más relacionados con el grupo de vegetación del organismo observado en campo. Se definieron cuatro grupos de vegetación: (i) frondosas caducifolias, incluyendo bosques de frondosas caducifolias, bosques mixtos y sabanas leñosas; (ii) coníferas caducifolias, incluyendo bosques de coníferas caducifolias, bosques mixtos y sabanas leñosas; y (iii) coníferas perennifolias, incluyendo bosques de coníferas perennifolias, bosques mixtos y sabanas leñosas. Dado que el producto fenológico de OLCI es el único conjunto de datos empleado en este estudio cuya resolución espacial difiere de la del producto MCD12Q1, fue necesario garantizar la coherencia espacial durante el filtrado basado en los tipos de cobertura del suelo. Para ello, la información derivada del producto MCD12Q1 (500 m) se remuestreó a la resolución espacial del producto fenológico de OLCI (300 m).

En cuanto a los datos *in situ*, las fechas del primer despliegue foliar se agregaron calculando la mediana de las observaciones correspondientes a cada grupo funcional de vegetación dentro de cada estación. Posteriormente, estas fechas se emparejaron con las fechas medianas del SOS estimadas para el mismo grupo funcional dentro del buffer asociado a cada estación. A partir de estas parejas de datos, la relación entre las observaciones fenológicas *in situ* y las estimaciones satelitales se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson (R), mientras que la magnitud de las discrepancias se cuantificó mediante el error cuadrático medio (*Root Mean Square Error*; RMSE) y el error absoluto medio (*Mean Absolute Error*; MAE), y la tendencia sistemática de las diferencias se evaluó a través del sesgo medio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fechas del SOS derivadas de los productos fenológicos globales de MODIS (MCD12Q2), VIIRS (VNP22Q2) y OLCI (CLMS LSP) fueron evaluadas frente a las observaciones *in situ* del primer despliegue foliar registradas por la red PEP725 en Europa, considerando los principales tipos de vegetación (Fig. 2). En términos generales, el grado de concordancia entre las estimaciones satelitales del SOS y las fechas del primer despliegue foliar mostró una elevada dependencia tanto del tipo de vegetación como del producto fenológico utilizado.

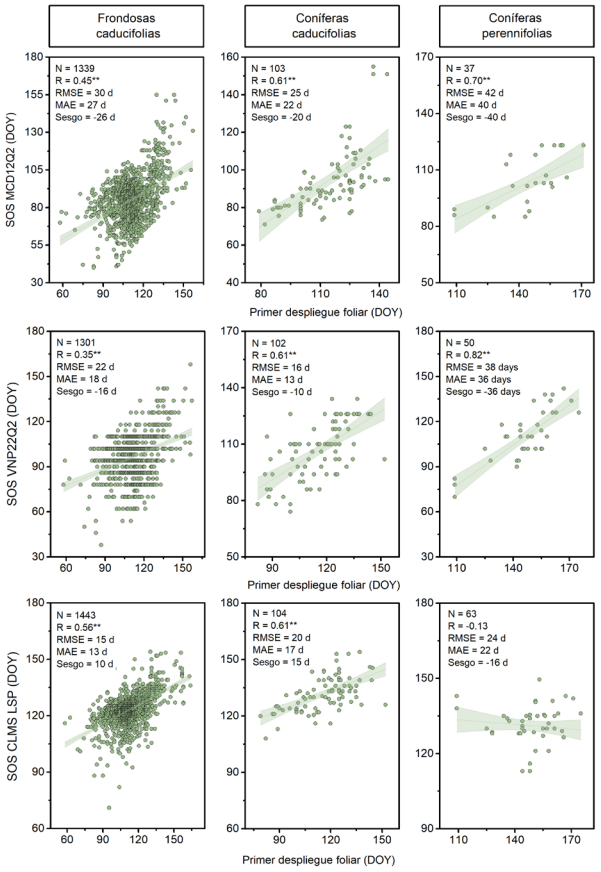


Figura 2. Diagramas de dispersión que muestran la relación entre el SOS derivado a partir de los productos fenológicos MCD12Q2 (MODIS), VNP22Q2 (VIIRS) y CLMS LSP (OLCI) y las fechas observadas del primer despliegue foliar (PEP725) para distintos tipos de vegetación. ** indica correlaciones altamente significativas (p < 0,01)

En las frondosas caducifolias, la correspondencia entre el SOS y las fechas del primer despliegue foliar fue de carácter moderado, con coeficientes de correlación que oscilaron entre R = 0,35 y 0,56. Específicamente, el SOS derivado de CLMS LSP mostró la mejor coherencia con los datos de campo, al registrar la correlación más elevada (R = 0,56), junto con los valores más bajos de RMSE (15 días) y MAE (13 días), y un sesgo medio relativamente reducido (10 días). Por el contrario, los

productos MCD12Q2 y VNP22Q2 mostraron errores más altos (RMSE = 22-30 días; MAE = 18-27 días) y sesgos medios negativos pronunciados (-16 a -26 días), lo que indica una estimación más temprana del SOS con respecto a las fechas observadas del primer despliegue foliar. En las coníferas caducifolias, la concordancia entre el SOS y las fechas del primer despliegue foliar aumentó de forma consistente para todos los productos, con coeficientes de correlación con un valor de R = 0,61. En este caso, el SOS de VNP22Q2 se ajustó mejor a las observaciones de campo, con el menor RMSE (16 días), el menor MAE (13 días) y un sesgo medio relativamente reducido (-10 días). En las coníferas perennifolias, el SOS de los productos MCD12Q2 y VNP22Q2 mostró correlaciones elevadas con las fechas del primer despliegue foliar (R = 0,70-0,82). No obstante, estas altas correlaciones se vieron acompañadas de errores muy elevados (RMSE y MAE > 36 días) y de sesgos negativos acusados ($\geq$ 36 días), lo que pone de manifiesto discrepancias sustanciales en términos absolutos entre las fechas estimadas por satélite y las observadas en campo. En contraste, aunque las diferencias entre el SOS derivado de CLMS LSP y las fechas del primer despliegue foliar fueron menores, la relación entre ambas variables fue muy débil (R = -0,13) y no estadísticamente significativa (p > 0,05).

Estos patrones divergentes entre productos y tipos funcionales de vegetación probablemente reflejan el efecto combinado de la resolución espacial y temporal, el índice de vegetación empleado y las metodologías de estimación fenológica, factores que condicionan la detección del SOS en distintos ecosistemas. En consecuencia, la validación de los productos globales de LSP mediante observaciones independientes resulta esencial para cuantificar incertidumbres, identificar sesgos sistemáticos y mejorar la interpretación ecológica de las fenométricas derivadas por satélite.

4. CONCLUSIONES

La coherencia entre el SOS derivado de los productos fenológicos globales y las observaciones *in situ* del primer despliegue foliar varió según el producto y el tipo de vegetación. En frondosas caducifolias, el producto derivado de OLCI proporcionó los resultados más robustos, ya que el SOS presentó la correlación más alta con el primer despliegue foliar, junto con menores magnitudes de error y un sesgo más contenido. En el caso de las coníferas caducifolias, aunque el SOS derivado de los tres productos mostró niveles de asociación similares con las observaciones de campo, el producto derivado de VIIRS registró las menores discrepancias, con valores de RMSE y MAE más bajos y un sesgo medio menos pronunciado, lo que indica una mejor correspondencia entre las fechas estimadas por satélite y el primer despliegue foliar observado *in situ*. Por el contrario, en coníferas perennifolias, aunque el SOS derivado de los productos de MODIS y VIIRS alcanzó correlaciones elevadas, los errores y los sesgos elevados indican diferencias sustanciales entre las fechas estimadas por satélite y las observadas en campo.

En conjunto, los resultados indican que no existe un producto universalmente superior. Su idoneidad depende del tipo funcional de vegetación y de las características del producto. Futuras investigaciones deberían ampliar el análisis a series temporales más largas y a otras regiones bioclimáticas, con el fin de evaluar la coherencia espacial y temporal de las estimaciones del SOS y mejorar la aplicabilidad de los productos globales de LSP.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero prestado por el proyecto PID2023-152656OB-I00 financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. También quieren expresar su agradecimiento a los colaboradores y proveedores de datos de la iniciativa PEP725, cuyo trabajo y dedicación han hecho posible el acceso a las observaciones fenológicas utilizadas en este estudio.

6. REFERENCIAS

Caparros-Santiago, J. A., Rodriguez-Galiano, V., & Dash, J. (2021). Land surface phenology as indicator of global terrestrial ecosystem dynamics: A systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 171*, 330-347. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.019

Helman, D. (2018). Land surface phenology: What do we really 'see' from space?. *Science of the Total Environment, 618*, 665-673. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.237

Tian, F., Cai, Z., Jin, H., Hufkens, K., Scheifinger, H., Tagesson, T., Smets, B., Van Hoolst, R., Bonte, K., Ivits, E., Tong, X., Ardö, J., & Eklundh, L. (2021). Calibrating vegetation phenology from Sentinel-2 using eddy covariance, PhenoCam, and PEP725 networks across Europe. *Remote Sensing of Environment, 260*, 112456. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112456

White, M. A., de Beurs, K. M., Didan, K., Inouye, D. W., Richardson, A. D., Jensen, O. P., O'Keefe, J., Zhang, G., Nemani, R. R., van Leeuwen, W. J. D., Brown, J. F., de Wit, A., Schaepman, M., Lin, X., Dettinger, M., Bailey, A. S., Kimball, J., Schwartz, M. D., Baldocchi, D. D., Lee, J. T., & Lauenroth, W. K. (2009). Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology, 15*(10), 2335-2359 https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x

Zeng, L., Wardlow, B. D., Xiang, D., Hu, S., & Li, D. (2020). A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment, 237*, 111511. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111511.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.242

Detección de síntomas tempranos de decaimiento en bosques abiertos de encinas mediante imágenes satelitales de muy alta resolución espacial

Martín, M. Pilar [1] **González-Cascón, Rosario** [2] **Burchard-Levine, Vicente** [1] **Casillas-Martínez, Lucía** [1] **Pacheco-Labrador, Javier** [1] **Bareth, Georg** [3]

[1] Laboratorio de Espectro-radiometría y Teledetección Ambiental (SpecLab-CSIC), España

[2] Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC), España

[3] Institute of Geography. University of Cologne, Alemania

ORCID: Martín 0000-0002-5563-8461 González-Cascón 0000-0003-3468-0967 Burchard-Levine 0000-0003-0222-8706 Casillas-Martínez 0009-0002-5306-9776 Pacheco-Labrador 0000-0003-3401-7081

Correspondencia: mpilar.martin@csic.es cascon@inia.csic.es vicente.burchard@csic.es lucia.casillas@csic.es javier.pacheco@csic.es g.baret@uni-koeln.de

RESUMEN

El seguimiento de la salud y productividad de los ecosistemas forestales es posible a partir de un conjunto muy diverso de técnicas que facilitan información a distintas escalas temporales y espaciales. Sin embargo, la integración de estas técnicas aún no se ha implantado de forma eficaz en redes de ámbito global. El proyecto SensOFOREST, en el que se enmarca este estudio, contribuye a la red europea *"ForestWard Observatory"* mediante la implementación de un sistema integrado de observación (SIO) compuesto por sensores terrestres equipados para la transmisión en tiempo real, así como datos multiescalares de teledetección (in situ, drones y satélites). El proyecto se centra en áreas de estudio representativas de dehesas de encina, donde la estructura de la vegetación supone un reto para el estudio del arbolado con imágenes de satélite. En este trabajo se describe la metodología y objetivos generales del proyecto y se presentan algunos resultados de las campañas experimentales realizadas en septiembre de 2024 y julio de 2025 en la estación experimental de Majadas de Tiétar (Cáceres). Los datos biofísicos y espectrales recopilados en estas campañas demuestran el potencial de las imágenes de satélite de muy alta resolución espacial Pléiades Neo para detectar síntomas tempranos de decaimiento, como la pérdida de masa foliar, en encinas potencialmente afectadas por patógenos presentes en el suelo como *Phytophthora cinnamomi.*

Palabras clave: *Quercus ilex, salud forestal, Pleiades Neo, defoliación, pigmentos*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Detección de síntomas tempranos de decaimiento en bosques abiertos de encinas mediante imágenes satelitales de muy alta resolución espacial

Martín, M. Pilar [(1)], González-Cascón, Rosario [(2)], Burchard-Levine, Vicente [(1)], Casillas-Martínez, Lucía [(1)], Pacheco-Labrador, Javier [(1)], Bareth, Georg [(3)]

[(1)] Laboratorio de Espectro-radiometría y Teledetección Ambiental (SpecLab-CSIC), España.
0000-0002-5563-8461, mpilar.martin@csic.es.
0000-0003-0222-8706, vicente.burchard@csic.es.
0009-0002-5306-9776, lucia.casillas@csic.es.
0000-0003-3401-7081, javier.pacheco@csic.es.

[(2)] Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC), España.
0000-0003-3468-0967, cascon@inia.csic.es.

[(3)] Institute of Geography. University of Cologne, Alemania.
0000-0000-0000-0001, g.baret@uni-koeln.de.

Resumen: El seguimiento de la salud y productividad de los ecosistemas forestales es posible a partir de un conjunto muy diverso de técnicas que facilitan información a distintas escalas temporales y espaciales. Sin embargo, la integración de estas técnicas aún no se ha implantado de forma eficaz en redes de ámbito global. El proyecto SensOFOREST, en el que se enmarca este estudio, contribuye a la red europea "ForestWard Observatory" mediante la implementación de un sistema integrado de observación (SIO) compuesto por sensores terrestres equipados para la transmisión en tiempo real, así como datos multiescalares de teledetección (in situ, drones y satélites). El proyecto se centra en áreas de estudio representativas de dehesas de encina, donde la estructura de la vegetación supone un reto para el estudio del arbolado con imágenes de satélite. En este trabajo se describe la metodología y objetivos generales del proyecto y se presentan algunos resultados de las campañas experimentales realizadas en septiembre de 2024 y julio de 2025 en la estación experimental de Majadas de Tiétar (Cáceres). Los datos biofísicos y espectrales recopilados en estas campañas demuestran el potencial de las imágenes de satélite de muy alta resolución espacial Pléiades Neo para detectar síntomas tempranos de decaimiento, como la pérdida de masa foliar, en encinas potencialmente afectadas por patógenos presentes en el suelo como *Phytophthora cinnamomi*.

Palabras clave: Quercus ilex, salud forestal, Pléiades Neo, defoliación, pigmentos

Monitoring early decay symptoms in holm oak open forests using very high-resolution satellite imagery

***Abstract**: Monitoring the health and productivity of forest ecosystems is possible using a wide range of techniques that provide information at different temporal and spatial scales. However, the integration of these techniques has not yet been effectively implemented in global networks. The SensOFOREST project, under which this study is being conducted, contributes to the European ForestWard Observatory network through the implementation of an integrated observing system (IOS) consisting of terrestrial sensors equipped for real-time transmission, as well as multiscale remote sensing data (in situ, drones, and satellites). The project focuses on areas representative of holm oak open forest, where the vegetation structure poses a challenge for the study of tree cover using satellite images. This work describes the objectives and methodology of the project and presents the preliminary results of the experimental campaigns carried out in September 2024 and July 2025 at Majadas de Tiétar research station (Cáceres). The biophysical and spectral data collected in these campaigns demonstrate the potential of Pléiades Neo very high spatial resolution satellite imagery to monitor early decay symptoms, as defoliation, in holm oak trees potentially affected by of soil-borne pathogens such as Phytophthora cinnamomi.*

***Keywords**: Quercus ilex, forest health, Pléiades Neo images, defoliation, pigments*

1. INTRODUCTION

Open forests or wooded grassland ecosystems cover large areas of Mediterranean Europe and are considered hotspots for climate change and biodiversity (Cos *et al*., 2022). They are vital for livestock feed and play a key role in food security in some regions of the planet. They are recently gaining importance as resilient systems because they provide an effective synergy between climate change adaptation and mitigation (Hernández-Morcillo *et al*., 2018). Therefore, these ecosystems are likely to gain importance in the context of climate change adaptation in many regions that are predicted to experience a decline in water availability and an increase in water demand, as well as more severe and prolonged droughts. *Quercus Ilex* L., the dominant species in the Mediterranean open forest, is seriously threatened by several factors, such as increased pathogen's outbreaks or the intensification of extreme weather events which are likely to contribute to its decline. Therefore, it is crucial to monitor how climate change affects the health, growth, and productivity of this forest species. Remote sensing could be a suitable tool for this purpose, but in practice, open forests represent a limitation in Earth observation capabilities from satellite platforms and a serious challenge for the remote sensing and modeling scientific communities. This is because these ecosystems are characterized by complex horizontal and vertical structures where tree and herbaceous vegetation are mixed with different phenological dynamics determined by factors such as drought, grazing, and land use changes. The spectral mixture of all these signals in the same pixel makes it difficult to characterize the individual components. All these factors contribute to making these ecosystems intrinsically difficult to monitor with conventional satellite imagery.

Ground-based automated sensors offering high temporal resolution, combined with very high-spatial resolution data collected by new generation of satellites, including hiperespectral capabilities such as those of the Pixxel hyperspectral imaging constellation (https://www.pixxel.space/hyperspectral-imagery), provide extremely useful complementary information for characterizing the different components of complex ecosystem. These new technological opportunities will facilitate understanding of how these open forests function, assess their response to climate change, and enable the design of management strategies to ensure their sustainability.

We present here the preliminary results obtained in the experimental campaigns undertaken in September 2024 and July 2025 in the context of the SensOFOREST project. This project aims to contribute to the ForestWard Observatory (https://forwards-project.eu/), a monitoring and assessment network that will help demonstrate the impact of climate change on European forests. SensOFOREST will exemplify the integration of sensors and scales at a super-site located in the province of Cáceres, which aims to serve as a reference for the implementation of similar observatories in other open forests at the national, European, and global levels. Biophysical and spectral data on trees with and without visual decay symptoms (defoliation) have been collected and compared in order to determine the biophysical variables at the leaf level that are related to these symptoms and whether this translates into spectral differences at the canopy level that can be detectable by very high spatial resolution satellites such as Pléiades Neo.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Study site

The main study site (super-site) for the SensOFOREST project is the Majadas de Tiétar experimental station (39°56'25" N, 5°46'28" W), which belongs to the ICOS-Ecosystem and ICP Forest networks. It is a typical Spanish *dehesa* with average annual temperature of 16.6 °C and average annual precipitation of 600 mm. It has around 20% tree cover, a density of 25 trees/ha, and an average diameter at breast height (DBH) of 46 cm, making it fully representative of open, evergreen sclerophyllous forests of *Quercus Ilex* L. in southern Europe.

2.2. Multi-scale biophysical and spectral data

In this study, we focus on the analysis of data acquired in two experimental campaigns carried out at the Majadas de Tiétar super-site on September 17 2024 and July 3 2025. During these campaigns, samples were taken and biophysical and spectral variables were measured both at the leaf and canopy levels. All measurements were taken on 12 trees selected in two sampling areas (Fig. 1). Six target trees were identified in each area, three of which had visual decay symptoms in the form of low to moderate defoliation (20 to 60 %) (Fig. 1).



Figure 1. Sampling areas at the Majadas de Tiétar experimental station as observed from the Pléiades Neo sensor on July 3 2025. Trees without symptoms (< 20 % defoliation) are marked in green and those with symptoms of decline (20-60 % defoliation) are marked in yellow in both areas.

In accordance with ICP-Forest guidelines (http://icp-forests.net/), leaves were collected from the upper third of the canopy for foliar sampling. In these open forests, trees show maximum differences in nutrient content, leaf area, water, and pigments between the south and north orientations of the crowns. Therefore, branches from the upper third of both orientations were sampled. Two types

of samples were taken, one at midday including 12 leaves (six from the north and six from the south orientations) on which chlorophyll a and b (Cab) and carotenoids (Cxc) concentrations per unit of leaf area were analyzed by spectrophotometric methods. The second sample, consisting of 100 leaves, was used to estimate the average leaf area (ALA), specific leaf area (SLA), equivalent water thickness (EWT), and nutrients (N and Mg) per unit of leaf area. Additionally, leaf area index (LAI) of the 12 individual trees was measured using a LAI2200-C Plant Canopy Analyzer averaging 4 measurements per tree taken under homogeneous diffuse illumination conditions (at sunset).

During the campaigns, image acquisition was programmed and obtained from the Pléiades Neo satellite. This satellite belongs to an optical constellation of commercial satellites with very high spatial resolution operated by Airbus Defence and Space. Pléiades Neo obtains information in seven spectral bands: Panchromatic: 450-800 nm, Deep Blue: 400-450 nm, Blue: 450-520 nm, Green: 530-590 nm, Red: 620-690 nm, Red Edge: 700-750 nm and Near-infrared: 770–880 nm with a spatial resolution of 30 cm in panchromatic mode and 1.2 m in multispectral mode. In this study, only the multispectral mode bands were used. The images were acquired over the study area around 11:30 UTC. Six vegetation indices (VIs) proposed in the literature for monitoring vegetation status were calculated from the multispectral bands (Table 1). Spectral information from bands and VIs was extracted from the target trees selecting pixels from the crown center and discarding the most peripheral areas to avoid contamination from the senesced grass background and the tree's own shadow projected onto the ground.

Table 1. Vegetation indices calculated from the multispectral bands of the Pléiades Neo image for the pixels selected in the crowns of the sampled trees.

Indices	Formula	Reference
NDVI	(NIR – RED) / (NIR + RED)	Rouse *et al*. 1974
NIRV	(NDVI-0.08)*NIR	Badgley *et al*. 2017
EVI	2.5 * ((NIR – RED) / ((NIR) + (6 * RED) – (7.5 * BLUE) + 1))	Huete *et al*. 1997
OSAVI	(NIR – RED) / (NIR + RED + 0.16)	Rondeaux *et al*. 1996
ReCl	(NIR / Red Edge) – 1	Gitelson *et al* 2003
GNDVI	(NIR – GREEN) / (NIR + GREEN)	Gitelson *et al*. 1996

The biophysical data obtained at the leaf and canopy level and the spectral data derived from the satellite images at the canopy level, were analyzed to determine whether there were significant differences between groups of trees with and without decay symptoms. First, a nonparametric Kruskal-Wallis Test was applied to all biophysical and spectral variables for the two sampling dates. Furthermore, correlations were calculated between the bands, IVs and the biophysical variables that showed significant differences between the two groups of trees, in order to determine the ability of Pléiades Neo images to estimate differences observed at ground level.

3. RESULTS

The Kruskal-Wallis Test applied to the biophysical data only showed significant differences (significance level > 95%) between the groups of trees with and without visual decline symptoms for the variables Cab and LAI (Table 2). As expected, trees with decay symptoms showed lower LAI values associated with the defoliation process. The LAI differences observed between symptomatic and asymptomatic trees were most evident in the September 2024 sampling campaign, likely due to the effect of phenology. Due to logistic constraints, the 2024 LAI measurements could not be taken simultaneously with the leaf sampling but were instead conducted a few months later, in January–February 2025, when holm oaks typically exhibit the lowest LAI values of the year. This would also explain why LAI values are higher in 2025 even in symptomatic trees. Surprisingly, Cab values measured at the leaf level were generally higher in symptomatic trees (Fig.2) which may be related to a compensatory response to defoliation.

In the case of the Pléiades Neo spectral data, individual bands did not show significant differences (Table 2) but three IVs did. Two of them are typically more related with vegetation structure (NDVI and MSR) and the third one is usually applied to the estimation of pigments (ReCl).

Table 2. Results of the nonparametric Kruskal-Wallis Test to analyze difference between trees with and without visual decay symptoms applied to biophysical and spectral variables obtained in the September 2024 and July 2025 experimental campaigns (n=24). The asymptotic significance (Sig.) is shown.

Biophysical	Sig.	Spectral (Pléiades Neo)	Sig.
ALA	0.326	B1	0.298
SLA	0.817	B2	0.488
EWT	0.453	B3	0.751
LAI	**0.001**	B4	0.402
Cab	**0.043**	B5	0.862
Cxc	0.149	B6	0.817
N	0.525	NDVI	**0.04**
Mg	0.817	NIRV	0.248
		EVI	0.453
		OSAVI	0.133
		ReCl	**0.05**
		GNDVI	0.184

Regarding the correlation between biophysical and spectral variables, we found similar moderated but significant (significance level > 95%) positive correlations between the VIs NDVI, MSR and ReCl derived from the Pléiades images and the Cab measured at the leaf level (Pearson ~0.45). The correlations were similar (Person 0.43 to 0.46) with the three IVs and LAI. However, in this case, the sign of the correlation was negative. This is

contrary to expectations and confirms the inverse relationship found between the tree LAI and the Cab measured at the leaf level in the sampled trees.

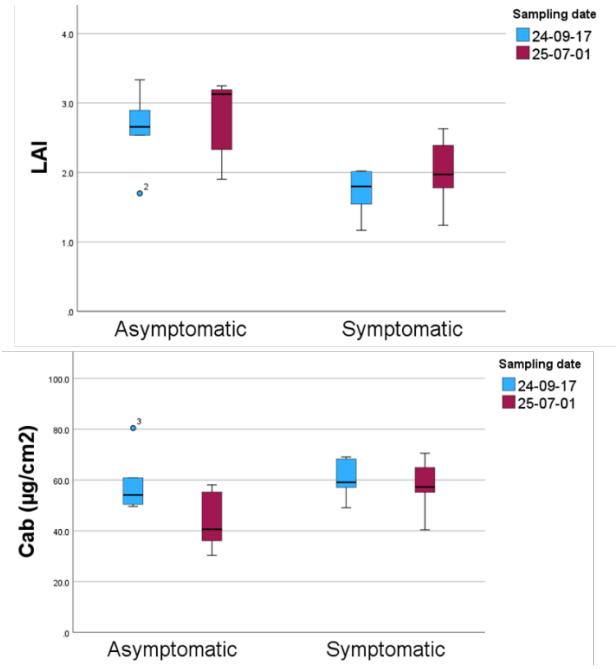


Figure 2. Box plots of leaf area index (LAI) and Cab measured in the experimental campaigns (September 2024 and July 2025) on selected trees with and without visual decay symptoms.

The preliminary results obtained in the two experimental campaigns reveal that it is possible to estimate some critical variables related to forest health conditions (pigment content and defoliation) using very high spatial resolution satellite images such as Pléiades Neo. However, the spectral indices analyzed were not exclusively related to the differences observed in specific foliar parameters such as Cab but inversely related to canopy level structural variables such as LAI. The differences detected in water content between trees with and without symptoms were not detectable at the canopy level with this type of imagery. This can be related with the spectral resolution of Pléiades Neo images, with broad bands that do not cover the shortwave infrared region which makes it difficult to observe absorption features of water and other components such as proteins, lignin and cellulose that could reveal stress conditions and are detectable in this spectral region (Buitrago et al., 2018). Future studies will analyze these open questions through the multi-scale integration of the SensOFOREST project dataset, including leaf level spectroscopy and hyperspectral drone imagery. This information could help disentangle the contribution of biochemical components at the leaf level from structural components in order to understand the contribution of each to the spectral response.

4. ACKNOWLEDGEMENTS

The SensOFOREST project is funded by the European Union through the FORWARDS project (https://forwards-project.eu).

5. REFERENCES

Badgley, G., Field, C.B., Berry & J.A. (2017). Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. *Science Advances (3)*. doi: 10.1126/sciadv.1602244

Buitrago, M., Groen, T., Hecker, C. & Skidmore, A. (2018). Spectroscopic determination of leaf traits using infrared spectra. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, (69)*. https://doi.org/10.1016/J.JAG.2017.11.014

Cos, J., Doblas-Reyes, F., Jury, M., Marcos, R., Bretonnière, P.A. & Samsó, M. (2022). The Mediterranean climate change hotspot in the CMIP5 and CMIP6 projections. *Earth Syst. Dynam., (13)*. https://doi.org/10.5194/esd-13-321-2022

Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J. & Merzlyak, M.N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment, (58)* https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7

Gitelson, A.A., Viña, A., Arkebauer, T.J., Rundquist, D., Keydan, G.P. & Leavitt, B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters, (30)*. http://dx.doi.org/10.1029/2002GL016450

Hernandez-Morcillo, M., Burgess, P., Mirck, J., Pantera, A. & Plieninger, T. (2018). Scanning agroforestry-based solutions for climate change mitigation and adaptation in Europe. *Environmental Science & Policy, (80)*. 10.1016/j.envsci.2017.11.013

Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K. & Van Leeuwen, W. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment, (59)*. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5

Rondeaux, G., Steven, M. & Baret, F. (1996) Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment, (55)*. https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In S.C. Freden, E.P. Mercanti, & M.A. Becker (Eds.), Third Earth Resources Technology Satellite- 1 Symposium (pp. 301–317). Greenbelt, MD, USA: NASA

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.248

Declive de los "Pinos Padre" de *Pinus canariensis* en la vertiente sur del Teide: Análisis basado en LiDAR multitemporal y estrés hidro-climático

Etxebeste, Iñaki [1] **Blazquez Casado, Ángela** [1] **Remeses, Tomas** [2] **Agullo, Juan** [2]

[1] Cesefor, España

[2] Cabildo de Tenerife, España

ORCID: Etxebeste 0000-0002-9295-878X Blazquez Casado 0000-0003-2611-9176

Correspondencia: inaki.etxebeste@cesefor.com angela.blazquez@cesefor.com tomasr@tenerife.es JAgullo@tenerife.es

RESUMEN

Este estudio evalúa el estado fitosanitario y estructural de los ejemplares del pino canario conocidos como "Pinos padre" (*Pinus canariensis*) en la vertiente sur del Teide, ejemplares centenarios de alto valor ecológico. Se empleó una comparativa multitemporal de nubes de puntos LiDAR ALS de 2009 (PNOA1), 2012, 2014, 2019 y 2023 (PNOA3). La segmentación de individuos se realizó mediante el algoritmo Dalponte, seleccionado por su alta fiabilidad en rodales complejos. Los resultados indican un declive severo de la muestra, con pérdidas de área de copa y un aumento de la mortalidad. Se identificó una correlación crítica entre este deterioro, valores negativos del índice SPEI-12 y la recurrencia de incendios forestales en 2018 y 2021.

Palabras clave: *Pinus canariensis, LiDAR ALS, estrés hídrico, Pinos Padre, Teide*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Declive de los "Pinos Padre" de *Pinus canariensis* en la vertiente sur del Teide: Análisis basado en LiDAR multitemporal y estrés hidro-climático

Etxebeste, Iñaki [1], Blazquez Casado, Ángela [1], Remeses, Tomas [2], Agullo, Juan [2]

[1] Cesefor, España.

0000-0002-9295-878X, inaki.etxebeste@cesefor.com ; 0000-0003-2611-9176, angela.blazquez@cesefor.com.

[2] Cabildo de Tenerife, España.

tomasr@tenerife.es ; jagullo@tenerife.es.

Resumen: Este estudio evalúa el estado fitosanitario y estructural de los ejemplares del pino canario conocidos como "Pinos padre" (*Pinus canariensis*) en la vertiente sur del Teide, ejemplares centenarios de alto valor ecológico. Se empleó una comparativa multitemporal de nubes de puntos LiDAR ALS de 2009 (PNOA1), 2012, 2014, 2019 y 2023 (PNOA3). La segmentación de individuos se realizó mediante el algoritmo Dalponte, seleccionado por su alta fiabilidad en rodales complejos. Los resultados indican un declive severo de la muestra, con pérdidas de área de copa y un aumento de la mortalidad. Se identificó una correlación crítica entre este deterioro, valores negativos del índice SPEI-12 y la recurrencia de incendios forestales en 2018 y 2021.

Palabras clave: *Pinus canariensis*, LiDAR ALS, estrés hídrico, Pinos padre, Teide

Decline of the 'Pinos padre' (Pinus canariensis) on the southern slope of Mount Teide: Analysis based on multi-temporal LiDAR and hydro-climatic stress

Abstract: *This study evaluates the phytosanitary and structural status of Canary Island pine (Pinus canariensis) specimens known as "Pinos padre" on the southern slopes of Mount Teide. These centuries-old trees are of high ecological value. A multi-temporal comparison of ALS LiDAR point clouds from 2009 (PNOA1), 2012, 2014, 2019, and 2023 (PNOA3) was used. Individual segmentation was performed using the Dalponte algorithm, selected for its high reliability in complex stands. The results indicate a severe decline in the sample, with losses in crown area and increased mortality. A critical correlation was identified between this deterioration, drought related SPEI-12 index, and the recurrence of forest fires in 2018 and 2021.*

Keywords: *Pinus canariensis, LiDAR ALS, water stress, Pinos padre, Teide*

1. INTRODUCCIÓN

El pino canario (*Pinus canariensis*) representa la piedra angular de la biodiversidad macaronésica, actuando como un regulador hidrológico crítico y sumidero de carbono en ecosistemas insulares volcánicos (Climent *et al*., 2004). En el actual contexto del Antropoceno, la intensificación de las anomalías térmicas y el cambio en los regímenes de precipitación exigen un monitoreo preciso de su salud estructural. El pino canario constituye un paradigma de resiliencia ante perturbaciones estocásticas. Los "Pinos padre", ejemplares que pueden superar los 800 años de longevidad, representan un baluarte biológico cuya supervivencia depende de la formación de "tea" (duramen resinoso), caracterizada por una durabilidad excepcional con pérdidas de masa por ataque fúngico inferiores al 1%, frente al 25-38% de otras coníferas (Lopez *et al*., 2016).

El crecimiento radial de P. canariensis está dictado por una compleja interacción entre factores climáticoets locales y patrones de circulación de gran escala, específicamente la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). El impacto de la NAO es particularmente dominante en la vertiente de sotavento, donde la fase de esta oscilación dicta la precipitación anual y, por ende, el crecimiento basimétrico (Rozas *et al*., 2013). En contraste, la vertiente de barlovento se encuentra amortiguada por la influencia de los vientos alisios, aunque su crecimiento se ve limitado por una paradoja radiactiva: la nubosidad persistente reduce la radiación fotosintéticamente activa, limitando la asimilación de carbohidratos a pesar de la disponibilidad hídrica.

Sin embargo, el incremento de la aridez y el aumento del Déficit de Presión de Vapor (VPD) plantean un escenario crítico. La arquitectura hidráulica de la especie, aunque adaptada a condiciones xéricas mediante estrategias isohídricas, se enfrenta al agotamiento de sus márgenes de seguridad. En la vertiente sur de Tenerife, la sinergia entre sequías prolongadas y el daño térmico de incendios recientes amenaza la integridad de estos pinos relictos. El objetivo de este trabajo es cuantificar el

declive estructural de los “Pinos Padre” mediante métricas LiDAR multitemporales e imágenes de satélite y validar dicho deterioro mediante indicadores ecofisiológicos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y datos LiDAR

El área de estudio se localiza en la vertiente sur del Teide (Tenerife, Islas Canarias), en el entorno de los pinares de *Pinus canariensis* situados a aproximadamente 1.500 m de altitud en el término municipal de Arico. La zona alberga individuos relictos denominados "Pinos padre", con alturas próximas a los 40 m y edades estimadas en torno a los 700 años, afectados por los incendios de 2018 y 2021.

Se utilizaron datos ALS correspondientes a cinco vuelos: 2009 (2,3 pts/m2), 2012 (1,9 pts/m2), 2014 (1,7 pts/m2), 2019 (2,1 pts/m2) y 2023 (9,9 pts/m2), proporcionados por el Cabildo de Tenerife. Los datos se homogeneizaron al sistema ETRS89 / UTM zona 28N (EPSG:25828). Se verificó la clasificación del suelo, la densidad de puntos y la disponibilidad de atributos espectrales (intensidad, RGB y NIR) en cada época; la banda NIR únicamente estuvo disponible en el vuelo de 2023.

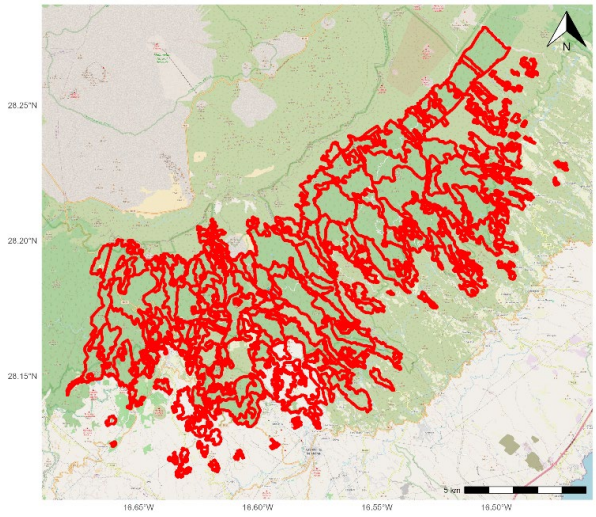


Figura 1. Área de estudio.

2.2. Procesamiento LiDAR y detección individual de árboles

El procesamiento se realizó en R (v 4.5.2, R Core Team, 2025) mediante el paquete lidR (Roussel *et al*., 2020). Para cada una de las cinco épocas se siguió la misma cadena de análisis. En primer lugar, se generó un modelo digital del terreno (MDT) a 0,5 m de resolución mediante interpolación TIN. A continuación, se normalizaron las alturas respecto al MDT. Sobre la nube normalizada se generó un modelo digital de copas (CHM) a 0,5 m con el algoritmo pit-free (Khosravipour *et al*., 2014), aplicando un filtro de media 3×3.

La detección de copas individuales se realizó en dos etapas. Primero se localizaron los ápices de los árboles mediante un filtro de máximos locales (LMF) con una función de ventana variable basada en la alometría *de P. canariensis* (diámetro de copa ≈ 0,35 × altura, acotado entre 3 y 15 m), estableciendo una altura mínima de detección de 10 m. Seguidamente se delimitaron las copas mediante segmentación por cuenca controlada por marcadores según el algoritmo de Dalponte y Coomes (2016). Se retuvieron únicamente los árboles con una superficie de copa superior a 100 m².

2.3. Métricas estructurales y seguimiento multitemporal

Para cada árbol detectado se calcularon métricas estructurales a partir de la nube de puntos contenida en su polígono de copa: altura máxima, media y percentiles (P25, P50, P75, P95), coeficiente de variación de la altura, cobertura de dosel (proporción de retornos por encima de 2 m), ratio de relieve de la cubierta (CRR) e intensidad media cuando estaba disponible. Las estadísticas zonales del CHM por copa se obtuvieron con el paquete exactextractr.

El seguimiento multitemporal se basó en el emparejamiento espacial de árboles entre épocas, utilizando la época de 2009 como referencia. Se estableció una distancia máxima de emparejamiento de 5 m entre centroides de copa. Se identificaron los árboles persistentes, presentes en las cinco épocas, y se construyó una serie temporal de métricas por individuo. A partir de las diferencias se calcularon indicadores de cambio para tres periodos clave: pre-incendio (2009–2014), primer incendio (2014–2019, que captura el evento de 2018) y segundo incendio (2019–2023, que captura el de 2021). Los árboles se clasificaron en cuatro categorías de estado sanitario en función del cambio porcentual acumulado en superficie de copa y altura: declive severo, descenso de 50% o más; moderado; descenso entre 25 y 50%, estable: descenso entre el 10 y el 25% y mejora, en el resto de los casos.

2.4. Estimación índice NDVI a partir del LiDAR de 2023

El vuelo ALS de 2023 incorporó un canal NIR que permitió calcular el NDVI a nivel de copa individual a partir de las intensidades CIR registradas por el propio sensor. Para cada segmento de copa identificado mediante la segmentación individual de árboles, se extrajo el valor medio de NDVI como indicador del vigor fotosintético. Este índice se empleó para caracterizar el estado fisiológico de los candidatos a "Pinos padre" en el momento más reciente del análisis, complementando las métricas estructurales derivadas de la nube de puntos.

2.5. Datos climáticos locales

Se recopilaron series mensuales de temperatura media, precipitación acumulada y déficit de presión de vapor medio diario FAO-56 (VPD) para el periodo 2003–2023 a partir de la red de estaciones agroclimáticas del Cabildo de Tenerife (AgroCabildo). Se seleccionaron las estaciones más próximas al área de estudio, los registros anómalos se eliminaron y los vacíos se dejaron como NA. Se calcularon indicadores de estrés hídrico acumulado: meses consecutivos con precipitación inferior a 20 mm, VPD medio estival (junio–septiembre) y anomalías térmicas respecto al periodo de referencia 2003–2012.

Se evaluaron tendencias mediante regresión lineal y se representaron como series temporales superpuestas con los eventos de incendio, contextualizando la respuesta fisiológica observada en los datos LiDAR (Allen *et al*., 2010).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Contexto climático: dos décadas de estrés hídrico

Las series del índice SPEI-12 calculadas para las estaciones de la vertiente sur del Teide muestran una tendencia sostenida hacia condiciones de sequía desde mediados de la década de 2010 (Fig. 2). Todas las estaciones analizadas (Abejarucos, Arico, Izaña, Granadilla, Chimiche, El Escobonal, Icod y Tegueste-Anaga) presentan periodos prolongados con SPEI-12 negativo, siendo especialmente acusados entre 2015 y 2023. Los episodios de sequía más intensos (SPEI-12 < −1,5) coinciden temporalmente con los años previos a los incendios de 2018 y 2021, lo que sugiere una predisposición fisiológica del arbolado al estrés antes de la perturbación por fuego. Esta sequía crónica es coherente con las tendencias de aridificación descritas para Canarias y la cuenca mediterránea (Vicente-Serrano *et al*., 2010).

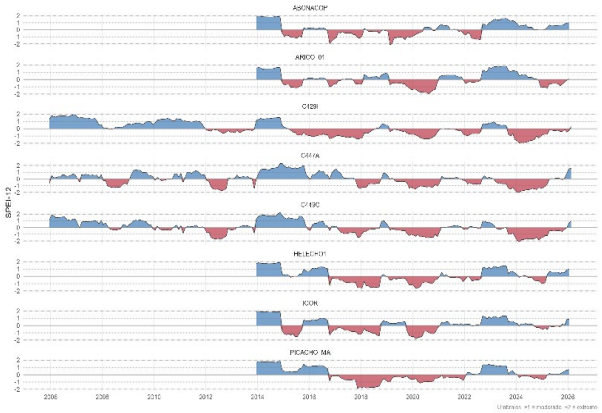


Figura 2. Índice SPEI-12 calculado a partir de estaciones cercanas al área de estudio.

3.2. Detección individual de árboles y estructura del pinar

El análisis LiDAR de una tesela representativa de 99,5 ha en la vertiente sur (rango altitudinal 1.420 –1.798 m s.n.m.) permitió detectar 6.803 árboles con altura superior a 10 m, de los cuales 154 cumplieron los criterios de árbol significativo (>10 m de altura y >20 m² de copa) (Tabla 1). La densidad de puntos del vuelo de 2023 fue de 9,9 pts/m², suficiente para la detección individual a nivel de copa en un pinar abierto como el de *P. canariensis*.

Tabla 1. Resumen del análisis de una tesela de ejemplo.

Métrica	Valor
Superficie de la tesela (ha)	99,5
Densidad de puntos (pts/m²)	2
Rango altitudinal (m s.n.m.)	1.420 – 1.798
Árboles detectados (>10 m)	6.803
Árboles significativos (>10 m, >20 m²)	154
Candidatos a “Pinos padre” (≥25 m, ≥100 m²)	98
Altura media (m)	26,5
Altura máxima (m)	37,9
Superficie media de copa (m²)	168,3
Superficie máxima de copa (m²)	208,4

Se identificaron 98 candidatos a "Pinos padre" (altura ≥25 m y superficie de copa ≥100 m²). Estos individuos presentaron una altura media de 26,5 m y una altura máxima de 37,9 m, con superficies medias y máximas de copa de 168,3 m² y 208,4 m², respectivamente. La distribución espacial de estos árboles (Fig. 3) revela una concentración en la franja altitudinal entre 1.450 y 1.650 m, coincidiendo con la zona de pinar maduro descrita históricamente en esta vertiente.

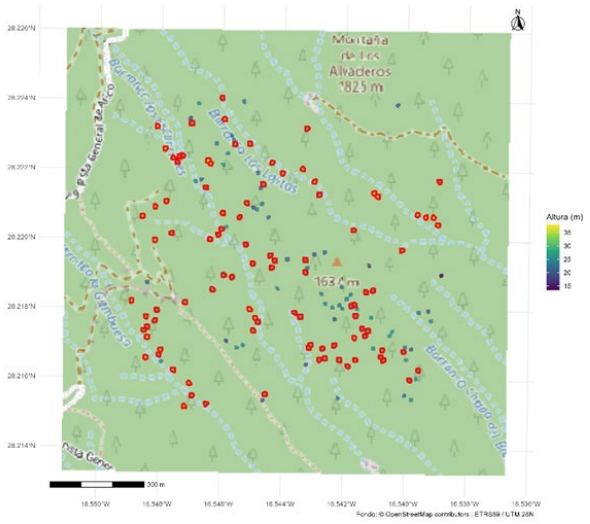


Figura 3. Copas de árboles detectados, selección “Pinos padre” en rojo, y las alturas de la copa.

3.3. Estado fisiológico a partir del NDVI LiDAR

El vuelo de 2023, equipado con banda NIR, permitió calcular el NDVI medio por copa a partir de la información CIR (color infrarrojo) del propio LiDAR (Fig. 4). Los valores de NDVI observados en los candidatos a "Pinos padre" fueron notablemente bajos, con una media de 0,12 y valores mínimos próximos a 0,05 en varios individuos. Estos valores están muy por debajo de los rangos típicos para P. canariensis en buen estado vegetativo (NDVI > 0,4), e indican una pérdida severa de verdor y actividad fotosintética. Los árboles con NDVI más bajo se concentraron en la zona central de la tesela, coincidiendo con las áreas más afectadas por los incendios recientes y con las condiciones de sequía más persistentes según el SPEI-12.

La combinación de valores bajos de NDVI con copas de gran extensión, pero estructura degradada (CRR bajo, elevado coeficiente de variación de la altura) apunta a un proceso de defoliación progresiva en individuos que aún mantienen parte de su esqueleto de ramas pero han perdido gran parte de su follaje funcional. Este patrón es compatible con la mortalidad inducida por sequía descrita en coníferas mediterráneas, donde el colapso hidráulico precede a la pérdida total de copa (McDowell *et al*., 2008).

4. CONCLUSIONES

Los resultados confirman que los "Pinos padre" de la vertiente sur del Teide se encuentran en un estado de declive avanzado, condicionado por más de dos décadas de sequía persistente y agravado por la recurrencia de incendios. La detección de 98 candidatos en una sola tesela sugiere que la población de árboles excepcionales es más amplia de lo recogido en este trabajo, pero también que su exposición al estrés es generalizada. El bajo NDVI generalizado indica que la capacidad de rebrote epicórmico, habitualmente eficaz en *P. canariensis*, puede ser insuficiente cuando la sequía crónica ha comprometido las reservas de carbohidratos del árbol. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de implementar estrategias de conservación específicas para este material genético singular.



Figura 4. NDVI medio por copas de árboles detectados y sus alturas.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Cabildo de Tenerife y GRAFCAN por la provisión de datos LiDAR, a la AEMET por la provisión de datos meteorológicos fundamentales para este análisis.

6. REFERENCIAS

Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management, 259*(4), 660–684. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001

Appel, M., & Pebesma, E. (2019). On-demand processing of data cubes from satellite image collections with the gdalcubes library. *Data, 4*(3), 92.

Climent, J., Tapias, R., Pardos, J. A., & Gil, L. (2004). Fire adaptations in the Canary Islands pine (*Pinus canariensis*). *Plant Ecology, 171*, 185–196.

Dalponte, M., & Coomes, D. A. (2016). Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in Ecology and Evolution, 7*(10), 1236–1245.

Khosravipour, A., Skidmore, A. K., Isenburg, M., Wang, T., & Hussin, Y. A. (2014). Generating pit-free canopy height models from airborne lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 80*(9), 863–872. https://doi.org/10.14358/PERS.80.9.863

Lopez, R., Cano, F. J., Choat, B., Cochard, H., & Gil, L. (2016). Plasticity in Vulnerability to Cavitation of *Pinus canariensis* Occurs Only at the Driest End of an Aridity Gradient. *Front Plant Sci, 7,* 769. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00769

McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., & Yepez, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist, 178*(4), 719–739. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x

R Core Team. (2025). R: A Language and Environment for Statistical Computing. In R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Roussel, J.-R., Auty, D., Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R. H., Meador, A. S., Bourdon, J.-F., de Boissieu, F., & Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment, 251*, 112061. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061

Rozas, V., García-González, I., Pérez-de-Lis, G., & Arévalo, J. R. (2013). Local and large-scale climatic factors controlling tree-ring growth of *Pinus canariensis* on an oceanic island. *Climate Research, 56*, 197–207.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate, 23*(7), 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.260

BOSSE. A tool for benchmarking new methods in remote sensing of plant functional diversity, and more

Pacheco-Labrador, Javier [1] **Gomarasca, Ulisse** [2] **Pabon-Moreno, Daniel E.** [2] **Li, Wantong** [3] **Migliavacca, Mirco** [4] **Jung, Martin** [2] **Duveiller, Gregory** [2] **Bustos-Caparrós, Juan R.** [1] **Lagranja-Usán, Jorge** [1] **Martín, M. Pilar** [1]

[1] Environmental Remote Sensing and Spectroscopy Laboratory (SpecLab), Spanish National Research Council (CSIC), Spain

[2] Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena D-07745, Germany

[3] Department of Environmental Science Policy and Management, UC Berkeley, Berkeley, CA, USA

[4] European Commission, Joint Research Centre (JRC), Ispra, Italy

ORCID: Pacheco-Labrador 0000-0003-3401-7081 Gomarasca 0000-0001-7389-7793 Pabon-Moreno 0000-0003-4058-7339 Li 0000-0001-9861-4294 Migliavacca 0000-0003-3546-8407 Duveiller 0000-0002-6471-8404 Bustos-Caparrós 0009-0006-8325-6184 Lagranja-Usán 0009-0006-2222-4066 Martín 0000-0002-5563-8461

Correspondencia: javier.pacheco@csic.es ugomar@bgc-jena.mpg.de dpabon@bgc-jena.mpg.de wantongli@berkeley.edu mirco.migliavacca@ec.europa.eu mjung@bgc-jena.mpg.de gduveiller@bgc-jena.mpg.de juanramon.bustos@csic.es jorge.lagranja@csic.es mpilar.martin@csic.es

ABSTRACT

This work presents the first Biodiversity Observing System Simulation Experiment (BOSSE) and how it has been used to solve five methodological fundamental questions in the study of plant functional diversity with remote sensing. BOSSE simulates virtual scenes with plant species and their functional traits, remote sensing imagery, and ecosystem functions, which has allowed assessing the capability of different methodological choices, as well as the impact of spatial resolution. Subsequent works focus on supporting the analysis of experimental data and expand to other areas, such as model transferability through different spatial scales.

Keywords: *Plant functional diversity, remote sensing, virtual simulator, methods*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

BOSSE. A tool for benchmarking new methods in remote sensing of plant functional diversity, and more

Pacheco-Labrador, Javier [(1)], Gomarasca, Ulisse [(2)], Pabon-Moreno, Daniel E. [(2)], Li, Wantong [(3)], Migliavacca, Mirco [(4)], Jung, Martin [(2)], Duveiller, Gregory [(2)], Bustos-Caparrós, Juan R. [(1)], Lagranja-Usán, Jorge [(1)], Martín, M. Pilar [(1)]

[(1)] Environmental Remote Sensing and Spectroscopy Laboratory (SpecLab), Spanish National Research Council (CSIC), Spain.

0000-0003-3401-7081, javier.pacheco@csic.es ; 0009-0006-8325-6184, juanramon.bustos@csic.es

0009-0006-2222-4066, jorge.lagranja@csic.es ; 0000-0002-5563-8461, mpilar.martin@csic.es

[(2)] Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena D-07745, Germany.

0000-0001-7389-7793, ugomar@bgc-jena.mpg.de ; 0000-0003-4058-7339, dpabon@bgc-jena.mpg.de

mjung@bgc-jena.mpg.de ; 0000-0002-6471-8404, gduveiller@bgc-jena.mpg.de

[(3)] Department of Environmental Science Policy and Management, UC Berkeley, USA.

0000-0001-9861-4294, wantongli@berkeley.edu

[(4)] European Commission, Joint Research Centre (JRC), Italy.

0000-0003-3546-8407, Mirco.MIGLIAVACCA@ec.europa.eu

***Abstract**: This work presents the first Biodiversity Observing System Simulation Experiment (BOSSE) and how it has been used to solve five methodological fundamental questions in the study of plant functional diversity with remote sensing. BOSSE simulates virtual scenes with plant species and their functional traits, remote sensing imagery, and ecosystem functions, which has allowed assessing the capability of different methodological choices, as well as the impact of spatial resolution. Subsequent works focus on supporting the analysis of experimental data and expand to other areas, such as model transferability through different spatial scales.*

***Keywords**: Plant functional diversity, remote sensing, virtual simulator, methods*

BOSSE. Una herramienta para evaluar nuevos métodos de teledetección para estimar la diversidad funcional de la vegetación, y más

Resumen: Este trabajo presenta el primer "Experimento de Simulación del Sistema de Observación" dedicado a la Biodiversidad (BOSSE) y cómo ha sido empleado para resolver cinco cuestiones metodológicas fundamentales en el estudio de la diversidad funcional mediante teledetección. BOSSE simula escenas virtuales con mapas de especies vegetales, sus rasgos funcionales, imágenes de satélite y funciones ecosistémicas, lo que ha permitido evaluar la capacidad de diferentes decisiones metodológicas, así como el efecto de la resolución espacial. Trabajos subsiguientes se focalizan en el soporte al análisis de datos experimentales y se expanden a otras áreas, como la transferibilidad de modelos a través de diferentes escalas espaciales.

Palabras clave: Diversidad funcional de la vegetación, teledetección, simulador virtual, métodos

1. INTRODUCTION

The growing interest in mapping plant functional diversity from spectral imagery contrasts with unresolved gaps between remote sensing and field ecology, as well as the need for new, more demanding field sampling schemes. These limitations prevent robust advances and a clear understanding of the mechanisms behind the relationship between the diversity of remote sensing variables and the diversity of plant functional traits on the ground. As in many developing areas, the available early studies are hardly comparable. In this case, this is due to the wide range and scarce overlap of methods, sensors, scales, extents, and functional diversity metrics, among others, and they do not cover a sufficiently broad range of situations to ensure the robustness of operational, global products. This makes it difficult to identify which methodological approaches allow remote sensing to achieve accurate estimates of plant functional diversity, nor the advantages and limitations of the different methods and sensors under consideration.

Despite the need for empirical proof, simulations can support the benchmarking of new methods and help to answer simple but fundamental questions. This was the aim of the first Biodiversity Observing System Simulation Experiment (BOSSE) (Pacheco-Labrador *et al*., 2025). BOSSE generates virtual scenes that encompass spatially explicit, temporally dynamic vegetation traits and species maps, and simulates the corresponding remote sensing variables at the bottom of the atmosphere, and associated ecosystem functions. Despite its relative simplicity, BOSSE has addressed fundamental yet unresolved methodological questions about estimating plant functional diversity from spectral data (Pacheco-Labrador *et al*., 2026), and could still help guide experimental analyses and answer many more questions. For example, has shed light on questions such as what are the best remote sensing proxies of plant functional diversity or the abundance used to calculate it, which are more resistant to degraded spatial resolution, how to infer diversity in large areas, or whether uncertainties depend on seasonality, among others. We present here the BOSSE model and how it has supported the development of this research domain.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. The BOSSE model

BOSSE integrates multiple models, enabling the simulation of synthetic scenes with vegetation constrained by meteorological time series and the corresponding climatic zone. The scene pixels are assumed to be occupied by one or more identical plants of the same species. These synthetic species are defined by their plant functional type, the upper and lower bounds of their plant functional trait values, and their sensitivity to meteorology. This enables representing temporal variability. Furthermore, the model simulates interspecific diversity and different spatial patterns of species distributions. Plant traits are approximated by foliar and structural parameters of the SCOPE model (van der Tol *et al*., 2009) radiative transfer model.

Using these trait maps and meteorological data, BOSSE can simulate corresponding remote sensing imagery of hyperspectral reflectance factors (*R*), land surface temperature (LST), and sun-induced chlorophyll fluorescence (*F*), and degrade its spatial resolution relative to the baseline pixel size used to simulate vegetation (considered the 100 % spatial resolution). BOSSE also provides estimates of plant traits from the simulated reflectance (optical traits, OT). Additionally, BOSSE can simulate various ecosystem functions, including gross primary production or evapotranspiration, among others. The simulations are based on SCOPE, and accelerated using statistical surrogates or emulators (Gómez-Dans *et al*., 2016).

2.2. BOSSE simulations

We used BOSSE to simulate two-year time series of plant trait maps and remote sensing imagery for 180 scenes across four climatic zones (Arid, Tropical, Temperate, and Continental) and three spatial patterns (even, intermediate, and clustered. Fig. 1 presents four examples of these scenes.

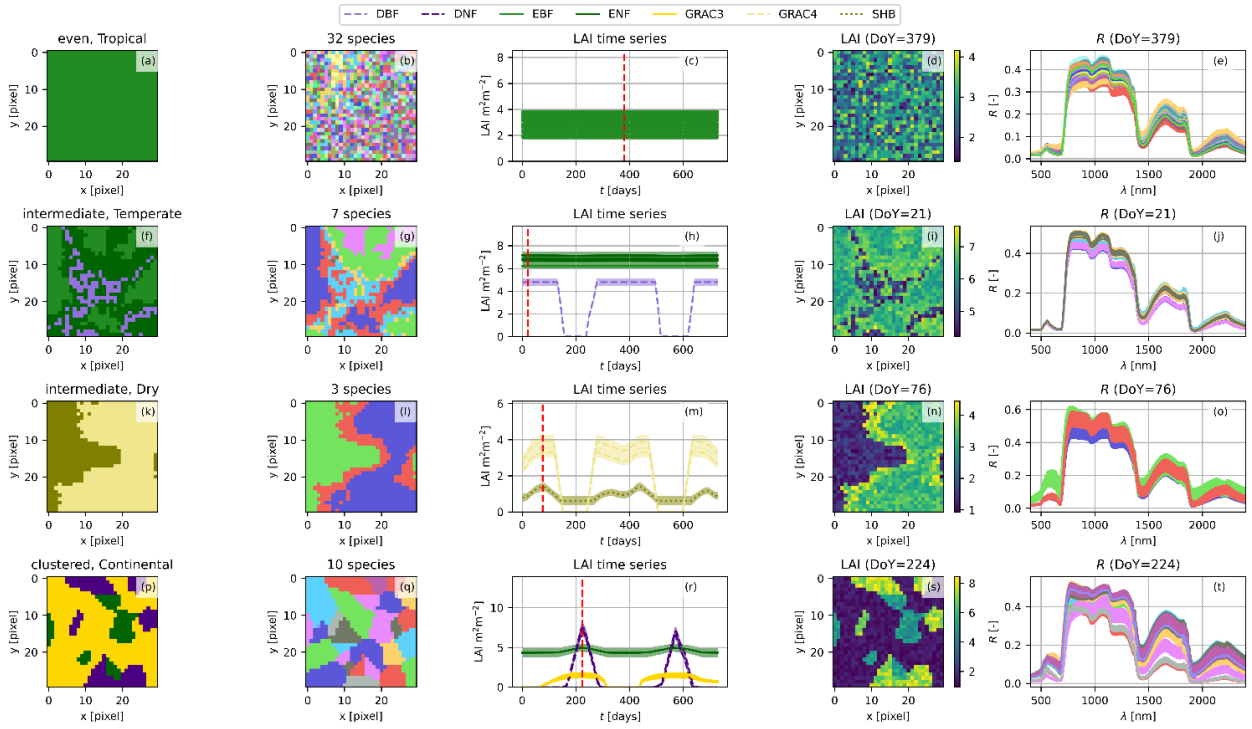


Figure 1. Example of BOSSE synthetic Scenes. These cover four different climatic zones (Tropical (a-e), Temperate (f-j), Dry (k-o), and Continental (p-t)) and three spatial patterns (even (a-e), intermediate (f-j,o-k), and clustered (p-t)). Plant functional types map (1st

column, color code in legend), species maps (2nd column, each represented by a different color), time series of leaf area index (LAI) (3rd column, mean and standard deviation interval of each species, colored by plant functional type), the LAI map at the date of the maximum phenological development (4th column), and hyperspectral reflectance factors of each pixel, colored as the species).

We used the Python package pyGNDiv (Pacheco-Labrador *et al*., 2023) to calculate functional diversity from the plant trait maps and the remote sensing variables. pyGNDiv allows normalizing diversity metrics to the trait dataset's dimensionality, thereby enabling a direct comparison (same scale). Specifically, we computed the Rao's quadratic entropy index (Q_{Rao}) (Botta-Dukát, 2005) and partitioned diversity at different scales (alpha, beta, gamma) using the variance approach (Laliberté *et al*., 2020).We used these simulations to determine 1) how to compute plant functional diversity over large extents, 2) which spectral variables or combinations captured plant functional diversity best, 3) how to validate plant functional diversity estimates, 4) how phenology affected the estimation error, and 5) which spectral variables were more robust to degrading spatial resolution.

3. RESULTS

The comparison or functional diversity metrics computed from plant trait maps and remote sensing imagery at the same spatial resolution (i.e., assuming pure pixels) proved that averaging multiple small samples (e.g., 9 pixels) should be used to compute functional diversity metrics rather than large samples occupying the entire study area. Using larger scenes (90-by-90 pixels), we found that the second alternative leads to saturation and convergence of diversity values (Fig. 2), hiding the differences between scenes of different diversity levels.

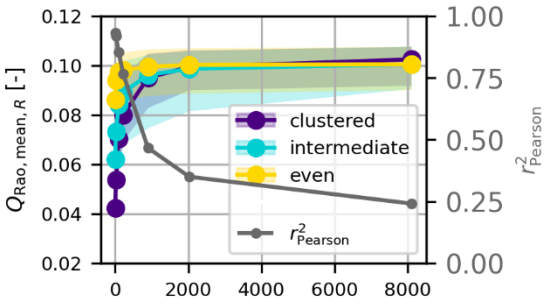


Figure 2. Example of diversity metric saturation with window size across different spatial patterns and its correlation with plant functional diversity derived from plant traits.

We also found that the best-performing remote sensing variables are those accounting for the presence of bare soil. In our study, the optical traits (plant trait estimates based on reflectance) and sun-induced chlorophyll fluorescence (for which we set a threshold) achieved the best estimates, followed by hyperspectral reflectance and spectral indices. Land surface temperature was the worst estimator. However, comparing medians rather than means improved the performance of variables most affected by background effects (Fig. 3).

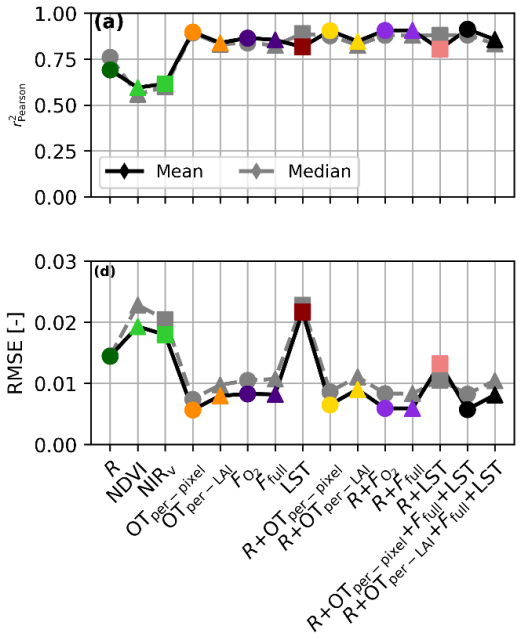


Figure 3. Correlation and error statistics for the estimation of plant functional diversity using different remote sensing proxies, and their combination

In agreement with this finding, we observed that estimation errors remain relatively constant across phenology, except during periods when soil contribution becomes relevant (i.e., leaf area index below 1), where they increase (Fig. 4).

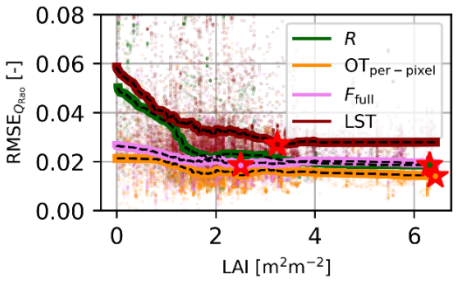


Figure 4. Plant functional diversity estimation root mean squared error as a function of the leaf area index for different remote sensing proxies. Lines are smoothed trends, and the red stars indicate the location of the minimum error

Analyses also revealed that using leaf area index instead of plant coverage as a surrogate of abundance improved the accuracy but reduced the correlation in the estimation of Rao's *Q* metric, and mostly worsened the partitioning of diversity (not shown).

When we degraded the spatial resolution of the remote sensing variables, we found that the best estimators previously identified to infer Rao's *Q* were also the most

robust to mixed pixels effects (Fig. 5). However, we also found a significant decrease in performance across all variables when the pixel size was three times the plant size or larger.

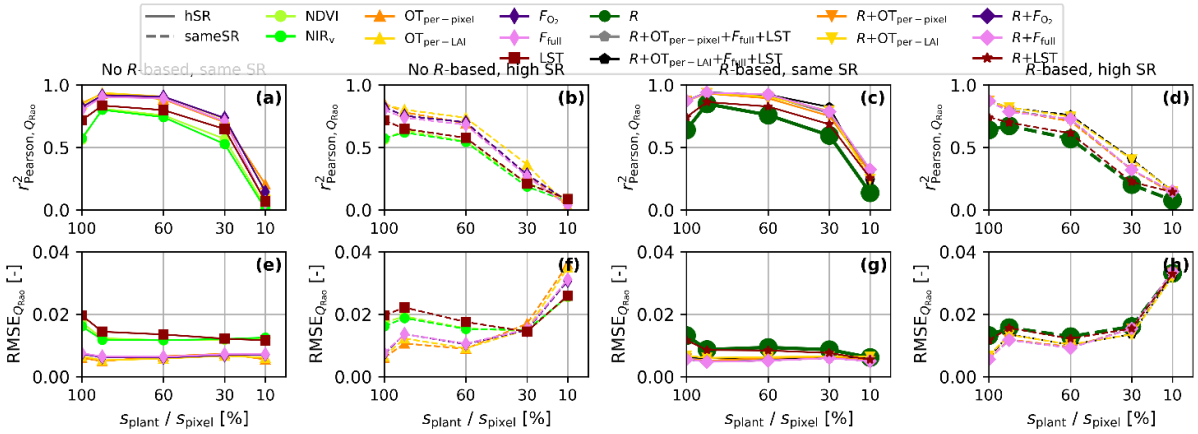


Figure 5. Correlation and error of estimation of plant functional diversity for different remote sensing proxies, compared with metrics computed from field plant traits at high spatial resolution or the same spatial resolution of the sensor

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Despite modeling limitations (e.g., 1D radiative transfer modeling), BOSSE has allowed us to answer fundamental questions regarding the methods to infer plant functional diversity from space. We found our results plausible with previous empirical studies. The advantage of BOSSE was having all the information at the desired level of uncertainty available, which enabled understanding how different methodological choices or observational conditions modified the capability of remote sensing to capture plant functional diversity. We expect BOSSE to continue supporting methodological developments, not limited to the field of plant functional diversity. Current analyses focus on assessing spatial mismatches in model scale transfer and on understanding empirical results from proximal hyperspectral imagery to infer plant functional diversity (Lagranja *et al*., this conference), among others.

5. AGRADECIMIENTOS

JPL, MPM, and JLU acknowledge the project “Integrated Observing Systems and Simulation Experiments to Analyze Biodiversity-Ecosystem Function Relationships in Savanna Ecosystems” PID2023-151046NB-I00 funded by MCIU/ AEI / 10.13039/501100011033 / FEDER, UE). JPL, MPM, and JRBC acknowledge the European Union’s Recovery and Resilience Facility-Next Generation, in the framework of the General Invitation of the Spanish Government’s public business entity Red.es to participate in talent attraction and retention programmes within Investment 4 of Component 19 of the Recovery, Transformation and Resilience Plan. JPL acknowledges the ESA Living Planet Fellowship IRS4BEF (ESA Contract No. 4000140028/22/I- DT-lr).

6. REFERENCIAS

Botta-Dukát, Z. (2005). Rao’s quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits. *Journal of Vegetation Science, 16*(5), 533–540. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02393.x

Gómez-Dans, J. L., Lewis, P. E., & Disney, M. (2016). Efficient Emulation of Radiative Transfer Codes Using Gaussian Processes and Application to Land Surface Parameter Inferences. *Remote Sensing, 8*(2), 119. https://doi.org/10.3390/rs8020119

Laliberté, E., Schweiger, A. K., & Legendre, P. (2020). Partitioning plant spectral diversity into alpha and beta components. *Ecology Letters, 23*(2), 370–380. https://doi.org/10.1111/ele.13429

Pacheco-Labrador, J., de Bello, F., Migliavacca, M., Ma, X., Carvalhais, N., & Wirth, C. (2023). A generalizable normalization for assessing plant functional diversity metrics across scales from remote sensing. *Methods in Ecology and Evolution, 14*(8), 2123–2136. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14163

Pacheco-Labrador, J., Gomarasca, U., Li, W., Migliavacca, M., Jung, M., & Duveiller, G. (2025). BOSSE v1.0: The Biodiversity Observing System Simulation Experiment. *Geosci. Model Dev., 18*(21), 8401–8422. https://doi.org/10.5194/gmd-18-8401-2025

Pacheco-Labrador, J., Gomarasca, U., Pabon-Moreno, D. E., Li, W., Migliavacca, M., Jung, M., & Duveiller, G. (2026). Benchmarking remote sensing methods to capture plant functional diversity from space. *Ecological Informatics, 94*, 103636. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2026.103636

van der Tol, C., Verhoef, W., Timmermans, J., Verhoef, A., & Su, Z. (2009). An integrated model of soil-canopy spectral radiances, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. *Biogeosciences, 6*(12), 3109–3129. https://doi.org/10.5194/bg-6-3109-2009

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.262

Detección de la riqueza floral en agrosistemas mediante imágenes UAV e inteligencia artificial

Mena, Juan Diego [1] **Mesias-Ruiz, Gustavo Adolfo** [1] **García-Guerra, Jose** [1] **Castillo-Malla, Darwin** [2] **Peña, José Manuel** [1] **Dorado, José** [1] **Borra-Serrano, Irene** [1]

[1] Tech4AGRO. Instituto de Ciencias Agrarias (ICA), CSIC, C/ Serrano, 115, 28006, Madrid, España.

[2] Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Técnica Particular de Loja, San Cayetano Alto s/n, Loja 11-01-608

ORCID: Mena 0009-0008-6051-3031 Mesias-Ruiz 0000-0002-3774-4121 García-Guerra 0000-0003-2822-093X Castillo-Malla 0000-0002-1800-1189 Peña 0000-0003-4592-3792 Dorado 0000-0002-2268-2562 Borra-Serrano 0000-0003-3444-3099

Correspondencia: jdmena@ica.csic.es gmesias@ica.csic.es jose.g.guerra@ica.csic.es dpcastillo@utpl.edu.ec jmpena@ica.csic.es jose.dorado@csic.es irene.borra@ica.csic.es

RESUMEN

La pérdida de biodiversidad en los agrosistemas asociada a la intensificación agrícola, al uso de agroquímicos y a la fragmentación del hábitat, compromete los servicios ecosistémicos. En este contexto, la gestión y monitorización de la flora arvense en márgenes florales surge como una estrategia eficaz para evaluar la diversidad y riqueza de especies atractivas para diferentes gru-pos de polinizadores y fauna auxiliar. En la finca experimental “La Poveda” (ICA CSIC, Madrid) se desarrolló un experimento multipropósito durante los años 2023 y 2024 para monitorizar márgenes florales a 15 m de altura, empleando vehículos aéreos no tripulados (UAV). Se realizaron seis vue-los por campaña entre abril y julio, coincidiendo con el pico de floración de 11 especies objetivo pertenecientes a las familias Brassicaceae, Asteraceae y Fabaceae. Las particiones de las ortofo-tos (teselas de 640×640 px) se etiquetaron siguiendo dos esquemas: (a) unidad floral y (b) conjun-to floral. El conjunto de datos resultantes se utilizó para entrenar al modelo Ultralytics YOLOv26 bajo una configuración experimental homogénea y técnicas de aumento de datos. Los mejores resultados se obtuvieron con la variante del modelo YOLOv26m[A1.1][A1.2] y aumento de datos bajo el esquema (b), alcanzando métricas de validación robustas en la precisión promedio media de objetos (mAP@0.5[A2.1][A2.2] = 0.534), en precisión (P= 0.528) y en exhaustividad (re-call[A3.1][A3.2] = 0.558). Estos resultados destacan la relevancia de definir adecuadamente la unidad de etiquetado en conjuntos de datos florísticos de muy alta resolución y ofrece directrices metodológicas para la monitorización de la biodiversidad en agricultura.

Palabras clave: *Márgenes florales, YOLOv26, dron, servicios ecosistémicos, aprendizaje profundo.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Detección de la riqueza floral en agrosistemas mediante imágenes UAV e inteligencia artificial

Mena, Juan Diego [(1)], Mesias-Ruiz, Gustavo Adolfo [(1)], García-Guerra, Jose [(1)], Castillo-Malla, Darwin [(2)], Peña, José Manuel [(1)], Dorado, José [(1)], Borra-Serrano, Irene [(1)]

[(1)] Tech4AGRO. Instituto de Ciencias Agrarias (ICA), CSIC, España.

0009-0008-6051-3031, jdmena@ica.csic.es ; 0000-0002-3774-4121, gmesias@ica.csic.es

0000-0003-2822-093X, jose.g.guerra@ica.csic.es ; 0000-0003-4592-3792, jmpena@ica.csic.es

0000-0002-2268-2562, jose.dorado@csic.es ; 0000-0003-3444-3099, irene.borra@ica.csic.es

[(2)] Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Técnica Particular de Loja, San Cayetano Alto s/n, Loja 11-01-608.

0000-0002-1800-1189, dpcastillo@utpl.edu.ec.

Resumen: La pérdida de biodiversidad en los agrosistemas asociada a la intensificación agrícola, al uso de agroquímicos y a la fragmentación del hábitat, compromete los servicios ecosistémicos. En este contexto, la gestión y monitorización de la flora arvense en márgenes florales surge como una estrategia eficaz para evaluar la diversidad y riqueza de especies atractivas para diferentes grupos de polinizadores y fauna auxiliar. En la finca experimental "La Poveda" (ICA-CSIC, Madrid) se desarrolló un experimento multipropósito durante los años 2023 y 2024 para monitorizar márgenes florales a 15 m de altura, empleando vehículos aéreos no tripulados (UAV). Se realizaron seis vuelos por campaña entre abril y julio, coincidiendo con el pico de floración de 11 especies objetivo pertenecientes a las familias Brassicaceae, Asteraceae y Fabaceae. Las particiones de las ortofotos (teselas de 640×640 px) se etiquetaron siguiendo dos esquemas: (a) unidad floral y (b) conjunto floral. El conjunto de datos resultantes se utilizó para entrenar al modelo Ultralytics YOLOv26 bajo una configuración experimental homogénea y técnicas de aumento de datos. Los mejores resultados se obtuvieron con la variante del modelo YOLOv26m y aumento de datos bajo el esquema (b), alcanzando métricas de validación robustas en la precisión promedio media de objetos (*mAP@0.5 = 0.534*), en precisión (*P*= 0.528) y en exhaustividad (*recall* = 0.558). Estos resultados destacan la relevancia de definir adecuadamente la unidad de etiquetado en conjuntos de datos florísticos de muy alta resolución y ofrece directrices metodológicas para la monitorización de la biodiversidad en agricultura.

Palabras clave: Márgenes florales, YOLOv26, dron, servicios ecosistémicos, aprendizaje profundo.

Detection of floral richness in agroecosystems using UAV imagery and artificial intelligence.

***Abstract**: Biodiversity loss in agroecosystems, driven by agricultural intensification, agrochemical use, and habitat fragmentation, threatens the provision of ecosystem services. In this context, the management and monitoring of arable flora in flower strips emerges as an effective strategy to assess species diversity and richness, particularly of taxa attractive to different groups of pollinators and beneficial fauna. At the experimental farm "La Poveda" (ICA-CSIC, Madrid), a multipurpose experiment was conducted during 2023 and 2024 to monitor flower strips at a height of 15 m using unmanned aerial vehicles (UAVs). Six flights per campaign were carried out between April and July, coinciding with the flowering peak of 11 target species belonging to the Brassicaceae, Asteraceae, and Fabaceae families. Orthophoto tiles (640 × 640 px) were annotated following two schemes: (a) floral unit and (b) floral cluster. The resulting dataset was used to train the Ultralytics YOLOv26 model under a homogeneous experimental configuration and data augmentation techniques. The best performance was achieved with the YOLOv26m variant combined with data augmentation under scheme (b), yielding robust validation metrics for object detection, with a mean average precision (mAP@0.5 = 0.534), precision (P = 0.528), and true positive rate (recall = 0.558). These results highlight the importance of appropriately defining the labeling unit in very high-resolution floristic datasets and provide methodological guidelines for biodiversity monitoring in agricultural systems.*

***Keywords**: Floral margins, YOLOv26, drone, ecosystem services, deep learning.*

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la intensificación de los agrosistemas y la reducción progresiva de la heterogeneidad del paisaje han provocado un acusado descenso de la biodiversidad (Flohre *et al*., 2011). Este proceso se refleja especialmente en el declive de las poblaciones de polinizadores silvestres (Balfour *et al*., 2015), cuyos servicios ecosistémicos son esenciales para el mantenimiento de las funciones ecológicas y la producción alimentaria global (Khalifa *et al*., 2021; Montoya *et al*., 2020). En respuesta, la Unión Europea ha incorporado medidas agroambientales en la Política Agrícola Común (PAC) 2023-2027 orientadas a la promoción de prácticas sostenibles, como los eco-regímenes de espacios de biodiversidad (CE, 2023). Estas prácticas incluyen la implantación de márgenes florales e islas de vegetación, es decir, cubiertas vegetales con más de dos especies florales y dimensiones mínimas de veinte metros de longitud y dos metros de ancho, destinadas a la conservación de polinizadores y fauna auxiliar.

Diversos estudios han documentado los efectos positivos de los márgenes florales sobre la abundancia y diversidad de polinizadores (Ricou *et al*., 2014; Kuppler *et al*., 2023). No obstante, pese a haberse identificado las familias de flora arvense clave, como Brassicaceae, Asteraceae y Fabaceae, persisten lagunas de conocimiento respecto a la composición óptima de especies y a la duración temporal de los servicios ecosistémicos que ofrecen (Schmied *et al*., 2023; Jachowicz y Sigsgaard, 2025)

El éxito funcional de estas infraestructuras ecológicas depende de su correcto diseño, implementación y monitoreo. Sin embargo, el elevado coste asociado al personal cualificado para realizar muestreos extensivos hace imprescindible el desarrollo de metodologías de seguimiento eficientes en tiempo y recursos (Gallmann *et al*., 2022). En este contexto, la integración de teledetección e inteligencia artificial representa una herramienta prometedora para la detección y cuantificación de recursos florales (Chen *et al*., 2019; Gallmann *et al*., 2022), considerando las limitaciones que pueden presentarse en entornos de alta diversidad floral, debidas al pequeño tamaño de las estructuras florales, su superposición u oclusiones parciales y el movimiento por el viento durante la adquisición de imágenes (González *et al*., 2022).

En este marco, el presente estudio propone un método automatizado para la detección y evaluación de la diversidad y riqueza floral en diferentes composiciones de márgenes florales, combinando once especies de flora arvense. El enfoque se basa en la detección de objetos mediante técnicas de aprendizaje profundo, utilizando una red neuronal convolucional de arquitectura YOLOv26, entrenada y validada con imágenes RGB obtenidas mediante UAV. Asimismo, se evalúa la influencia del esquema de etiquetado sobre el rendimiento del modelo, con el objetivo de establecer criterios metodológicos en la detección de recursos florales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y diseño experimental

El estudio se llevó a cabo en la finca experimental del ICA-CSIC "La Poveda", situada en Arganda del Rey (Madrid, España; 40°19ˈ N, 3°29ˈ W; 536 m s.n.m.), durante las campañas de primavera-verano de 2023 y 2024. El conjunto de imágenes procede de un ensayo de campo multipropósito que incluían once especies arvenses pertenecientes a las familias Brassicaceae (*Diplotaxis erucoides* L., *Diplotaxis tenuifolia* L.*, Eruca vesicaria* (L.) Cav.*, Moricandia arvensis* L.), Asteraceae (*Achillea millefolium* L., *Calendula arvensis* L.*, Centaurea cyanus* L.*, Glebionis segetum* L.) y Fabaceae (*Lotus corniculatus* L.*, Melilotus albus* Medik., *Onobrychis viciifolia* Scop.). Esta diversidad de especies se utilizó en el presente trabajo para desarrollar y validar un método automatizado de detección floral.

2.2. Adquisición de imágenes y conjunto de datos

Las imágenes se adquirieron con una cámara RGB DJI Zenmuse P1 (SZ DJI Technology Co., Shenzhen, China) acoplada a un UAV DJI Matrice 300 RTK, operando a una altura de vuelo de 15 m y con un solape frontal y lateral del 70%. Se realizaron seis vuelos por campaña, entre abril y julio, cubriendo la fenología de floración de las once especies objetivo. A partir de las imágenes se generaron ortomosaicos individuales por parcela, posteriormente particionados en teselas de 640 × 640 px para optimizar el procesamiento y el entrenamiento del modelo de detección. El etiquetado se realizó utilizando la herramienta gráfica labelImg (Tzutalin, 2015), generando un total de 19.000 anotaciones, distribuidas equitativamente entre las once especies. Se aplicaron dos esquemas de anotación: (a) unidad floral (UF) en la que cada etiqueta representa una flor individual; y (b) grupo floral (GF) donde cada etiqueta agrupa una o más flores en la misma región.

2.3. Selección y entrenamiento del modelo

La selección del detector de objetos se basó en un diseño comparativo reproducible, utilizando la familia Ultralytics YOLOv26 como arquitectura de referencia por su formulación *end-to-end*, sin la etapa explícita *Non-Maximum Supression* (NMS) y alta eficiencia de despliegue, especialmente relevante para aplicaciones de analítica a bordo en plataformas UAV (Jocher y Qiu, 2026).

Se implementó un enfoque de aprendizaje supervisado, destinado a evaluar el efecto del esquema de etiquetado sobre el desempeño del modelo. Se compararon dos configuraciones de entrenamiento: (a) esquema UF; y (b) esquema UF+GF, manteniendo constantes la arquitectura base, la resolución de entrada y los parámetros de aumento de datos (DA). El entrenamiento de YOLOv26 fue evaluado sobre sus diferentes variantes (n,s,m,l,x) cuya selección ultima atendió a su equilibrio entre capacidad representacional y eficiencia

computacional, aspectos críticos en tareas de monitoreo de biodiversidad en agrosistemas.

2.4. Evaluación del modelo

El rendimiento de las variantes se evaluó mediante métricas estándar de detección de objetos. Se empleo la precisión promedio media (mAP), para cuantificar la exactitud de las cajas delimitadoras de objetos, respondiendo a umbrales moderados de superposición o intersección sobre unión (IoU) del 50% (mAP@0.5), hasta rangos más estrictos del 95% en pasos de 0.05 (mAP@0.5:0.95). Además, se analizaron la precisión (P) que refleja la proporción de detecciones correcta, y la exhaustividad o tasa de recuperación de objetos reales, detectados como verdaderos positivos (*recall*). El equilibrio armónico entre exhaustividad y precisión (F1-score o F1), evalúa el rendimiento global del modelo. La validación final se realizó sobre un subconjunto de 35 imágenes y 1384 etiquetas verificadas como verdad-terreno (V-T).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evaluación del Esquema de etiquetado

El análisis de las métricas de desempeño evidenció una superioridad del modelo YOLOv26m+DA entrenado bajo el esquema de etiquetado UF+GF frente al esquema UF, alcanzando su óptimo rendimiento en la época 39 con un mAP@0.5 de 0.534, un mAP@0.5:0.95 de 0.281, y una precisión y *recall* de 0.528 y 0.558, respectivamente. Se observó un incremento del 5.6% en mAP@0.5 atribuible al etiquetado de conjuntos florales, al mejorar el contexto espacial sobre la densidad y los patrones de agregación de las flores. En condiciones de campo las flores no siempre están aisladas, también constituyen rodales densos con flores muy próximas. El modelo "YOLOv26m+DA_UF+GF" logra capturar esta realidad biológica, reduciendo los falsos negativos en zonas de alta densidad floral donde las unidades individuales se solapan y dificultan la detección única. Además, este modelo gestionó un volumen significativamente mayor de instancias (5778 frente a 3505), demostrando una mayor capacidad de generalización. Así mismo, se solventan dificultades observadas en (Mena *et al*., 2024).

3.2. Análisis de inferencia del Modelo

Al aplicar "YOLOv26m+DA_UF+GF" sobre el conjunto de test de 35 imágenes (que contenían 1384 instancias), se obtuvieron los siguientes rendimientos en condiciones de inferencia real o V-T: mAP@0.5 de 0.528 y mAP@0.5:0.95 de 0.283. Estas métricas son similares a las del entrenamiento global, y reflejan una consistencia sólida para la detección en campo con alta fidelidad taxonómica. y detecta 1099 de 1384 flores. sin errores de clasificación entre clases. La revisión exhaustiva por expertos de inferencias del modelo mostro absoluta correspondían con flores de sus respectivas clases, sin confusión entre clases. En consecuencia, los indicadores de precisión, reflejan su máximo posible, mientras que la métrica *recall* (0.79) es el mejor descriptor de la detección (Tabla1), revelando que la principal limitación reside en la fracción de instancias etiquetadas y no detectadas o falsos negativos (FN). A nivel de clase (Fig. 1), especies como *L. corniculatus y D. tenuifolia* destacan sobre el conjunto de clases con *recall* 0.98 y F1 0.99, seguidos de *C cyanus y G segetum* también muestran alto rendimiento con *recall* > 0,76 y F1 > 87 recuperando casi todas las flores presentes (Tabla 1). Esto sugiere que sus rasgos visuales (tamaño, contraste, estructuras) se ajustan muy bien a un modelo robusto, adecuado para proporcionar detección de riqueza (Fig. 2) y abundancia. Otro grupo de clases muestra métricas conservadoras, con *recall* entre 0.60 y 0.76 y F1 entre 0.75 y 0.87, (*D. erucoides, M. arvensis* y *O. viciifolia*). Ello sugiere una buena capacidad para detección de su riqueza. Considerando que ecológicamente, muchas de estas especies presentan flores más pequeñas e inflorescencias con tonalidades menos contrastadas sobre el fondo, dificultando la detección de abundancia.

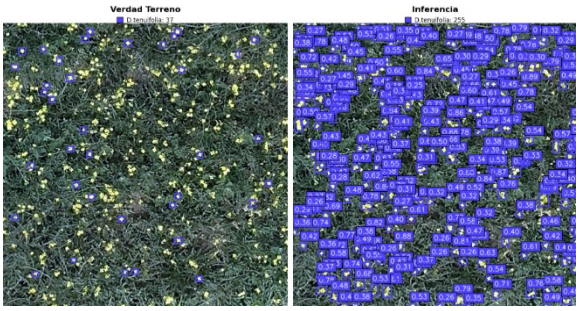


Figura 1. Alta tasa de recuperación de YOLOv26m para la clase floral *D. tenuifolia*

Tabla1. Métricas de rendimiento del modelo YOLOv26m_UF+GF en el conjunto de test para 35 imágenes y 1384 instancias.

Clases	V-T	Pred	VP	FN	P	*Recall*	F1
D. erucoides	57	42	42	15	1	0.74	0.85
E. vesicaria	121	75	75	46	1	0.62	0.76
M. albus	15	10	10	5	1	0.67	0.80
A. millefolium	184	111	111	73	1	0.60	0.75
G. segetum	197	150	150	47	1	0.76	0.87
L. corniculatus	220	215	215	5	1	0.98	0.99
D. tenuifolia	261	255	255	6	1	0.98	0.99
C. arvensis	81	49	49	32	1	0.61	0.75
C. cyanus	96	79	79	17	1	0.82	0.90
M. arvensis	53	40	40	13	1	0.76	0.86
O. viciifolia	99	73	73	26	1	0.74	0.85
Total_35	1384	1099	1099	285	1	0.79	0.89

En contraste, el grupo constituido por *E. vesicaria, M. albus, A. millefolium y C. arvensis* se sitúan en el extremo menos favorable (*recall* < 0.67, F1< 80), con un 40% de las flores presentes sin detectadas (Tabla 1). Esta sub-detección y perdida de *recall* es crítica para clases de color blanco como *D. erucoides, M. albus y E. vesicaria* (Tabla1), condicionadas además por su reducido tamaño y asociación a inflorescencias, superposición parcial entre flores o variabilidad de apertura de flores como ocurre en *C. arvensis.*

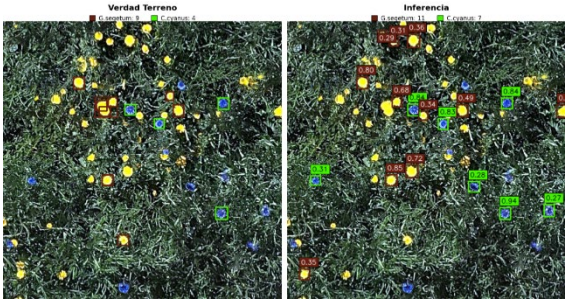


Figura 2. Detección de riqueza floral para las clases *G. segetum* y *C. cyanus.*

4. CONCLUSIONES

La incorporación de grupos florales en el esquema de etiquetado incrementa la capacidad discriminativa del modelo YOLOv26, mejorando la precisión diagnóstica, robustez de clasificación y eficiencia inferencial. Esta estrategia permite una caracterización más fiable de la riqueza y la estructura floral de comunidades arvenses en agrosistemas. Una mejora de exhaustividad en flores blancas y pequeño tamaño optimizaría el modelo.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyecto PID2020-113229RB-C41/AEI/10 y BIOweeding (PID2023-150108OB-C31) financiado por MCIU/AEI/10.13039/501100011033 y FSE+. Juan Diego Mena es beneficiario de la ayuda predoctoral PRE2021-101068 en el marco del programa FPI. Asimismo, el proyecto ECOdigital (ref. MMT24-ICA-01), desarrollado en el programa MOMENTUM CSIC y financiado por el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (Next Generation EU), financia el contrato de Irene Borra-Serrano.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balfour, N. J., Fensome, K. A., Samuelson, E. E. W., & Ratnieks, F. L. W. (2015). Following the dance: Ground survey of flowers and flower-visiting insects in a summer foraging hotspot identified via honey bee waggle dance decoding. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 213*, 265-271. https://doi.org/.1016/10j.agee.2015.08.007

CE, 2023, Approved 28 CAP Strategic Plans (2023-2027). Summary overviewfor 27 Member States. Facts and figures. Obtenido de: Comisión Europea. https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2023-06/approved-28-cap-strategic-plans-2023-27.

Chen, B., Jin, Y., Brown, P., 2019. An enhanced bloom index for quantifying floral phenology using multi-scale remote sensing observations. ISPRS J. Photogramm. *Remote Sens. 156*, 108–120. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.08.006

Flohre, A., Fischer, C., Aavik, T., Bengtsson, J., Berendse, F., Bommarco, R., Ceryngier, P., Clement, (2011). Agricultural intensification and biodiversity partitioning in European landscapes comparing plants, carabids, and birds. *Ecol. Appl. 21*, 1772–1781.

Gallmann, J., Schuepbach, B., Jacot, K., Albrecht, M., Winizki, J., Kirchgessner, N., Aasen, H., (2022). Flower Mapping in Grasslands With Drones and Deep Learning. *Front. PLANT Sci. 12*. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.774965

Gonzáles, D., Hempel de Ibarra, N., Anderson, K., (2022). Remote Sensing of Floral Resources for Pollinators – New Horizons From Satellites to Drones. *Front. Ecol. Evol. 10*. https://doi.org/10.3389/fevo.2022.869751

Jachowicz, N., & Sigsgaard, L. (2025). Highly diverse flower strips promote natural enemies more in annual field crops: A review and meta-analysis. Agriculture, *Ecosystems and Environment, 381*. https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109412

Jocher, G., & Qiu, J. (2026). Ultralytics YOLO26. https://github.com/ultralytics/ultralytics

Khalifa, S.A., Elshafiey, E.H., Shetaia, A.A., El-Wahed, A.A.A., Algethami, A.F., Musharraf, S.G., AlAjmi, M.F., Zhao, C., Masry, S.H., Abdel-Daim, M.M., (2021). Overview of bee pollination and its economic value for crop production. Insects 12, 688.

Kuppler, J., Neumüller, U., Mayr, A.V., Hopfenmüller, S., Weiss, K., Prosi, R., Schanowski, A., Schwenninger, H.-R., Ayasse, M., Burger, H., (2023). Favourite plants of wild bees. *Agric. Ecosyst. Environ. 342*, 108266. https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108266

Mena, J. D., Dorado, J., Guerra, J. G., Mesías-Ruiz, G. A., Peña, J. M., & Borra-Serrano, I. (2024). Detección de crucíferas en márgenes de biodiversidad en ecosistemas agrarios mediante el análisis de imágenes dron y arquitecturas CNN. *Revista de Ciências Agrárias*,*47*(1). https://doi.org/10.19084/rca.34859.

Montoya, D., Haegeman, B., Gaba, S., De Mazancourt, C., Loreau, M., 2020. Habitat fragmentation and food security in crop pollination systems. bioRxiv 2020.05.28.120550. https://doi.org/10.1101/2020.05.28.120550

Ricou, C., Schneller, C., Amiaud, B., Plantureux, S., Bockstaller, C., 2014. A vegetation-based indicator to assess the pollination value of field margin flora. *Ecol. Indic. 45*, 320–331. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.022.

Schmied, H., Getrost, L., Hamm, A., & Dünzkofer, T. (2023). The flower strip dilemma (FSD): An overlooked challenge in nature conservation and a possible first step towards a solution by combining different aged flower strips. A*griculture, Ecosystems and Environment, 347*. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108375

Tzutalin. (2015). LabelImg [Python]. https://github.com/tzutalin/labelImg.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.264

Simulación y análisis de la velocidad de propagación del fuego en entornos forestales a partir de nubes de puntos TLS

Simó-Martí, Marina [1] **Torralba, Jesús** [1] **Crespo-Peremarch, Pablo** [1] **Ruiz, Luis Ángel** [1]

[1] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n 46022

ORCID: Simó-Martí 0000-0001-9605-9645 Torralba 0000-0001-8644-8604 Crespo-Peremarch 0000-0003-2241-4493 Ruiz 0000-0003-0073-7259

Correspondencia: msimmar@upv.es jetorpe@upv.es pabcrepe@cgf.upv.es laruiz@upv.es

RESUMEN

La representación realista de la heterogeneidad estructural del combustible constituye uno de los principales retos en la modelización física del comportamiento del fuego. En este trabajo se desarrolla una metodología reproducible para integrar en Fire Dynamics Simulator (FDS) un escenario real de bosque mediterráneo escaneado mediante TLS. La aproximación propuesta permite incorporar explícitamente la heterogeneidad estructural del combustible en la simulación, estimando la densidad de combustible a escala de vóxel a partir de la estructura tridimensional derivada de la nube de puntos TLS. La biomasa se calculó mediante relaciones alométricas y se distribuyó espacialmente en función de la proporción de retornos dentro de cada vóxel, asumiendo una distribución heterogénea tanto a nivel de estrato como a nivel individual. El escenario voxelizado resultante se implementó en FDS y se simuló un incendio bajo condiciones ambientales constantes. Los resultados muestran que las variaciones en la continuidad horizontal, la carga y la densidad de combustible influyen directamente en la aceleración o desaceleración del frente. Asimismo, permiten analizar la dinámica del fuego y evaluar la relación entre la velocidad de propagación y la estructura espacial de la vegetación, mostrando el potencial de este enfoque para representar escenarios forestales con mayor realismo estructural.

Palabras clave: *densidad de combustible, RoS, Lidar, modelos CFD, incendios forestales*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Simulación y análisis de la velocidad de propagación del fuego en entornos forestales a partir de nubes de puntos TLS

Simó-Martí, Marina [1], Torralba, Jesús [1], Crespo-Peremarch, Pablo [1], Ruiz, Luis Ángel [1]

[1] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València.

0000-0001-9605-9645, msimmar@upv.es ; 0000-0001-8644-8604, jetorpe@upv.es

0000-0003-2241-4493, pabcrepe@cgf.upv.es ; 0000-0003-0073-7259, laruiz@upv.es

Resumen: La representación realista de la heterogeneidad estructural del combustible constituye uno de los principales retos en la modelización física del comportamiento del fuego. En este trabajo se desarrolla una metodología reproducible para integrar en Fire Dynamics Simulator (FDS) un escenario real de bosque mediterráneo escaneado mediante TLS. La aproximación propuesta permite incorporar explícitamente la heterogeneidad estructural del combustible en la simulación, estimando la densidad de combustible a escala de vóxel a partir de la estructura tridimensional derivada de la nube de puntos TLS. La biomasa se calculó mediante relaciones alométricas y se distribuyó espacialmente en función de la proporción de retornos dentro de cada vóxel, asumiendo una distribución heterogénea tanto a nivel de estrato como a nivel individual. El escenario voxelizado resultante se implementó en FDS y se simuló un incendio bajo condiciones ambientales constantes. Los resultados muestran que las variaciones en la continuidad horizontal, la carga y la densidad de combustible influyen directamente en la aceleración o desaceleración del frente. Asimismo, permiten analizar la dinámica del fuego y evaluar la relación entre la velocidad de propagación y la estructura espacial de la vegetación, mostrando el potencial de este enfoque para representar escenarios forestales con mayor realismo estructural.

Palabras clave: densidad de combustible, RoS, LiDAR, modelos CFD, incendios forestales

Simulation and analysis of fire rate of spread in forest environments using TLS point clouds.

***Abstract**: Realistic representation of fuel structural heterogeneity constitutes one of the main challenges in physics-based fire behavior modelling. In the present work, we have developed a reproducible methodology to integrate a real Mediterranean forest scenario scanned by a terrestrial laser scanner into the Fire Dynamics Simulator (FDS). The proposed approach explicitly incorporates three-dimensional fuel structure into the simulation by estimating voxel-scale fuel density derived from the TLS point cloud. Biomass was quantified using allometric equations and was spatially allocated according to the proportion of returns within each voxel, assuming heterogeneous distribution at both stratum and individual levels. The resulting voxelized scenario was implemented in FDS, and fire was simulated under constant environmental conditions. Results indicate that variations in horizontal fuel continuity, fuel load, and bulk density directly affect fire front acceleration and deceleration. Furthermore, they enable the analysis of fire dynamics and the evaluation of the relationship between the rate of spread and the spatial structure of vegetation, highlighting the potential of this approach to represent forest scenarios with greater structural realism.*

***Keywords**: bulk density, RoS, LiDAR, CFD models, wildfires*

1. INTRODUCCIÓN

La estructura tridimensional del bosque y la distribución de los combustibles forestales influyen de forma determinante en el comportamiento de los incendios forestales. La continuidad vertical entre estratos y la continuidad horizontal dentro de un mismo estrato, condicionadas por la proximidad y conectividad de los combustibles, regulan la propagación del fuego y modulan su intensidad y velocidad. La configuración espacial y el grado de agrupación del combustible, en parte, determinan su disponibilidad energética y su susceptibilidad a la ignición, pues modifican los flujos aerodinámicos locales, alterando la velocidad y la turbulencia del viento en el interior de la masa vegetal. Al obstruir o canalizar el aire, la estructura condiciona los procesos de transferencia de calor (convección y radiación) y, en consecuencia, la dinámica de avance del

frente de llama, pudiendo dificultar su progresión o favorecer su intensificación (Atchley *et al*., 2021).

Por ello, una caracterización del combustible que supere las descripciones promediadas e incorpore explícitamente su heterogeneidad espacial permite reducir la incertidumbre en la modelización del comportamiento del fuego, especialmente en lo relativo a la interacción entre el combustible y el viento. *Fire Dynamics Simulator* (FDS) es un modelo de dinámica de fluidos computacional que permite esta modelización en 3D con un elevado nivel de detalle. En FDS, las propiedades físicas del combustible están representadas principalmente a partir de su densidad, la relación superficie-volumen de las partículas (S:V) y la humedad del mismo. Hasta el momento, en las simulaciones con FDS se han definido escenarios homogéneos siguiendo los modelos de combustible o escenarios sintéticos simplificando la estructura de los componentes de la vegetación mediante cuerpos geométricos. Hasta donde alcanza nuestro conocimiento, únicamente dos trabajos han introducido datos TLS para describir con detalle la estructura de la vegetación y generar las celdas de combustible correspondientes (Marcozzi *et al*., 2023), y solo Cooper (2022) lo aplica en un entorno forestal.

En este estudio se ha simulado la velocidad de propagación del fuego (*rate of spread*, RoS) en un escenario real de bosque mediterráneo a partir de la integración de datos TLS en el simulador de propagación del fuego FDS. Los objetivos son: i) describir una metodología reproducible que permita transferir la densidad de la vegetación en escenarios reales en el modelo FDS a partir de datos adquiridos con TLS; y ii) analizar la velocidad de propagación del fuego y su relación con la densidad y la carga de combustible, así como con su distribución espacial.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología se divide en las siguientes secciones: i) adquisición de datos de campo y TLS, ii) procesamiento de las nubes de puntos, iii) caracterización de la densidad de combustible y iv) simulación del comportamiento del fuego con FDS y estimación de la RoS.

2.1. Parcela forestal de estudio

La parcela de estudio se encuentra en el Parque Natural de *La Serra d'Espadà* (provincia de Castelló) aproximadamente en las coordenadas 39.96º N y 0.41º O. La vegetación de la zona es característica del bosque mediterráneo, presentando gran heterogeneidad estructural y un notable solapamiento entre estratos de vegetación. En concreto, nuestra parcela está compuesta por un estrato arbóreo monoespecífico e irregular de *Pinus halepensis* Mill y un denso estrato arbustivo con predominancia de *Quercus coccifera* L., *Salvia rosmarinus* Spenn. y *Erica multiflora* L. Se seleccionó una parcela rectangular de 20 × 40 m, con pendiente prácticamente nula, para facilitar la toma de datos de campo y la posterior simulación en FDS.

2.2. Adquisición de datos de campo y TLS

La campaña de campo tuvo lugar en febrero de 2025. Se realizaron mediciones típicas de inventario forestal para caracterizar el estrato arbóreo, incluyendo el diámetro a la altura del pecho así como el registro de la posición GPS de cada árbol mediante un receptor Emlid Reach RS3 multi-band RTK GNSS. Respecto al estrato arbustivo, dada la alta densidad de matorral y el solape entre las copas de los individuos, se optó por dividir el total del área en 24 microparcelas de ≈ 33 m^2 y medir la altura media y el porcentaje de cobertura en cada una.

Por último, las nubes de puntos fueron registradas usando un láser escáner 3D Trimble TX6. Con el objetivo de minimizar al máximo las oclusiones, se realizaron 17 escaneos distribuidos de forma homogénea por toda la parcela. Se distribuyeron dianas esféricas por la parcela y se georreferenciaron mediante GPS. Posteriormente, se registraron y georreferenciaron las nubes de puntos TLS con Trimble RealWorks© v11.

2.3. Procesamiento de nubes de puntos

Tras el registro y la georreferenciación, se identificaron los puntos de control en el terreno y se generó un modelo digital del terreno para normalizar las alturas de la nube de puntos con LASTools v230212. A continuación, se segmentó la nube de puntos de manera semimanual usando 3DForest y CloudCompare v2.13.2, obteniendo una nube de puntos correspondiente a todo el estrato del matorral, y diversas nubes de puntos correspondientes a los árboles individualizados.

2.4. Voxelización y estimación de la densidad de combustible

El enfoque metodológico empleado para la integración de los datos supone una distribución espacialmente heterogénea de la biomasa tanto a nivel de estrato como de planta (p.ej., heterogeneidad a nivel de copa). En consecuencia, la densidad del combustible ($Biomasa/Volumen_{aparente}$) se estimó a escala de vóxel a partir de la estructura tridimensional proporcionada por la nube de puntos TLS. Para ello, en primer lugar, se calculó la biomasa a partir de relaciones alométricas aplicadas a nuestras mediciones de campo. En el caso de los árboles, se estimó la biomasa de la copa a nivel individual siguiendo las ecuaciones propuestas por Ruiz-Peinado *et al*., (2011). En el caso del matorral se estimó un único valor de biomasa por cada microparcela aplicando las ecuaciones de Montero *et al*., (2020) para agrupaciones de matorral (a partir de la altura media y el porcentaje de cobertura medidos en campo).

Las nubes de puntos segmentadas se voxelizaron a una resolución de 0,5 m. A cada vóxel se le asignó un valor a partir de la proporción entre el número de retornos del vóxel y el número total de retornos de la planta segmentada. Para estimar la biomasa a nivel de vóxel se multiplicó la biomasa a nivel de planta por el valor de cada vóxel correspondiente a la proporción de retornos a nivel de planta segmentada. Finalmente, la densidad de combustible a nivel de vóxel se calculó a partir de los valores de biomasa estimados y el volumen de cada vóxel. El resultado fueron dos ficheros voxelizados (uno por cada estrato).

2.5. Simulación del comportamiento del fuego con FDS y estimación de la RoS

El escenario voxelizado y transformado al formato de entrada requerido por FDS define la distribución espacial del combustible utilizada en la simulación. Además del escenario de vegetación, el modelo se completa con parámetros físicos y ambientales que influyen en la velocidad del fuego (Dimitrakopoulos & Panov, 2001) (Tabla 1). La RoS se calculó para 3 perfiles longitudinales de 43 × 3 m en X e Y considerando toda la dimensión vertical. La tasa de propagación se estimó a lo largo de cada perfil para evaluar la influencia de la distribución espacial del combustible sobre la dinámica del frente de fuego. Posteriormente, se compararon los resultados entre perfiles teniendo en cuenta la diferente disposición de los combustibles en cada uno de ellos.

Tabla 1. Parámetros principales de la simulación.

Parámetro	Valor
Tiempo de simulación	180 s
Viento constante	5 $m \cdot s^{-1}$
Pendiente	0º
$HCM_{arbolado}$	25 %
$HCM_{matorral}$	21 %
$S:V_{arbolado-hojas}$	6249 m^{-1}
$S:V_{matorral-hojas}$	2755 m^{-1}
$S:V_{ramillas}$	888 m^{-1}

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los datos de salida proporcionados por FDS se analizó la evolución del avance del frente del fuego en función del tiempo (Fig. 1). Para los tres perfiles evaluados, la RoS efectiva (avance neto del frente) presentó valores similares (36.4, 32.01, 31.91 $m \cdot min^{-1}$), lo que indica que el fuego alcanzó el final del dominio prácticamente de forma simultánea en las tres secciones, favorecido por la continuidad del estrato arbustivo. Sin embargo, el análisis detallado del perfil de evolución revela cambios bruscos en la velocidad de avance, cuya intensidad difiere entre perfiles. En este trabajo solo se muestra el perfil 1 por ser el más representativo del tipo de bosque en el área de estudio.

La Figura 2 permite realizar un análisis más exhaustivo del perfil 1, integrando la carga de combustible (2.a), la sección longitudinal XZ del escenario voxelizado con la densidad de combustible (2.b), y la sección XZ de la nube de puntos TLS (2.c), los cuales se han representado con los valores instantáneos de RoS calculados a lo largo del eje X. La comparación conjunta de estos gráficos permite relacionar los cambios de velocidad más bruscos observados en la Figura 1 con los cambios en la estructura y la densidad del combustible a lo largo del perfil de vegetación. En la Figura 2 se identifican tres zonas clave:

(i) Entre los 7 y 10 m se registran los valores máximos de RoS en colores rojos intensos (Fig. 2c). Esta zona coincide con una menor carga de combustible (Fig. 2a), baja densidad de combustible (Fig. 2b) y ausencia de continuación horizontal entre copas. En la evolución temporal (Fig. 1) este tramo se muestra con una pendiente pronunciada.

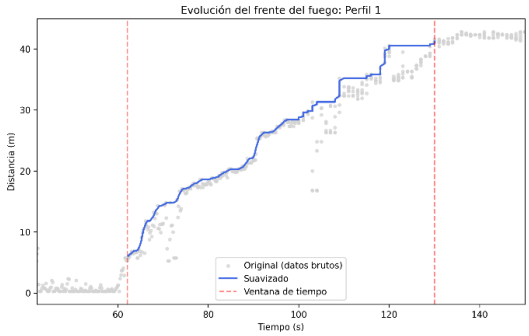


Figura 1. Evolución del frente del fuego en el perfil 1. En el eje X se muestra el tiempo de la simulación (en segundos), y en el Y la posición del frente a lo largo del perfil (en metros).

(ii) Entre los 15 y 25 m las velocidades de propagación son mínimas. Este tramo presenta una pendiente más moderada (Fig. 1) y coincide con la presencia de arbolado denso, con valores elevados de densidad y carga de combustible (Fig. 2).

(iii) El tramo entre los 22 y 26 m también muestra un cambio brusco de la RoS, asociado a una interrupción de la continuidad horizontal entre las copas. En esta zona el combustible está más aireado y hay una disminución progresiva de la densidad. A partir de los 30 m, el perfil muestra variaciones en la velocidad más suavizadas que en los tramos anteriores y coincide con una zona de apertura de copas y menor compactación estructural.

En conjunto, los resultados muestran que, aunque la RoS efectiva es similar entre perfiles a escala global, la dinámica local del frente de fuego está fuertemente condicionada por la heterogeneidad estructural del combustible. Las variaciones en la continuidad horizontal, la carga y la densidad influyen directamente en la aceleración o desaceleración del frente, probablemente no solo por la cantidad de biomasa disponible, sino también por su efecto sobre el flujo de aire. Las discontinuidades horizontales favorecen una mayor ventilación del frente de llama, incrementando el aporte de oxígeno y modificando los patrones locales de convección, lo que puede traducirse en aumentos puntuales de la RoS. Por el contrario, las zonas con elevada densidad y continuidad estructural tienden a amortiguar el flujo de aire, reduciendo la oxigenación y limitando la eficiencia de la combustión.

4. CONCLUSIÓN

Los resultados muestran una relación consistente entre las variaciones locales de la RoS y la heterogeneidad estructural del combustible, particularmente en términos de densidad y continuidad horizontal, evidenciando la relevancia de representar explícitamente la estructura tridimensional del combustible en la modelización del comportamiento del fuego. La integración de datos TLS en FDS ha permitido representar explícitamente la estructura tridimensional del combustible y analizar su influencia en la dinámica del frente de fuego en un escenario real de bosque mediterráneo. Aunque requiere un análisis más exhaustivo y la incorporación de métricas estructurales cuantitativas para consolidar

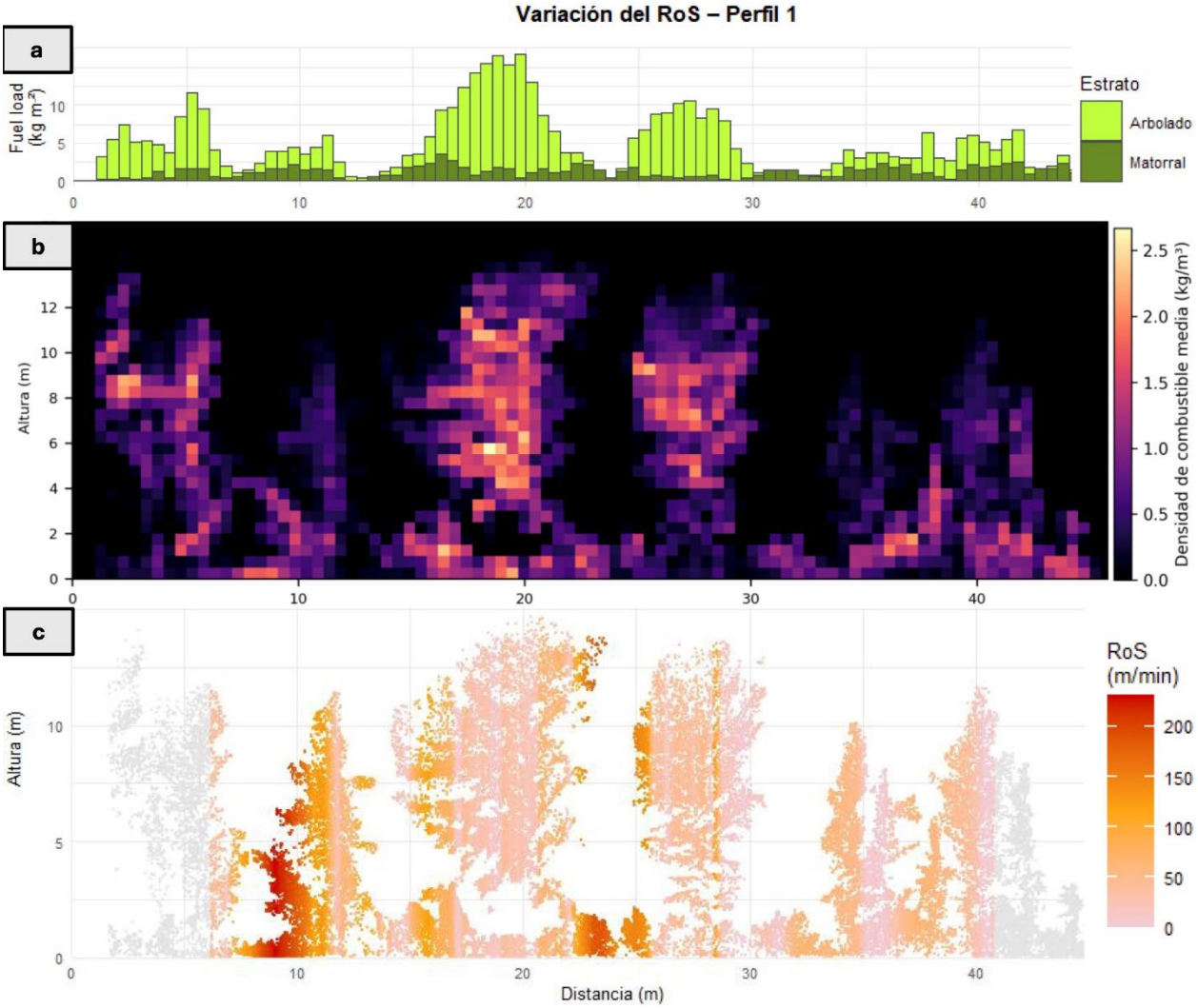


Figura 2. Representación de la sección longitudinal del perfil 1 a partir de diferentes variables: a) distribución de la carga de combustible (kg/m^2) para cada estrato, b) sección longitudinal XZ del escenario voxelizado con la densidad de combustible promediada (en kg/m^3), c) sección XZ de la nube de puntos con variación del color de los puntos en función del RoS (m/min).

estos hallazgos, el enfoque propuesto establece una base metodológica para desarrollar simulaciones más realistas y avanzar hacia la definición de estrategias de gestión y mantenimiento de la vegetación adaptadas a condiciones estructurales específicas.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la ayuda PRE2021-099526, y los proyectos I+D+I PID2020-117808RB-C21 y PID2024-158591OB-I00 financiados por MCIN/AEI/ 10.13039/ 501100011033 y por FSE+.

6. REFERENCIAS

Atchley, A. L., Linn, R., Jonko, A., Hoffman, C., Hyman, J. D., Pimont, F., Sieg, C., & Middleton, R. S. (2021). Effects of fuel spatial distribution on wildland fire behaviour. *International Journal of Wildland Fire*, *30*(3), 179. https://doi.org/10.1071/WF20096

Cooper, Z. T. (2022). *Using terrestrial LiDAR to quantify forest structural heterogeneity and inform 3D fire modeling*. Sonoma State University.

Dimitrakopoulos, A. P., & Panov, P. I. (2001). Pyric properties of some dominant Mediterranean vegetation species. *International Journal of Wildland Fire*, *10*(1), 23–27. https://doi.org/10.1071/WF01003

Marcozzi, A. A., Johnson, J. V., Parsons, R. A., Flanary, S. J., Seielstad, C. A., & Downs, J. Z. (2023). Application of LiDAR Derived Fuel Cells to Wildfire Modeling at Laboratory Scale. *Fire*, *6*(10), 394. https://doi.org/10.3390/fire6100394

Montero, G., López-Leiva, C., Ruiz-Peinado, R., López-Senespleda, E., Onrubia, R., & Pasalodos, M. (2020). *Producción de biomasa y fijación de carbono por los matorrales españoles y por el horizonte orgánico superficial de los suelos forestales* (P. y A. Ministerio de Agricultura, Ed.).

Ruiz-Peinado, R., Del Rio, M., & Montero, G. (2011). New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, *20*(1), 176–188.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.267

Cartografía de especies vegetales en áreas de restauración forestal mediante análisis de imágenes basado en objetos

Freitas Souza, Jhiorranni [1] **Ferreira Lopes Machado, Aroldo** [2] **Araújo Fonseca de Mendonça, Bruno** [2] **Peña Barragán, José Manuel** [1]

[1] CSIC, España

[2] UFRRJ, Brasil

ORCID: Freitas Souza 0009-0001-6295-9415 Ferreira Lopes Machado 0000-0001-6506-9728 Araújo Fonseca de Mendonça 0000-0003-0288-0024 Peña Barragán 0000-0003-4592-3792

Correspondencia: fjhiorranni@gmail.com aroldomachafo@yahoo.com.br brunoafmendonca@gmail.com jmpena@ica.csic.es

RESUMEN

La clasificación de imágenes multiespectrales obtenidas por UAV mediante segmentación y análisis de imágenes basado en objetos (OBIA) representa un enfoque prometedor para la cartografía precisa de especies vegetales con el objetivo de diseñar estrategias de gestión más eficientes, selectivas y sostenibles. Este estudio se llevó a cabo en un área de restauración de la Mata Atlántica en la Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), en Cachoeiras de Macacu, en Río de Janeiro (RJ), Brasil. Las imágenes multiespectrales se capturaron en mayo de 2024 con un Mavic 3M, a 40 m de altitud, y se evaluaron cuatro clasificadores supervisados (BAYES, KNN, RF y SVM) a partir de la segmentación generada con el algoritmo multi-resolution del programa eCognition Developer. BAYES presentó exactitudes entre 74 % y 100 % con un error de desacuerdo de 0,1, mientras que SVM alcanzó exactitudes entre 74 % y 97 % con un error de desacuerdo de 0,12. KNN y RF mostraron exactitudes ligeramente menores, entre 67–100 % y 79–100 %, respectivamente, enfrentando también confusiones entre clases vegetativas espectralmente similares (FS, VP, CM y UH). En conjunto, BAYES y SVM demostraron ser los más adecuados para el mapeo y monitoreo de la vegetación en áreas de restauración forestal en las condiciones del presente estudio, mientras que KNN y RF constituyen alternativas útiles.

Palabras clave: *gestión agro-forestal; segmentación; modelos supervisados; OBIA.*

Fecha de recepción: 19 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Clasificación basada en objetos de especies vegetales en áreas de restauración forestal usando imágenes multiespectrales adquiridas con UAV

Freitas Souza, Jhiorranni [(1)], Ferreira Lopes Machado, Aroldo [(2)], Araújo Fonseca de Mendonça, Bruno [(2)], Peña, José Manuel [(1)]

[(1)] CSIC, España.

0009-0001-6295-9415, fjhiorranni@gmail.com ; 0000-0003-4592-3792, jmpena@ica.csic.es

[(2)] UFRRJ, Brasil.

0000-0001-6506-9728, aroldomachafo@yahoo.com.br

0000-0003-0288-0024, brunoafmendonca@gmail.com.

Resumen: La clasificación de imágenes multiespectrales obtenidas por UAV mediante segmentación y análisis de imágenes basado en objetos (OBIA) representa un enfoque prometedor para la cartografía precisa de especies vegetales con el objetivo de diseñar estrategias de gestión más eficientes, selectivas y sostenibles. Este estudio se llevó a cabo en un área de restauración de la Mata Atlántica en la Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), en Cachoeiras de Macacu, en Río de Janeiro (RJ), Brasil. Las imágenes multiespectrales se capturaron en mayo de 2024 con un Mavic 3M, a 40 m de altitud, y se evaluaron cuatro clasificadores supervisados (BAYES, KNN, RF y SVM) a partir de la segmentación generada con el algoritmo multi-resolution del programa eCognition Developer. BAYES presentó exactitudes entre 74 % y 100 % con un error de desacuerdo de 0,1, mientras que SVM alcanzó exactitudes entre 74 % y 97 % con un error de desacuerdo de 0,12. KNN y RF mostraron exactitudes ligeramente menores, entre 67–100 % y 79–100 %, respectivamente, enfrentando también confusiones entre clases vegetativas espectralmente similares (FS, VP, CM y UH). En conjunto, BAYES y SVM demostraron ser los más adecuados para el mapeo y monitoreo de la vegetación en áreas de restauración forestal en las condiciones del presente estudio, mientras que KNN y RF constituyen alternativas útiles.

Palabras clave: gestión agro-forestal; segmentación; modelos supervisados; OBIA.

Object-based classification of plant species in forest restoration areas using multispectral imagery captured by UAV

Abstract: *The classification of multispectral images acquired by UAVs using object-based image analysis (OBIA) represents a promising approach for the accurate mapping of plant species, with the aim of designing more efficient, selective, and sustainable management strategies. This study was conducted in an Atlantic Forest restoration area within the Guapiaçu Ecological Reserve (REGUA) in Cachoeiras de Macacu, Rio de Janeiro (RJ), Brazil. The multispectral images were captured in May 2024 using a Mavic 3M at an altitude of 40 m, and four supervised classifiers (BAYES, KNN, RF, and SVM) were evaluated from the segmentation generated using the multi-resolution algorithm of the eCognition Developer software. BAYES achieved accuracies ranging from 74% to 100% with a misclassification error of 0.1, while SVM achieved accuracies ranging from 74% to 97% with a misclassification error of 0.12. KNN and RF showed slightly lower accuracies, ranging from 67–100% and 79–100%, respectively, and also faced confusion between spectrally similar vegetation classes (FS, VP, CM, and UH). Overall, BAYES and SVM proved to be the most suitable for vegetation mapping and monitoring in forest restoration areas under the conditions of the present study, while KNN and RF constitute useful alternatives.*

Keywords*: agroforestry management; segmentation; supervised models; OBIA.*

1. INTRODUCCIÓN

El manejo de las malas hierbas constituye un desafío recurrente en las áreas de restauración ecológica y los sistemas forestales, debido a la elevada capacidad competitiva de estas especies y a su distribución espacial heterogénea. Los métodos tradicionales de monitoreo basados en levantamientos de campo suelen ser costosos y limitan la rapidez en la toma de decisiones.

En este contexto, la detección remota se ha destacado como una herramienta estratégica para el mapeo de la vegetación y el desarrollo de estrategias de manejo localizado, lo que permite una mayor eficiencia y precisión en las intervenciones. La teledetección mediante sensores multiespectrales en drones permite obtener imágenes de alta resolución que facilitan la identificación de especies nativas y malas hierbas.

Paralelamente, los enfoques de segmentación orientada a objetos asociados a algoritmos de aprendizaje automático han demostrado un alto rendimiento en la clasificación de imágenes de alta resolución. Métodos basados en el aprendizaje profundo se han aplicado ampliamente en la identificación y el mapeo de malas hierbas, lo que permite comparar el rendimiento de diferentes algoritmos y aumentar la solidez de la clasificación (Mesías-Ruiz *et al*., 2025).

Por lo tanto, en este trabajo se propone la combinación de imágenes multiespectrales obtenidas por drones y la aplicación de segmentación y modelos de clasificación supervisada mediante OBIA con el objetivo de cartografiar y diferenciar especies vegetales en áreas de restauración forestal para apoyar su manejo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área experimental

El experimento se llevó a cabo en la Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), situada en el municipio de Cachoeiras de Macacu, Río de Janeiro, Brasil, con coordenadas geográficas de referencia 22°25'S y 42°44'W (Fig. 1).

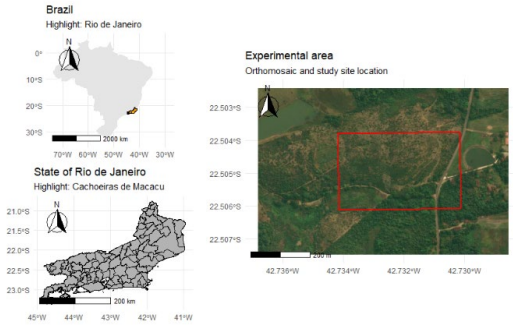


Figura 1. Área experimental en REGUA, en Cachoeiras de Macacu, Río de Janeiro, Brasil (Mayo 2024).

2.2. Adquisición y procesamiento de imágenes multiespectrales mediante UAV

El 9 de mayo de 2024 se realizó un vuelo a 40 m de altitud y 80% de solape longitudinal y transversal utilizando el VANT Mavic 3M, con sensor multiespectral formado por 4 canales que capturaron imágenes en las bandas verde, rojo, rojo-borde e infrarrojo cercano con una resolución espacial de 1,28 cm/p.

A continuación, se generaron los ortomosaicos con Agisoft Metashape (v. 2.1.4) y se seleccionaron seis clases temáticas basadas en sus patrones espectrales: suelo (SO), especies forestales (FS), *Vernonia polyanthes* (VP), *Chromolaena maximilianii* (CM), *Urochloa humidicola* (UH) y sombras. La identificación de las clases se realizó sobre el terreno, utilizando bocetos con la ubicación de las plántulas, y posteriormente se cartografiaron en QGIS con la ayuda del ortomosaico. Por último, se recortó el área experimental para centrarse en la región de las especies cartografiadas (Fig. 2).

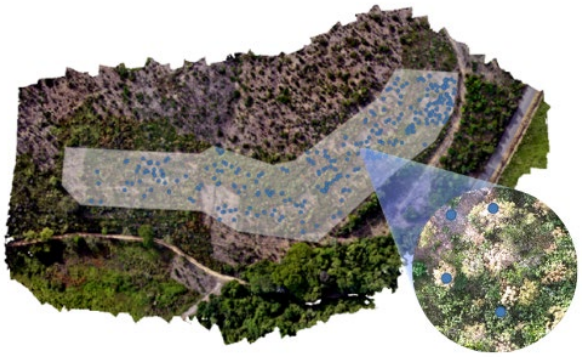


Figura 2. Superficie experimental recortada y puntos de identificación de las muestras (Mayo 2024).

Se utilizó un conjunto de 580 muestras, en el que cada muestra correspondía a un único píxel representativo de su respectiva clase temática. Las clases presentes alrededor de cada especie arbórea se identificaron, registraron y clasificaron en el ortomosaico digital utilizando el software QGIS (versión 3.4.10).

2.3. Clasificación supervisada

La clasificación digital se realizó a partir de la segmentación generada al aplicar el algoritmo *Multi-resolution segmentation* implementado en el software *eCognition Developer* 10.5, usando los parámetros siguientes: 1) Escala de 570, 2) Forma y color (*shape/colour*) *de* 0.1 y 0,9, y 3) Compacidad (*compactness*) de 0.5. La segmentación en un entorno OBIA permitió agrupar los píxeles con características espectrales y espaciales similares en segmentos homogéneos.

Seguidamente, para el entrenamiento de los modelos de clasificación se seleccionaron muestras representativas de cada clase, que sirvieron para alimentar los cuatro algoritmos de clasificación supervisada evaluados: bayesiano (BAYES), K-vecinos más próximos (KNN), bosque aleatorio (RF) y máquina de vectores de soporte (SVM).

2.4. Evaluación de la precisión

Para evaluar la precisión de la clasificación, de cada clase se seleccionaron 100 muestras para entrenamiento y 30 muestras para validación. Los clasificadores se evaluaron usando el entorno informático R (versión 4.5.1), mediante la construcción de la matriz de confusión entre los datos previstos y observados de cada clase, y el cálculo de las métricas de precisión global (1), precisión por clase (2) y tasa de error (3) (Foody, 2020).

Se calcularon los índices de desacuerdo cuantitativo (Dc), de asignación (Da) y global (Dg) para identificar si los errores estaban asociados a la cantidad de píxeles por clase o a la distribución espacial de las clases

(Pontius Jr. & Millones, 2011).

Para complementar la evaluación estadística, se realizó un análisis espacial de los resultados de la clasificación a partir de los mapas de cada clase temática y el cálculo del porcentaje de área ocupada por cada clase, lo que permitió realizar una comparación cuantitativa entre los diferentes modelos de clasificación.

3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

El análisis comparativo de los cuatro clasificadores indicó que las clases SO y SH presentaron los mejores resultados en todos los modelos, mientras que las mayores tasas de confusión se produjeron entre las clases vegetativas FS, CM y UH (Fig. 3)

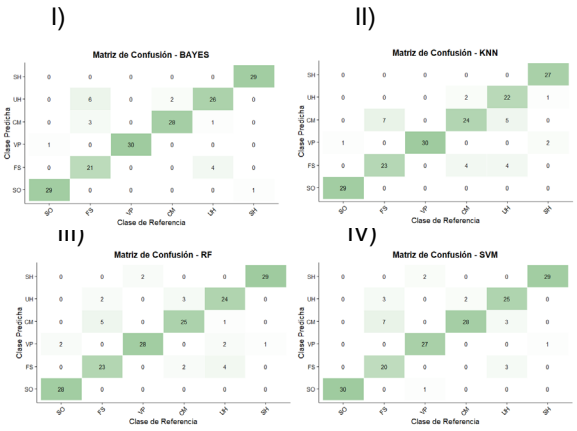


Figura 3. Matriz de confusión de los cuatro clasificadores: I) BAYES; II) KNN; III) RF; IV) SVM.

El modelo Bayes presentó alto rendimiento para clases vegetativas, entretanto la superposición espectral entre formaciones herbáceas y arbustivas fue evidenciada en la matriz de confusión, donde UH se clasificó con frecuencia como FS o CM, lo que coincide con estudios que señalan que clases con comportamientos espectrales similares tienden a confundirse en clasificaciones supervisadas debido a la falta de separación espectral clara (Zhang & Xie, 2019).

Los clasificadores probabilísticos basados en supuestos de independencia condicional, como los basados en Bayes, tienden a presentar un buen rendimiento cuando las clases tienen una clara separabilidad, pero muestran una mayor sensibilidad cuando existe correlación entre las bandas espectrales y la heterogeneidad intraclase (Maxwell *et al*., 2021).

Estudios anteriores que aplicaron clasificadores tradicionales a la identificación de especies forestales también reportaron desafíos similares a los observados en este trabajo. Por ejemplo, Loiola *et al*. (2023) utilizaron RF, SVM, KNN y Bayes para clasificar siete especies forestales a partir de datos espectrales de hojas, evidenciando limitaciones en escenarios de superposición espectral entre clases.

La evaluación del desempeño de los cuatro algoritmos revela diferencias en la clasificación de las clases vegetativas FS, VP, CM y UH (Tabla 1).

En general, UH presentó valores de F1 relativamente altos en todos los modelos (BAYES = 80 %, KNN = 79 %, RF = 80 %, SVM = 82 %), aunque se observó cierta confusión con FS y CM, lo que indica superposición espectral entre formaciones herbáceas y arbustivas. FS mostró F1 de 76 % en BAYES, 75 % en KNN, 78 % en RF y 75 % en SVM, reflejando dificultades similares para diferenciarla de otras clases vegetativas. VP alcanzó los mejores resultados en BAYES y KNN (F1 = 98 % y 95 %, respectivamente) y ligeramente menores en RF y SVM (89 % y 93 %), mientras que CM presentó F1 entre 82 % y 90 % según el algoritmo.

Tabla 1. Evaluación de la exactitud de la clasificación con los modelos BAYES, KNN, RF y SVM.

Modelo	Métricas (%)	Clases temáticas					
		SO	FS	VP	CM	UH	SH
BAYES	Accuracy	97	84	97	88	76	100
	Precision	97	70	100	93	84	97
	Recall	97	84	97	88	76	100
	F1-Score	97	76	98	90	80	98
KNN	Accuracy	100	74	91	67	88	100
	Precision	97	77	100	80	71	90
	Recall	100	74	91	67	88	100
	F1-Score	98	75	95	73	79	95
RF	Accuracy	100	79	85	81	83	94
	Precision	93	77	93	83	77	97
	Recall	100	79	93	83	77	97
	F1-Score	97	78	89	82	80	95
SVM	Accuracy	97	87	96	74	83	94
	Precision	100	67	90	93	81	97
	Recall	97	87	96	74	83	94
	F1-Score	98	75	93	82	82	95

SO: Suelo; FS: Especies Forestales; VP: Vernonia polyanthes; CM: Chromolaena maximilianii; UH: Urochloa humidicola; SH: Sombras.

La evaluación de la descomposición de los errores indicó que Bayes presentó un error total bajo (0,10), con predominio del componente cuantitativo (0,07), lo que evidencia una buena consistencia en la representación proporcional de las clases (Fig. 4).

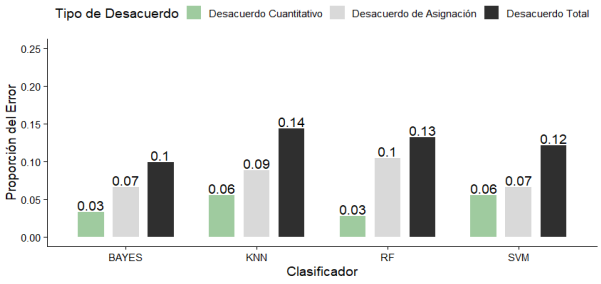


Figura 4. Componentes de desacuerdo total, cuantitativo y de asignación para los modelos.

El SVM presentó un error total de 0,12, con equilibrio entre los componentes cuantitativo (0,07) y de asignación (0,06), lo que demuestra su capacidad para discriminar espacialmente las especies. RF (0,13) y KNN (0,14) mostraron un rendimiento inferior, combinando errores moderados en los dos componentes. Estos resultados indican que BAYES y SVM proporcionan cartografía más fiables para el manejo de malezas, permitiendo estimaciones precisas de las proporciones de clases y apoyo a la toma de decisiones, mientras que RF y KNN pueden utilizarse de forma complementaria.

Todos los modelos presentaron un error de asignación menor que el cuantitativo, lo que indica que las clases están bien posicionadas espacialmente y que la mayor parte del error se debe a diferencias en la proporción de las clases en el mapa, y no a su distribución en el espacio, comportamiento evidenciado en las matrices de confusión (Pontius Jr. & Millones, 2011).

El análisis espacial de las clases indica que los clasificadores BAYES y SVM presentan una menor variación en la estimación de la ocupación entre las clases, lo que evidencia la consistencia en la representación proporcional de las categorías (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis espacial de los modelos y clases temáticas.

Clases	BAYES (%)	KNN (%)	RF (%)	SVM (%)
SO	23	22	19	23
FS	7	6	6	5
VP	13	16	17	15
CM	13	15	15	12
UH	20	18	19	20
SH	23	23	24	25

SO: Suelo; FS: Especies Forestales; VP: Vernonia polyanthes; CM: Chromolaena maximilianii; UH: Urochloa humidicola; SH: Sombras.

KNN y RF presentan pequeñas diferencias, principalmente en VP y CM, lo que sugiere que algunas variaciones en la ocupación pueden atribuirse a la segmentación y sensibilidad del modelo. Es importante destacar que, durante la recolección, VP se encontraba en fase de floración, y el comportamiento espectral de las flores pudo haberse confundido con la clase SO lo que contribuyó a la subestimación observada y a los errores de asignación entre estas clases.

La Figura 5 muestra la distribución espacial de las clases temáticas según los clasificadores BAYES y SVM, destacando la ocupación de las clases y permitiendo identificar las áreas de malas hierbas y especies de interés, lo que facilita la toma de decisiones y el manejo eficiente del territorio.

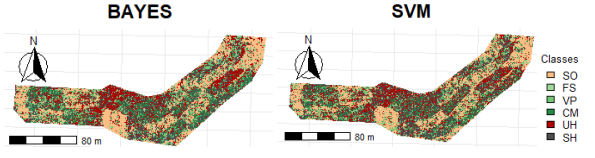


Figura 5. Distribución espacial de las clases temáticas según los clasificadores BAYES y SVM.

4. CONCLUSIÓN

Entre los clasificadores evaluados, BAYES y SVM mostraron la mayor exactitude y fiabilidad en la diferenciación de clases vegetativas, mientras que KNN y RF también tuvieron un desempeño adecuado, aunque con mayor confusión entre clases espectralmente similares. Los errores de desacuerdo se concentraron principalmente en la asignación espacial de las clases más que en la cuantificación de sus proporciones, lo que refuerza la robustez de BAYES y SVM para el mapeo y monitoreo de la vegetación en áreas de restauración forestal.

5. AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por el proyecto PID2023-150108OB-C31 (MCIU/AEI/10.13039/501100011033 y FSE+). El trabajo de Jhiorranni Freitas está financiado por beca de movilidad del Centro de Perfeccionamiento Personal de Enseño Superior (CAPES) - Doctorado Sándwich en el Extranjero -88881.127227/2025-0.

6. REFERENCIAS

Foody, G. M. (2020). Remote sensing of tropical forests: Classification and accuracy assessment. Routledge.

Loiola, T. M., Fantinel, R. A., Santos, F. D., Bastos, F., Schuh, M. S., Fernandes, P., Simões de Oliveira, B. A., & Pereira, R. S. (2023). Use of Machine Learning Algorithms in the Classification of Forest Species. *Anuário do Instituto de Geociências, 46*, 50490. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2023_46_50490

Maxwell, A. E., Warner, T. A., & Fang, F. (2021). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *Remote Sensing, 13*(4), 645. https://doi.org/10.3390/rs13040645

Mesías-Ruiz, G. A., Borra-Serrano, I., Peña, J. M., & colaboradores. (2025). Multispecies weed mapping using deep learning on UAV imagery. *Precision Agriculture*. Advance online publication. https://doi.org/10.xxxx/s11119-025-10309-2

Pontius, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. International *Journal of Remote Sensing, 32(15)*, 4407–4429. https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923

Zhang, X., & Xie, Y. (2019). A dynamic classification scheme for mapping spectrally similar classes: Application to wetland classification. International *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 83*, 101914. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101914

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.276

Mapa de Interfaz Urbano-Forestal de Navarra

Bonifaz Barba, Gabriel [1] **Álvarez-Mozos, Jesús** [1] **González-Audícana, María** [1] **Alcasena, Fermín** [1]

[1] Universidad Pública de Navarra, España

ORCID: Bonifaz Barba 0000-0002-1344-4917 Álvarez-Mozos 0000-0002-6518-2533 González-Audícana 0000-0002-2430-3853 Alcasena 0000-0002-2007-9487

Correspondencia: gabriel.bonifaz@unavarra.es jesus.alvarez@unavarra.es maria.audicana@unavarra.es fermin.alcasena@unavarra.es

RESUMEN

La interfaz urbano-forestal es el territorio en el que confluyen la trama urbana y el entorno forestal, y constituye una zona critica en caso de incendio. Su correcta delimitación es un aspecto clave para la disminución de los riesgos asociados a estos eventos. Navarra carecía de un análisis espacial de estas áreas de interfaz, por lo que el objetivo de este estudio es presentar el mapa detallado de interfaz urbano-forestal para Navarra. Para ello se parte de información vectorial de edificaciones, el mapa de cultivos y aprovechamientos, y métricas LiDAR relacionadas con la altura y estructura de la vegetación. De los 10.391 km2 de superficie que comprende Navarra, el 0,58% corresponde a zonas altamente urbanizadas, mientras que el 49,15% son áreas caracterizadas por baja densidad de edificaciones o usos agrícolas y el 40,76% a zonas con vegetación arbolada y matorral, sin presencia de edificaciones. En cuanto a la superficie de interfaz urbano-forestal (intermix e interfaz) y rural disperso, el 2,17% corresponde a zonas de interfaz (225,82 km2), el 0,59% a zonas intermix (61,54 km2) y el 6,73% a áreas de rural disperso (689,81 km2). El mapa generado constituye una herramienta objetiva para apoyar la gestión preventiva y planificación forestal que podrá contribuir a la reducción del riesgo de incendios.

Palabras clave: *interfaz urbano-forestal, LiDAR, incendios forestales, gestión preventiva, planes preventivos*

Fecha de recepción: 20 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 20 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Mapa de Interfaz Urbano-Forestal de Navarra

Bonifaz Barba, Gabriel [(1)], Álvarez-Mozos, Jesús [(1)], González-Audícana, María [(1)], Alcasena, Fermín [(1)]

[(1)] Universidad Pública de Navarra, España.

0000-0002-1344-4917, gabriel.bonifaz@unavarra.es ; 0000-0002-6518-2533, jesus.alvarez@unavarra.es

0000-0002-2430-3853, maria.audicana@unavarra.es ; 0000-0002-2007-9487, fermin.alcasena@unavarra.es

Resumen: La interfaz urbano-forestal es el territorio en el que confluyen la trama urbana y el entorno forestal, y constituye una zona critica en caso de incendio. Su correcta delimitación es un aspecto clave para la disminución de los riesgos asociados a estos eventos. Navarra carecía de un análisis espacial de estas áreas de interfaz, por lo que el objetivo de este estudio es presentar el mapa detallado de interfaz urbano-forestal para Navarra. Para ello se parte de información vectorial de edificaciones, el mapa de cultivos y aprovechamientos, y métricas LiDAR relacionadas con la altura y estructura de la vegetación. De los 10.391 km^2 de superficie que comprende Navarra, el 0,58% corresponde a zonas altamente urbanizadas, mientras que el 49,15% son áreas caracterizadas por baja densidad de edificaciones o usos agrícolas y el 40,76% a zonas con vegetación arbolada y matorral, sin presencia de edificaciones. En cuanto a la superficie de interfaz urbano-forestal (intermix e interfaz) y rural disperso, el 2,17% corresponde a zonas de interfaz (225,82 km^2), el 0,59% a zonas intermix (61,54 km^2) y el 6,73% a áreas de rural disperso (689,81 km^2). El mapa generado constituye una herramienta objetiva para apoyar la gestión preventiva y planificación forestal que podrá contribuir a la reducción del riesgo de incendios.

Palabras clave: interfaz urbano-forestal, LiDAR, incendios forestales, gestión preventiva, planes preventivos

Mapping Wildland-Urban Interface in Navarre

***Abstract**: The wildland-urban interface is the area where the urban fabric and the surrounding wildland vegetation meet, and it constitutes a critical zone in the event of wildfire. Consequently, the accurate delineation and characterization of these interface areas are essential for reducing wildfire-related risks. However, Navarre currently lacks a comprehensive spatial assessment of its wildland-urban interface. The objective of this study was to presents a wildland-urban interface map of Navarre by integrating building footprint polygons, the crop and land use map, and LiDAR-derived vegetation structural metrics, including canopy height and canopy cover. Out of the 10.391 km² that comprise Navarre, 0,58% corresponds to highly urbanized areas, whereas 49,15% consists of areas characterized by low building density or agricultural uses, and 40,76% corresponds to areas covered by forest and shrub vegetation without the presence of buildings. Regarding the extent of wildland–urban interface (intermix and interface) and dispersed rural areas, 2,17% corresponds to interface zones (225,82 km²), 0,59% to intermix zones (61,54 km²), and 6,73% to dispersed rural areas (689,81 km²). The resulting map constitutes an objective tool to support preventive management and forest planning, thereby contributing to wildfire risk reduction.*

***Keywords**: wildland-urban interface, LiDAR, wildfire, mitigation management, prevention planning*

1. INTRODUCCIÓN

La creciente interacción entre las áreas urbanizadas y los ecosistemas forestales ha dado lugar a la expansión del interfaz urbano-forestal (UIF), considerada una de las zonas de mayor riesgo frente a incendios forestales (Schug *et al*., 2023). En estas zonas, la proximidad entre edificaciones y vegetación incrementa la probabilidad de ignición estructural y dificulta las acciones de prevención y extinción. Además, los cambios en el uso del suelo, el abandono de áreas rurales y la expansión urbana han contribuido a la desaparición de paisajes fragmentados en mosaico, lo que favorece la continuidad del combustible vegetal cerca de las zonas habitadas.

Durante la campaña de 2002, los grandes incendios ocurridos en Navarra superaron la capacidad de extinción, con más de 17.000 ha quemadas y ocho incendios de más de 250 ha, lo que puso de manifiesto la necesidad de desarrollar un plan específico para

mitigar incendios catastróficos. A pesar del incremento del riesgo, Navarra todavía no dispone de una cartografía base de referencia que permita delimitar de forma homogénea la trama urbana en contacto con los combustibles forestales y que pueda emplearse como soporte para el diseño de planes de autoprotección.

El objetivo de este estudio es elaborar un mapa de la interfaz urbano-forestal con una resolución de 150 m, aplicando una metodología consolidada en la bibliografía científica (Alcasena *et al*., 2018; Martinuzzi *et al*., 2015; Schug *et al*., 2023; Sirca *et al*., 2017). En este sentido, se distinguen dos tipos de interfaz: el intermix, donde las edificaciones y la vegetación forestal se entremezclan, y la interfaz clásica, donde las edificaciones de una zona urbanizada presentan un límite de contacto bien definido con superficies forestales densas. Además, las zonas de baja densidad de edificaciones en zonas con cobertura forestal son clasificadas como rural disperso. Con esto se pretende cuantificar las superficies de rural disperso, interfaz e intermix, y el porcentaje de edificaciones dentro de cada una de estas zonas. Este producto permitirá delimitar la superficie forestal en el entorno más próximo a las zonas habitadas y servirá como base para la planificación de medidas de gestión y control preventivo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos de edificaciones

La Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra (IDENA) contiene información vectorial actualizada de las edificaciones en Navarra. Esta capa está compuesta por polígonos georreferenciados que delimitan cada edificación e incluye cerca de 510.000 edificios, tanto residenciales como industriales. Aunque, en base a sus metadatos, su frecuencia de actualización se realiza según sea requerido, su última actualización se realizó el 23/01/2026 (Gobierno de Navarra, DP Economía y Hacienda, 2026).

2.2. Datos de vegetación

El Mapa de Cultivos y Aprovechamientos (MCA) de Navarra (2023) muestra la distribución de los tipos de cubiertas dentro de la provincia de Navarra. Entre ellas se observan los cultivos herbáceos y leñosos, zonas improductivas, especies forestales de coníferas, frondosas y matorrales. Esta capa tiene una frecuencia de actualización bianual y se encuentra disponible en IDENA (2023).

2.3. Nube de puntos LiDAR

Se utilizaron los datos de la segunda cobertura del proyecto del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, realizada del 8 de septiembre al 16 de noviembre del 2017, disponible en (Gobierno de Navarra, DP Desarrollo Rural y Medio Ambiente, 2017), Para esta cobertura se utilizó una cámara SPL100 con una precisión en XY de 20 cm y en Z de 15 cm, además de una densidad de 10 puntos por m^2,

Con las nubes de puntos disponibles para Navarra se obtuvo el Modelo Digital de Superficie (MDS) a 10 m de resolución espacial. Esta información permite la caracterización de atributos de la estructura forestal como la altura de copas. Para obtener la cobertura de vegetación forestal se usó la altura del MDS teniendo en cuenta alturas entre 0,5 m a 3 m para matorrales y superiores a 3 m para arbolado, que coincidan con las cubiertas forestales del MCA.

2.4. Delimitación de las zonas de interfaz urbano-forestal

Para la delineación de las zonas de Interfaz Urbano-Forestal (IUF) se integraron datos espaciales de densidad de edificaciones y cobertura forestal (Fig1). Los criterios de referencia usados para el cálculo de densidad de edificaciones, la cobertura forestal, superficie mínima de masas forestales arboladas y la distancia máxima de exposición a transporte de pavesas se adoptaron de estudios previos (Shimada *et al*., 2014; Alcasena *et al*., 2018; Schug *et al*., 2023). Todos los datos fueron integrados y analizados a una resolución espacial de 150 m. Primero, se obtuvo el mapa de densidad de edificaciones utilizando la capa de polígonos de la que se extrajeron los centroides de cada edificación. En estudios similares utilizan los bloques censales como criterio espacial, ya que Navarra no dispone de dicha cartografía, como alternativa se adoptó una malla cuadricular de 450 m (0,2025 km^2) como unidad de referencia para el cálculo de la densidad de edificaciones a una resolución de 150 m. Cada cuadricula se clasificó en las siguientes categorías de densidad: muy baja (< 6,18 edificios/km^2), baja (≥ 6,18 edificios/km^2 < 49,42 edificios/km^2), media-alta (≥ 49,42 edificios/km^2).

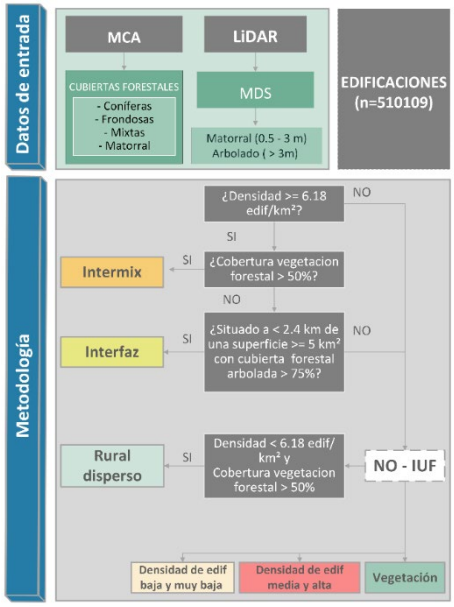


Figura 1. Diagrama aplicado para delimitar la IUF. Adaptado de Martinuzzi *et al.* (2015)

De la cobertura de vegetación forestal (matorral y arbolada), obtenida a través del MDS, se generó una malla cuadricular de 150 m, y se reclasifico en pixeles de: vegetación forestal (si más del 50% de pixeles son de cubierta forestal) y no-vegetación (si menos del 50% de pixeles son de cubierta forestal). De la misma manera, se obtuvo una malla cuadricular de 150 m con pixeles de vegetación forestal arbolada (MSD > 3 m), si más del

75% de pixeles son de cubierta forestal arbolada. Posteriormente los pixeles se agruparon en polígonos de masas forestales arboladas y se seleccionaron polígonos forestales con superficie > 5 km^2, garantizando que se excluyan parques urbanos (Martinuzzi *et al*., 2015). Estas masas forestales se emplean para identificar las áreas potenciales que, en caso de fuego de copas, pueden originar pavesas capaces de alcanzar la IUF. La interfaz son zonas caracterizadas por una densidad mayor a 6.18 edificios por km^2, pero con presencia de vegetación forestal menor a 50%, que se encuentran a menos de 2.4 km de distancia (distancia máxima de saltos de fuego o pavesas) de una masa forestal arbolada (superficie $\geq$ 5 km^2) en la cual la vegetación forestal arbolada cubre más del 75% de su área (Schug *et al*., 2023), El intermix corresponde a áreas definidas por una densidad de edificaciones mayor a 6,18 edificios por km^2 y una cobertura forestal arbolada igual o superior al 50%. Además, se consideró la categoría rural disperso constituida por áreas con una cobertura vegetal forestal mayor al 50% y una densidad menor a 6,18 edificios por km^2.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este estudio aplica un marco de análisis geoespacial para caracterizar la distribución de las áreas urbanas densamente pobladas, las zonas rurales dispersas y las áreas de interfaz e intermix. La resolución espacial (150 m) utilizada permitió una representación adecuada de la densidad de edificaciones a nivel local y la delimitación de la interfaz urbano-forestal. En Navarra, la interfaz urbano-forestal presenta una marcada diferenciación territorial, vinculada a la variabilidad espacial de los patrones de asentamiento de los grandes núcleos urbanos y de la trama rural dispersa, así como a la orografía y a la distribución de la vegetación y los combustibles forestales (Fig2).

De los 10.391 km^2 de superficie que comprende Navarra, el 0,58% corresponde a zonas altamente urbanizadas, mientras que el 49,15% son áreas caracterizadas por baja densidad de edificaciones o usos agrícolas y el 40,76% a zonas con vegetación arbolada y matorral, sin presencia de edificaciones. En cuanto a la superficie de interfaz urbano-forestal (intermix e interfaz) y rural disperso, el 2,17% corresponde a zonas de interfaz (225,82 km^2), el 0,59% a zonas intermix (61,54 km^2) y el 6,73% a áreas de rural disperso (689,81 km^2) (Fig3.a). Por otro lado, se observa un mayor porcentaje de edificaciones en el área de interfaz (40,1%) y un menor porcentaje en el intermix y rural disperso (2,2% y 2,1%, respectivamente) (Fig3.b).

En el norte predomina una baja densidad de edificaciones, con asentamientos propios del rural disperso organizados en una trama atomizada de pequeños caseríos y pueblos de reducido tamaño repartidos por el territorio, un patrón que también caracteriza el ámbito pirenaico. Esta configuración genera numerosos puntos de contacto aislados entre edificaciones y vegetación, lo que se traduce en un borde urbano forestal muy fragmentado y en una exposición espacialmente extensa. En consecuencia, la gestión preventiva resulta difícil de abordar con medidas uniformes y requiere, en gran medida, la implicación directa de los propietarios en la reducción del combustible inmediato y en la mejora de la autoprotección de las viviendas.

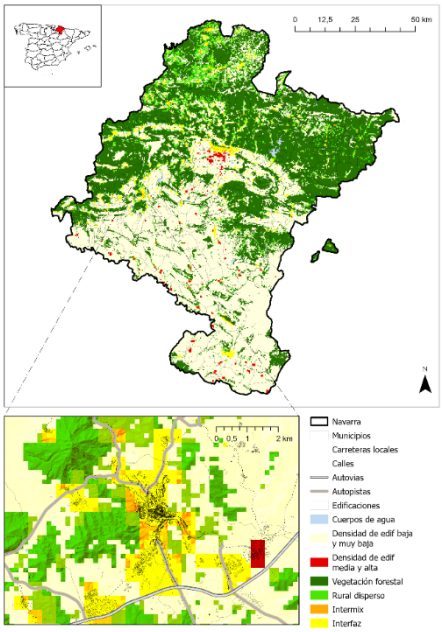


Figura 2. Mapa de interfaz urbano-forestal

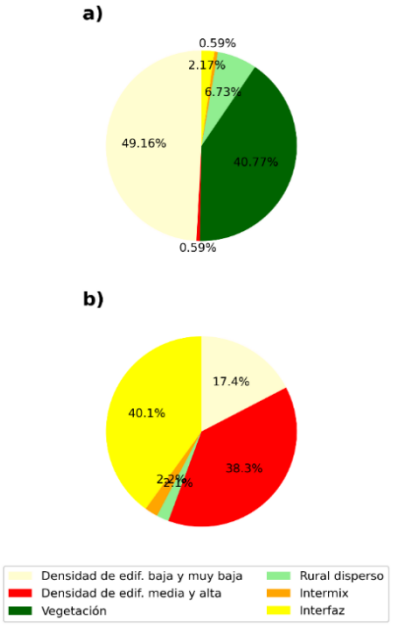


Figura 3. Interfaz urbano-forestal en números. a) Porcentaje de área y b) edificaciones

En la zona central se observa un mayor número de edificaciones por núcleo y una estructura espacial más heterogénea, donde las áreas de intermix e interfaz se distribuyen en un mosaico complejo, que combina laderas con cubierta forestal y fondos de valle dominados por usos agrícolas. En este sector, el intermix se manifiesta como una mezcla estrecha de edificaciones con vegetación forestal mediterránea, con presencia de robledales y encinares junto con

repoblaciones de pino laricio y pino carrasco, especialmente en las periferias de los grandes núcleos. En este contexto, el riesgo para las edificaciones se asocia tanto al contacto directo con el combustible cercano como a la proyección de pavesas durante episodios extremos, lo que demanda respuestas coordinadas a escala municipal mediante planes de autoprotección que ordenen y prioricen actuaciones sobre el entorno inmediato. Por su parte, la interfaz se concentra en franjas contiguas a masas forestales más continuas, donde la propagación del incendio desde el medio forestal hacia el entorno urbano presenta un límite claro y una zona de impacto directo, por lo que su delimitación detallada resulta clave para orientar la planificación preventiva. En el sur, la orografía es más suave y los núcleos urbanos tienden a ser de mayor tamaño. Las áreas de interfaz son relativamente escasas y se concentran junto a los principales macizos forestales dominados por repoblaciones protectoras de pino carrasco y, de forma local, en sectores próximos a formaciones de ribera. Este patrón sugiere una exposición más focalizada y, en consecuencia, una mayor eficacia potencial de actuaciones selectivas y priorizadas sobre áreas concretas.

En el marco de la implantación de los Planes de Actuación Municipal ante el Riesgo de Incendios Forestales (PAMIF: OF 222/2016, 16 de junio), el mapa de IUF propuesto podría emplearse como una cartografía de referencia, objetiva y comparable entre municipios, para sustentar la zonificación preventiva y la toma de decisiones. Al aportar una delimitación coherente de las tipologías de interfaz y del rural disperso, facilitaría traducir el diagnostico territorial a medidas operativas del PAMIF, como la priorización de ámbitos de actuación, la definición de criterios y unidades de gestión para tratamientos de combustible en el entorno de las edificaciones, la planificación de inspecciones y actuaciones de autoprotección, y la orientación de necesidades de señalización y mejora de infraestructuras locales. Además, su integración en los SIG municipales favorecería la trazabilidad y justificación técnica de las medidas, así como su actuación periódica y el seguimiento de su grado de implantación contribuyendo a una aplicación más eficiente y consistente de la prevención frente a incendios forestales y de interfaz de Navarra.

4. CONCLUSIONES

La metodología aplicada permite identificar y caracterizar las zonas de interfaz urbano-forestal en Navarra, Aunque estas áreas representan una proporción relativamente limitada de la superficie total, su relevancia es significativa debido a su elevada exposición al riesgo de incendios forestales y a la potencial afectación sobre infraestructuras y población. El porcentaje de área de rural disperso evidencia la necesidad de considerar no solo los núcleos urbanos consolidados, sino también las edificaciones aisladas y su entorno inmediato en las estrategias de prevención. En este contexto, la integración de información geoespacial de alta resolución, particularmente datos LiDAR para la caracterización estructural de la vegetación, constituye una herramienta eficaz para delimitar con mayor precisión estas zonas y evaluar su vulnerabilidad. El mapa generado proporciona una base objetiva para el desarrollo de gestión preventiva y planificación forestal que contribuya a la reducción del riesgo de incendios.

5. AGRADECIMIENTOS

Proyecto de investigación: Valorización de residuos forestales para la producción de Biochar y su aplicación en agricultura: avanzando hacia una economía circular en Navarra “PC24-FORESTCHAR-007-002-023”, La contribución de Fermín Alcasena fue financiada por el proyecto Talento Senior ANDIA (0011-3947-2022-000001).

6. REFERENCIAS

Alcasena, F. J., Evers, C. R., & Vega-Garcia, C. (2018). The wildland-urban interface raster dataset of Catalonia. *Data in Brief*, *17*, 124-128. https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.12.066

Gobierno de Navarra, DP Desarrollo Rural y Medio Ambiente. (2017). *Segunda cobertura LiDAR de Navarra* [Dataset; Laz]. https://filescartografia.navarra.es

Gobierno de Navarra, DP Desarrollo Rural y Medio Ambiente. (2023). *Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de Navarra (2023)* (Dataset OCUPAC_Pol_MCA_VE2023) [Esri shapefile]. https://geoportal.navarra.es

Gobierno de Navarra, DP Economía y Hacienda. (2026). *Edificaciones. Recintos de edificación* (Dataset CATAST_Pol_Edificacion) [Esri shapefile]. https://filescartografia.navarra.es

Martinuzzi, S., Stewart, S. I., Helmers, D. P., Mockrin, M. H., Hammer, R. B., & Radeloff, V. C. (2015). *The 2010 wildland-urban interface of the conterminous United States* (NRS-RMAP-8; p. NRS-RMAP-8). USDA, Forest Service, Northern Research Station. https://doi.org/10.2737/NRS-RMAP-8

PAMIF: OF 222/2016, Legislation No. OF 222/2016 (16 de junio). https://www.lexnavarra.navarra.es/detalle.asp?r=37630

Schug, F., Bar-Massada, A., Carlson, A. R., Cox, H., Hawbaker, T. J., Helmers, D., Hostert, P., Kaim, D., Kasraee, N. K., Martinuzzi, S., Mockrin, M. H., Pfoch, K. A., & Radeloff, V. C. (2023). The global wildland–urban interface. *Nature*, *621*(7977), 94-99. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06320-0

Shimada, M., Itoh, T., Motooka, T., Watanabe, M., Shiraishi, T., Thapa, R., & Lucas, R. (2014). New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010). *Remote Sensing of Environment*, *155*, 13-31. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.014

Sirca, C., Casula, F., Bouillon, C., García, B. F., Fernández Ramiro, M. M., Molina, B. V., & Spano, D. (2017). A wildfire risk oriented GIS tool for mapping Rural-Urban Interfaces. *Environmental Modelling & Software*, *94*, 36-47. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.024

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.278

Evaluación de los servicios ecosistémicos en los bosques templados de Hircania mediante la integración de datos de múltiples fuentes

Zeinali, Laya [1] **Sohrabi, Hormoz** [1] **Quiros, Elia** [2] **Immitzer, Markus** [3]

[1] Tarbiat Modares University, Irán

[2] Universidad de Extremadura, Escuela Politécnica, Cáceres, Spain.

[3] BOKU University, Department of Ecosystem Management, Climate and Biodiversity, Institute of Geomatics, Vienna, Austria.

ORCID: zeinali 0009-0000-5198-0211 Sohrabi 0000-0001-6936-5292 Quiros 0000-0002-8429-045X Immitzer 0000-0001-6758-1207

Correspondencia: layazeinaliyadegari@gmail.com hormozsohrabi@gmail.com equiros@unex.es markus.immitzer@boku.ac.at

RESUMEN

Los servicios ecosistémicos son un componente clave del capital natural y permiten evaluar la salud de los ecosistemas. Los ecosistemas forestales destacan por su producción de madera, captura de carbono y conservación de la biodiversidad, funciones que dependen en gran medida de su gestión. Los bosques hircanianos, antiguos bosques templados situados en la costa sur del mar Caspio y reconocidos como Patrimonio Mundial por su alto valor ecológico, presentan gran diversidad y estructura compleja. Este estudio integró datos satelitales, LiDAR, variables topográficas y 2543 parcelas de campo para estimar el volumen de madera, biomasa aérea y carbono en más de dos millones de hectáreas. Se estimó un volumen en pie de 524 millones de m³, equivalente a 314,4 millones de toneladas de biomasa aérea, de las cuales 157,2 millones corresponden a carbono almacenado. Además, se calculó una producción de oxígeno de 419,4 millones de toneladas. El valor económico del almacenamiento de carbono se estimó en 2986 millones de dólares, y el potencial de producción de madera en 145 150 millones de dólares. Los resultados resaltan la gran importancia ecológica y económica de estos bosques y la necesidad de una gestión sostenible para preservar sus servicios ecosistémicos.

Palabras clave: *Servicios ecosistémicos, Bosques Hircanianos, cuantificación, modelización, teledetección.*

Fecha de recepción: 20 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 20 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación de los servicios ecosistémicos en los bosques templados de Hircania mediante la integración de datos de múltiples fuentes

Zeinali Yadegari, Laya [(1)], Sohrabi, Hormoz [(1)], Quirós, Elia [(2)] Immitzer, Markus [(3)]

[(1)] Department of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Irán.

0009-0000-5198-0211, zeinaliyadegarilaya@modares.ac.ir

0000-0001-6936-5292, hsohrabi@modares.ac.ir

[(2)] Universidad de Extremadura, España.

0000-0002-8429-045X, equiros@unex.es

[(3)] Department of Ecosystem Management, Climate and Biodiversity, BOKU University, Austria.

0000-0001-6758-1207, markus.immitzer@boku.ac.at

Resumen: Los servicios ecosistémicos son un componente clave del capital natural y permiten evaluar la salud de los ecosistemas. Los ecosistemas forestales destacan por su producción de madera, captura de carbono y conservación de la biodiversidad, funciones que dependen en gran medida de su gestión. Los bosques hircanianos, antiguos bosques templados situados en la costa sur del mar Caspio y reconocidos como Patrimonio Mundial por su alto valor ecológico, presentan gran diversidad y estructura compleja. Este estudio integró datos satelitales, LiDAR, variables topográficas y 2543 parcelas de campo para estimar el volumen de madera, biomasa aérea y carbono en más de dos millones de hectáreas. Se estimó un volumen en pie de 524 millones de m³, equivalente a 314,4 millones de toneladas de biomasa aérea, de las cuales 157,2 millones corresponden a carbono almacenado. Además, se calculó una producción de oxígeno de 419,4 millones de toneladas. El valor económico del almacenamiento de carbono se estimó en 2986 millones de dólares, y el potencial de producción de madera en 145 150 millones de dólares. Los resultados resaltan la gran importancia ecológica y económica de estos bosques y la necesidad de una gestión sostenible para preservar sus servicios ecosistémicos.

Palabras clave: Servicios ecosistémicos, Bosques Hircanianos, cuantificación, modelización, teledetección.

Ecosystem Services Evaluation in the Hyrcanian Temperate Forests using Multi-Source Data Integration

***Abstract**: Ecosystem services are a key component of natural capital and enable the health of ecosystems to be assessed. Forest ecosystems are notable for their production of wood, carbon sequestration, and biodiversity conservation, functions that depend largely on how they are managed. The Hyrcanian forests, ancient temperate forests located on the southern coast of the Caspian Sea and recognized as World Heritage Sites for their high ecological value, are highly diverse and complex in structure. This study integrated satellite data, LiDAR, topographic variables, and 2,543 field plots to estimate the volume of wood, above-ground biomass, and carbon in more than two million hectares. A standing volume of 524 million m³ was estimated, equivalent to 314.4 million tons of above-ground biomass, of which 157.2 million tons correspond to stored carbon. In addition, oxygen production was calculated at 419.4 million tons. The economic value of carbon storage was estimated at $2.986 billion, and the potential for wood production at $145.15 billion. The results highlight the great ecological and economic importance of these forests and the need for sustainable management to preserve their ecosystem services.*

***Keywords**: Ecosystem Services, Hyrcanian Forests, Quantification, Modeling, Remote Sensing.*

1. INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos se refieren a los bienes y beneficios que proporcionan los ecosistemas en condiciones de integridad ecológica y estabilidad funcional y que contribuyen directamente al bienestar humano. La valoración de los servicios ecosistémicos constituye un marco analítico que genera pruebas cuantitativas sobre la importancia económica y funcional de los bienes y servicios ecosistémicos, lo que ayuda a

los planificadores y responsables de la toma de decisiones en la gobernanza ambiental, económica y social. Según el marco de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, los servicios ecosistémicos se clasifican en cuatro categorías principales: servicios de aprovisionamiento, regulación, culturales y de apoyo (MEA, 2005).

Los ecosistemas forestales desempeñan un papel fundamental en la prestación de servicios ecosistémicos; sin embargo, las presiones antropogénicas, como la deforestación, la fragmentación del hábitat y la expansión agrícola, suponen una amenaza considerable para su integridad. La evaluación oportuna y coherente de los servicios ecosistémicos puede servir como un sustituto eficaz para evaluar el estado de los ecosistemas y la salud ecológica.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) recomienda integrar datos de observación de la Tierra con mediciones de campo para estimar la superficie forestal y las reservas de carbono, mejorando la valoración de los servicios ecosistémicos (Espejo, 2020). Dado que los estudios de campo presentan limitaciones, las imágenes satelitales de alta resolución y su integración con datos de inventario permiten desarrollar modelos forestales robustos (Tian *et al*., 2023). Sin embargo, en Irán, y especialmente en los bosques hircanos, su aplicación sigue siendo limitada, sin existir un análisis integral que cuantifique conjuntamente la producción de madera y la captura de carbono; este estudio contribuye a cubrir dicho vacío mediante la integración de datos satelitales y de campo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Los bosques de Hircania, un patrimonio natural de varios millones de años de antigüedad situado a lo largo de la costa sur del mar Caspio, representan uno de los vestigios más singulares de los antiguos bosques templados de hoja ancha. Estos bosques se caracterizan por estructuras de rodales de edades desiguales, una gran riqueza de especies, una estratificación vertical compleja y una marcada heterogeneidad horizontal (Sagheb-Talebi *et al*., 2014; Sohrabi, 2025). Las especies con más presencia en el área son: *Fagus orientalis, Carpinus betulus, Quercus castaneifolia* y *Alnus subcordata*, Se extienden desde el nivel del mar hasta aproximadamente 2800 metros sobre el nivel medio del mar y abarcan un amplio espectro de zonas ecológicas (Figura 1).

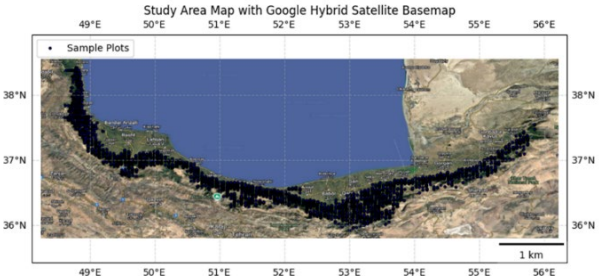


Figura 1. Área de estudio al sur del mar Caspio.

2.2. Datos de campo y estimación de la biomasa y el carbono

Los datos de referencia se obtuvieron del Inventario Forestal Nacional (NFI) de 2023, basado en una red sistemática de parcelas circulares de 1.000 m² distribuidas en una malla de 1 × 5 km, con un total de 2.543 parcelas, en las que se midió el DBH de todos los árboles y la altura de individuos representativos, estimándose el resto mediante modelos altura-diámetro y permitiendo derivar métricas estructurales adicionales como percentiles de altura. La altura y el diámetro a la altura del pecho (DBH) de los árboles se recopilaron y procesaron en Excel. Se aplicaron ecuaciones de volumen específicas para cada especie, calibradas para las condiciones del bosque hircaniano, con el fin de estimar el volumen de cada árbol. El volumen estimado del tronco se convirtió en biomasa aérea utilizando un factor de expansión de la biomasa (BEF) de 0,6. Este coeficiente compuesto refleja la densidad media de la madera y las características de expansión de la biomasa en las condiciones del estudio. A continuación, se estimó el stock de carbono utilizando un factor de conversión de carbono (CCF) de 0,5, un valor por defecto ampliamente aceptado y recomendado en las Directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006). La producción anual de madera se calculó como el 1 % del volumen en pie, de acuerdo con las normas de gestión forestal. La producción de oxígeno se estimó utilizando la relación estequiométrica entre la fijación de carbono y la liberación de oxígeno durante la fotosíntesis. Concretamente, cada gramo de carbono fijado en la biomasa vegetal corresponde a 2,67 gramos de oxígeno liberado, derivado de la relación de masa atómica del oxígeno (32) y el carbono (12), tal y como se adopta en los marcos metodológicos del IPCC (IPCC, 2006).

2.3. Datos de teledetección

Este estudio empleó un enfoque multisensor que integraba conjuntos de datos ópticos, de radar y LiDAR espaciales. Las características estructurales y espectrales se obtuvieron a partir de imágenes de Sentinel-1 y Sentinel-2, correspondientes principalmente al año 2023 y organizadas en composiciones estacionales (primavera, verano, otoño e invierno).

Tabla 1. Datos de teledetección y características extraídas

	Fuente	Variables Extraidas
1	Sentinel-1	VV + VH + Texturas (derivadas de la matriz de co-ocurrencia de niveles de gris, incluyendo varias métricas de Haralick)
2	Sentinel-2	Bandas + índices vegetación (con cálculo de múltiples índices espectrales, en un orden de magnitud de varios índices)
4	GEDI	el_highestreturn + el_lowestmode + RH
5	SRTM	Elevación + pendiente + orientacion
6	LULC	

Las métricas tridimensionales de la estructura del dosel, incluidos los parámetros de altura del dosel, se obtuvieron de la misión GEDI LiDAR para reforzar el vínculo entre las observaciones sobre el terreno y los datos satelitales. Los conjuntos de datos auxiliares incluyeron la misión Landsat 8, el modelo digital de elevación (DEM) SRTM y los mapas de uso y cobertura del suelo (LULC) para mejorar el rendimiento y la interpretabilidad de la modelización espacial.

2.4. Modelado de aprendizaje automático

Se implementaron y compararon cinco algoritmos de regresión de aprendizaje automático, entre ellos Random Forest, Support Vector Regression, k-Nearest Neighbors, Linear Regression y XGBoost. Estos algoritmos se seleccionaron por su gran capacidad para modelar relaciones no lineales, su solidez frente a datos ruidosos y su gran capacidad de generalización en el análisis de conjuntos de datos de teledetección. Para garantizar un equilibrio entre la precisión del modelo y la eficiencia computacional, el conjunto de datos se dividió en un 70 % para el entrenamiento y un 30 % para la validación. El objetivo del modelado fue la predicción del volumen de madera, a partir del cual se estimaron posteriormente la biomasa aérea y el carbono forestal mediante factores de expansión y conversión. Para evaluar el rendimiento del modelo, se utilizaron indicadores estadísticos estándar, incluyendo el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE). El preprocesamiento espacial se llevó a cabo en QGIS. El procesamiento de teledetección y la extracción de variables se realizaron en Google Earth Engine (GEE). El modelado de aprendizaje automático y los análisis estadísticos se implementaron en Python.

2.5. Valoración económica

El secuestro de carbono se valoró utilizando los informes de 2025 del Banco Mundial (Estado y tendencias de los precios del carbono en 2025) y del I4CE (Cuentas globales de carbono en 2025). El precio medio mundial del carbono para 2025 era de aproximadamente 19 dólares estadounidenses por tonelada. La valoración de la madera se obtuvo a partir de referencias del mercado internacional, incluidos los conjuntos de datos de Globalwood, la OIMT, el Banco Mundial y Eurostat. Se adoptó un precio de referencia de 277 dólares estadounidenses por metro cúbico. Se generaron mapas de valoración económica espacialmente explícitos integrando los mapas de producción de madera con los precios de referencia del mercado a escala de píxeles y de unidades de gestión.

3. RESULTADOS

Según las estimaciones finales de los bienes y servicios ecosistémicos de todos los bosques hircanos que se presentan en la Tabla 2, el volumen total de los bosques es de aproximadamente 524 millones m^3, una cantidad que refleja las características estructurales, la alta estabilidad ecológica y la diversidad de especies de estos bosques. Este elevado volumen ha dado lugar directamente a una cantidad sustancial de biomasa aérea (aproximadamente 2 933 969,63 toneladas), una cifra que indica que los bosques hircanos representan uno de los depósitos de biomasa más importantes de Oriente Medio y la región del Cáucaso. Una alta biomasa conduce naturalmente a una enorme capacidad de almacenamiento de carbono. La estimación realizada muestra que el carbono total almacenado en la cubierta arbórea de Hyrcanian es de aproximadamente 1,46 millones de toneladas. Esta cantidad de carbono almacenado desempeña un papel fundamental en la regulación del ciclo del carbono, la mitigación del cambio climático y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La cantidad total de oxígeno producido se ha estimado en aproximadamente 3 916 849,46 toneladas, un valor que demuestra la importancia vital de estos bosques para la sostenibilidad biológica y su papel fundamental en el mantenimiento de la salud ecológica de la región. El valor monetario del carbono almacenado se ha calculado en aproximadamente 2780 millones de unidades monetarias, y el valor económico de la producción maderera se ha estimado en aproximadamente 1350 millones. El modelo seleccionado para la estimación del volumen (base de los cálculos posteriores) presentó un rendimiento adecuado, con valores de R^2=0,54, RMSE=8,09 y MAE=5,91 en el conjunto de validación. Los valores totales cuantificados y la valoración económica de los servicios ecosistémicos de los bosques hircanianos de dicho modelo se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores totales cuantificados y valor económico de los servicios ecosistémicos de los bosques hircanianos

	Total
Volumen total en pie (m3)	524 000 000
Biomasa total en la tierra (t)	314 400 000
Carbono vivo leñoso total en tierra (t)	157 200 000
Oxígeno total producido (t)	419 424 000
Precio total del carbono (dólares)	2 986 800 000
Precio total de la producción de madera (dólares)	145 148 000 000

Los mapas de distribución espacial de los servicios estimados de secuestro de carbono y producción de madera se muestran en las figuras 2 y 3. Estos dos servicios muestran una relación sinérgica positiva, de modo que cuando uno aumenta, el otro también lo hace. El patrón espacial de ambos servicios indica que los valores más altos se observan en la parte occidental de la región, mostrando una tendencia gradual a la baja hacia las zonas orientales.

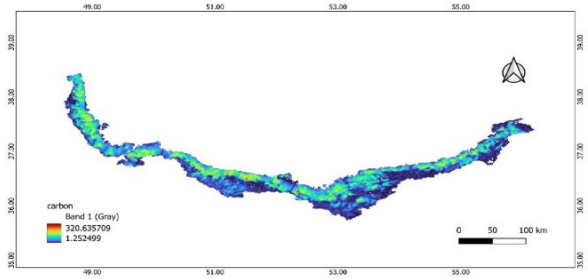


Figura 2. Patrón de distribución espacial del secuestro de carbono en los bosques de Hircania.

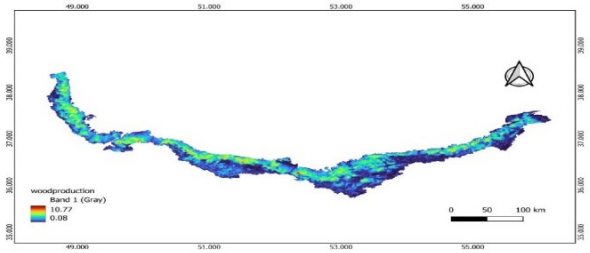


Figura 3. Patrón de distribución espacial de la producción maderera en los bosques de Hircania.

4. DISCUSIÓN

Los servicios ecosistémicos estimados se han considerado indicadores clave para evaluar y gestionar los recursos forestales. La falta de modelos fiables y completos y las limitaciones estadísticas de los modelos existentes han creado una importante laguna en el conocimiento sobre las reservas forestales y requieren el desarrollo de modelos capaces de estimar con precisión estas cantidades para diferentes tipos de bosques (Tian *et al*., 2023).

En comparación con estudios anteriores sobre los bosques de Hircania, el presente estudio aporta un valor añadido único debido a su mayor extensión espacial y al mayor tamaño de la muestra. Los resultados muestran que el modelo basado en datos multitemporales de Sentinel-2 y entrenado con datos GEDI presenta un mejor ajuste en R^2 y menores errores RMSE en comparación con otros enfoques evaluados, especialmente en la estimación de alturas y variables estructurales del dosel, sin que en este trabajo se realice una comparación sistemática entre modelos mono- y multisensoriales. Estos hallazgos concuerdan con los de Ronoud *et al*. (2024).

La combinación de datos LiDAR de GEDI, Sentinel-2, Landsat y algoritmos de aprendizaje automático como Random Forest proporciona una gran capacidad para estimar los servicios ecosistémicos. Los estudios de Gupta y Sharma (2022) demostraron que el uso de datos LiDAR GEDI espaciales junto con imágenes multiespectrales y datos de radar, y la aplicación de modelos de aprendizaje automático, es un método eficaz para la cartografía forestal en grandes áreas.

5. CONCLUSIONES

Los resultados cuantitativos ofrecen una visión integrada del almacenamiento de biomasa, la captura de carbono y el valor económico de los servicios ecosistémicos de los bosques hircanos. La valoración económica resalta su importancia estratégica en el contexto de la economía ambiental y el mercado global del carbono, incluyendo oportunidades para políticas como REDD+. Sin embargo, la dependencia de la explotación maderera no es sostenible a largo plazo, ya que puede comprometer el almacenamiento de carbono y la integridad ecológica del bosque. Gran parte de su valor real reside en servicios intangibles como la regulación climática, la biodiversidad y la producción de oxígeno.

En conjunto, los bosques hircanos constituyen no solo un patrimonio natural mundial, sino también un activo clave para la seguridad ecológica y la economía verde del país.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Organización de Recursos Naturales y Gestión de Cuencas de Irán por facilitar parcialmente el acceso a los datos de campo utilizados en este estudio.

7. REFERENCIAS

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and human well-being: Current state and trends. Island Press.

IPCC. (2006). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 4: Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). Intergovernmental Panel on Climate Change.

Espejo, A., Federici, S., Green, C., Amuchastegui, N., d'Annunzio, R., Balzter, H., Bholanath, P., Brack, C., Brewer, C., & Birigazzi, L. (2020). Integration of remote-sensing and ground-based observations for estimation of emissions and removals of greenhouse gases in forests: Methods and guidance from the Global Forest Observations Initiative (3rd ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Sagheb-Talebi, K., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). Forests of Iran. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7371-4

Sohrabi, H. (2025). Does UNESCO designation enhance forest protection? Evidence from the Hyrcanian national forest inventory. *Trees, Forests and People, 21*, 100956. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100956

Ronoud, G., Darvishsefat, A. A., Poorazimy, M., Tomppo, E., Antropov, O., & Praks, J. (2024). Enhancing Hyrcanian forest height and aboveground biomass predictions: A synergistic use of TanDEM-X InSAR coherence, Sentinel-1, and Sentinel-2 data. IEEE *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 17*, 8409–8423. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3383777

Gupta, R., & Sharma, L. K. (2022). Mixed tropical forests canopy height mapping from spaceborne LiDAR GEDI and multisensor imagery using machine learning models. *Remote Sensing Applications: Society and Environment, 27*, 100817. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100817

Tian, L., Wu, X., Tao, Y., Li, M., Qian, C., Liao, L., & Fu, W. (2023). Review of remote sensing-based methods for forest aboveground biomass estimation: Progress, challenges, and prospects. *Forests, 14*(6), 1–31. https://doi.org/10.3390/f14061086

SESIÓN 05

Oceanografía y Zonas Costeras

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.112

Productos de clorofila-a derivados del algoritmo C2X en las aguas ópticamente complejas del Golfo Árabro (NO España)

Casal Pascual, Gema [1]

[1] IEO-CSIC, España

ORCID: Casal Pascual 0000-0002-3346-8035

Correspondencia: gema.casal@ieo.csic.es

RESUMEN

Obtener estimaciones precisas de la calidad del agua a partir de observaciones satelitales sigue siendo especialmente difícil en las zonas costeras, donde tanto las partículas orgánicas como las inorgánicas influyen de forma significativa en las propiedades ópticas del agua. En las últimas décadas se han propuesto diferentes métodos de corrección atmosférica con productos derivados intentando abordar este desafío. No obstante, su eficacia puede variar en función de las condiciones ambientales específicas y de la localización geográfica, por lo que siguen siendo necesarios esfuerzos de validación en distintos tipos de agua para aprovechar plenamente estas herramientas. El objetivo de este estudio fue evaluar la precisión de los productos de clorofila-a derivados del procesador C2X-Nets utilizando imágenes Sentinel-2 (10 m) en el Golfo Árabro (NO de España). La validación se llevó a cabo empleando datos de la serie temporal RADIALES, un programa de seguimiento iniciado en 1988 por el Centro Oceanográfico de A Coruña (IEO-CSIC). Se analizaron un total de 269 matchups en tres estaciones de muestreo distribuidas perpendicularmente a la costa, considerando mediciones entre 0 y 5 m de profundidad. En conjunto, el algoritmo C2X-Nets no proporcionó estimaciones fiables de clorofila-a para el conjunto completo de datos (R^2 = 0,10; MAE = 0,9; RMSE = 1,3; bias = −0,3). Este bajo rendimiento podría atribuirse en parte a la combinación de factores ambientales locales (por ejemplo, el oleaje frecuente) y a la resolución espacial de 10 m utilizada. Trabajos futuros explorarán el impacto de resoluciones espaciales más bajas (20 m y 60 m) en la precisión de las estimaciones de clorofila-a derivadas de C2X, así como la evaluación de algoritmos alternativos para mejorar la obtención regional de clorofila-a.

Palabras clave: *clorofila-a, aguas costeras, monitorización, calidad del agua, RADIALES*

Fecha de recepción: 3 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 3 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Productos de clorofila-a derivados del algoritmo C2X en las aguas ópticamente complejas del Golfo Ártabro (NO España)

Casal Pascual, Gema [(1)]

[(1)] IEO-CSIC, España, 0000-0002-3346-8035, gema.casal@ieo.csic.es.

Resumen: Obtener estimaciones precisas de la calidad del agua a partir de observaciones satelitales sigue siendo especialmente difícil en las zonas costeras, donde tanto las partículas orgánicas como las inorgánicas influyen de forma significativa en las propiedades ópticas del agua. En las últimas décadas se han propuesto diferentes métodos de corrección atmosférica con productos derivados intentando abordar este desafío. No obstante, su eficacia puede variar en función de las condiciones ambientales específicas y de la localización geográfica, por lo que siguen siendo necesarios esfuerzos de validación en distintos tipos de agua para aprovechar plenamente estas herramientas. El objetivo de este estudio fue evaluar la precisión de los productos de clorofila-a derivados del procesador C2X-Nets utilizando las bandas espectrales de de 10 m de los satélites Sentinel-2 en el Golfo Ártabro (NO de España). La validación se llevó a cabo empleando datos de la serie temporal RADIALES, un programa de seguimiento iniciado en 1988 por el Centro Oceanográfico de A Coruña (IEO-CSIC). Se analizaron un total de 269 *matchups* en tres estaciones de muestreo distribuidas perpendicularmente a la costa, considerando mediciones entre 0 y 5 m de profundidad. En conjunto, el algoritmo C2X-Nets no proporcionó estimaciones fiables de clorofila-a para el conjunto completo de datos (R^2 = 0,1; MAE = 0,9; RMSE = 1,3; bias = -0,3). Este bajo rendimiento podría atribuirse en parte a la combinación de factores ambientales locales (por ejemplo, el oleaje frecuente) y a la resolución espacial de 10 m utilizada. Trabajos futuros explorarán el impacto de resoluciones espaciales más bajas (20 m y 60 m) en la precisión de las estimaciones de clorofila-a derivadas de C2X, así como la evaluación de algoritmos alternativos para mejorar la obtención regional de clorofila-a.

Palabras clave: clorofila-a, aguas costeras, monitorización, calidad del agua, RADIALES

Chlorophyll-a products derived from the C2X algorithm in the optically complex waters of the Golfo Ártabro (NW Spain)

***Abstract**: Obtaining accurate estimates of water quality from satellite observations remains particularly challenging in coastal areas, where both organic and inorganic particles significantly influence the optical properties of the water. Over recent decades, different atmospheric correction methods with derived products have been proposed in an attempt to address this challenge. However, their effectiveness may vary depending on specific environmental conditions and geographic location, and validation efforts across different water types are still necessary to fully exploit these tools. The objective of this study was to assess the accuracy of chlorophyll-a products derived from the C2X-Nets processor using the 10 m spectral bands of Sentinel-2 satellites in the Golfo Ártabro (NW Spain). Validation was carried out using data from the RADIALES time series, a monitoring program initiated in 1988 by the Oceanographic Centre of A Coruña (IEO-CSIC). A total of 269 matchups were analysed at three sampling stations distributed perpendicular to the coast, considering measurements between 0 and 5 m depth. Overall, the C2X-Nets algorithm did not provide reliable chlorophyll-a estimates for the complete dataset (R^2 = 0.10; MAE = 0.9; RMSE = 1.3; bias = −0.3). This poor performance may be partly attributed to the combination of local environmental factors (e.g., frequent swell) and the 10 m spatial resolution used. Future work will explore the impact of coarser spatial resolutions (20 m and 60 m) on the accuracy of C2X-derived chlorophyll-a estimates, as well as the evaluation of alternative algorithms to improve regional chlorophyll-a retrievals.*

***Keywords**: chlorophyll-a, coastal Waters, monitoring, water quality, RADIALES*

1. INTRODUCCIÓN

La clorofila-a es uno de los indicadores más relevantes del estado biogeoquímico del océano, ya que está directamente relacionada con la biomasa fitoplanctónica y la productividad primaria. La aplicación de la Directiva Marco del Agua y de la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina de la Unión Europea han supuesto una intensificación de las actividades de monitorización y control de la calidad de las aguas, tanto en los entornos costeros como dentro de los límites de la zona económica exclusiva europea. Debido a su espectro de absorción bien definido la clorofila-a puede ser detectada por sensores satelitales (Muñoz-Miranda y Iñiguez-Moreno, 2023). Uno de los programas de Observación de la Tierra más reciente y ambicioso, el Programa Copérnico, incluye la misión Sentinel-2 de gran relevancia en entornos costeros. Actualmente esta cuenta con tres satélites en órbita: Sentinel-2A (lanzado en 2015), Sentinel-2B (lanzado en 2017) y Sentinel-2C (lanzado en 2024).

La misión Sentinel-2 incorpora un sensor multiespectral de alta resolución con 13 bandas espectrales y un amplio campo de visión de 290 km. Los satélites Sentinel-2 recogen de forma sistemática imágenes multiespectrales globales hasta 20 km de la costa. Presentan un ciclo de revisita de 5 días en el ecuador y de 2–3 días en latitudes más altas, y ofrecen resoluciones espaciales de 10 m, 20 m y 60 m (Szantoi y Strobl, 2019).

El objetivo de este estudio es evaluar la precisión de los productos de clorofila-a derivados mediante el procesador Case 2 Regional CoastColour (C2X-Nets) (Brockmann *et a*l., 2016), implementado en la plataforma Sentinel Application Platform (SNAP), utilizando las bandas espectrales de 10 m de los satélites Sentinel-2.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio de este trabajo corresponde al Golfo Ártabro, ubicado en el sector noroccidental de la costa de Galicia (Figura 1). Este sistema costero comprende las rías de A Coruña, Ares-Betanzos y Ferrol, y está caracterizado por una dinámica oceanográfica compleja, condicionada por la interacción entre las corrientes atlánticas, los aportes fluviales y los procesos de afloramiento costero.

2.2. Programa RADIALES

El proyecto RADIALES del Instituto Español de Oceanografía (IEO) es un programa de muestreo oceanográfico mensual en el norte de España que fue aprobado en 1993 pero sus series temporales se remontan a 1988. Actualmente, RADIALES incluye cinco transectos costeros a lo largo del norte de España: Vigo, A Coruña, Cudillero, Gijón y Santander. Cada estación es visitada al menos de forma mensual. El muestreo comprende un amplio conjunto de mediciones físicas, químicas y biológicas, incluida la concentración de clorofila-a. En este estudio se utilizaron únicamente los datos correspondientes al RADIAL de A Coruña (Figura 1).

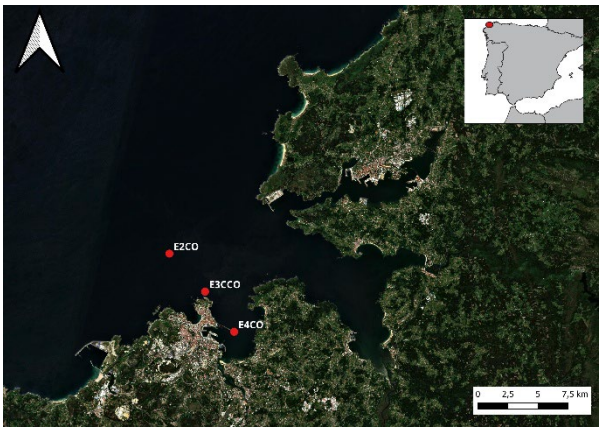


Figura 1. Área de estudio y estaciones RADIALES utilizadas (E2CO, E3CCO, E4CO).

Durante las campañas RADIALES, las muestras de agua se recolectaron mediante botellas Niskin acopladas a una roseta oceanográfica equipada con sensores CTD. Las muestras para la determinación de clorofila-a se obtuvieron en la capa superficial (0–5 m) y en profundidades adicionales seleccionadas en función de la estratificación de la columna de agua. La filtración se realizó *in situ* o inmediatamente tras la recogida, utilizando filtros de fibra de vidrio (Whatman GF/F, 25 mm), con volúmenes filtrados comprendidos entre 100 ml y 250 ml (com. pers.).

La concentración de clorofila-a se determinó mediante extracción en acetona al 90 % durante 24 h a -20 °C y en ausencia de luz, seguida de la medición fluorométrica con un equipo previamente calibrado (Bode *et al*., 2011). El procedimiento analítico se ajustó a los protocolos del Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) y del SCOR Working Group 78, garantizando la calidad y comparabilidad de los datos para su posterior validación con productos satelitales en ambientes costeros.

2.3. Análisis de las imágenes Sentinel-2

Para la estimación de la concentración de clorofila-a a partir de observaciones remotas se emplearon imágenes multiespectrales adquiridas por los satélites de la misión Sentinel-2 del programa Copérnico. Los productos utilizados corresponden a reflectancia sobre la atmósfera (Level-1C) y fueron descargados desde la plataforma Copernicus Data Space Ecosystem. Se seleccionaron escenas comprendidas entre los años 2015 y 2024, priorizando aquellas fechas próximas a las campañas del programa RADIALES para las que se disponía de datos *in situ*.

La selección de imágenes incluyó una inspección visual exhaustiva con el fin de excluir escenas afectadas por nubosidad, bruma o niebla sobre el área de estudio, ya que estas condiciones pueden introducir errores significativos en la estimación espectral de los constituyentes ópticamente activos del agua. Únicamente se conservaron aquellas imágenes que presentaban condiciones atmosféricas favorables sobre el Golfo Ártabro.

El preprocesado de las imágenes se realizó mediante el software SNAP (Sentinel Application Platform),

desarrollado por la Agencia Espacial Europea. El flujo de trabajo incluyó el remuestreo de todas las bandas espectrales a una resolución espacial común de 10 m, así como el recorte de las escenas al área de estudio con el objetivo de optimizar el procesamiento y focalizar el análisis.

La corrección atmosférica se llevó a cabo mediante el procesador Case 2 Regional Coast Colour, en su versión extendida C2X, integrado en SNAP (Brockmann *et al.*, 2016). Este procesador fue seleccionado por su idoneidad en aguas costeras ópticamente complejas, caracterizadas por la presencia simultánea de materia orgánica disuelta y partículas en suspensión, una condición habitual en el Golfo Ártabro. Para la ejecución del modelo se emplearon valores estándar de presión atmosférica y se ajustó la temperatura del agua en función del mes de adquisición de cada imagen, utilizando climatologías mensuales regionales. El producto resultante consistió en mapas raster de concentración de clorofila-a expresados en mg/m³.

Con el fin de reducir el ruido espacial y atenuar posibles artefactos asociados a errores instrumentales o atmosféricos, se aplicó un filtrado espacial de tipo low-pass mediante una ventana de 3×3 píxeles. Este procedimiento suaviza las variaciones locales sin alterar los patrones espaciales dominantes de la distribución de clorofila-a (Figura 2).

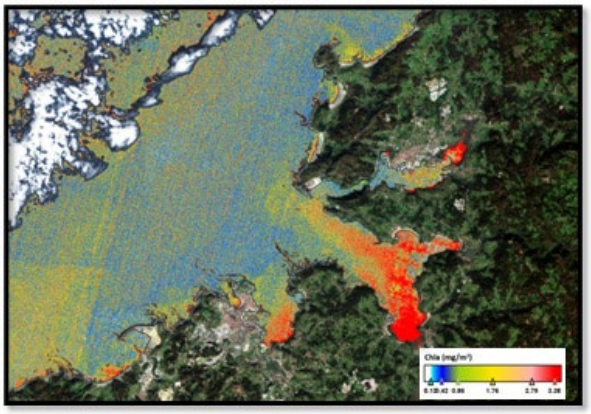


Figura 2. Concentración de clorofila-a derivada del procesador C2X-Nets una vez aplicado el filtro low-pass (3x3).

La validación de las estimaciones satelitales de clorofila-a se realizó mediante su comparación con datos *in situ* procedentes del programa RADIALES del IEO-CSIC. Para ello, se extrajeron los valores de clorofila-a derivados de las imágenes Sentinel-2 en las coordenadas geográficas correspondientes a las estaciones seleccionadas. Se estableció una ventana temporal de ±3 días entre la fecha de adquisición de la imagen y el muestreo *in situ*, con el objetivo de maximizar el número de coincidencias válidas y minimizar los desfases temporales, asumiendo una variabilidad ambiental limitada dentro de dicho intervalo.

Los valores emparejados de clorofila-a satelital e in situ se emplearon para evaluar el rendimiento del método mediante el cálculo de métricas estadísticas estándar, incluyendo el error cuadrático medio (RMSE), el error medio absoluto (MAE) y el sesgo (Bias), permitiendo así cuantificar tanto la precisión como posibles tendencias sistemáticas de sobreestimación o infraestimación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación entre las concentraciones de clorofila-a estimadas a partir de imágenes Sentinel-2 y las medidas *in situ* evidenció una concordancia limitada tanto en el conjunto de datos como en las tres estaciones analizadas (E2CO, E3CCO y E4CO), como indican los bajos valores de R^2 y los errores relativamente elevados (MAE, RMSE y Bias). En conjunto, los resultados sugieren que el procesador empleado reproduce de forma insuficiente la variabilidad observada en las concentraciones medidas *in situ* (Figura 3a).

En la estación E2CO, que presentó el mayor número de coincidencias (n = 142), se observó una relación positiva débil entre ambos conjuntos de datos (R^2 = 0,153), acompañada de una elevada dispersión, especialmente para concentraciones *in situ* superiores a 2 mg/m³. El sesgo medio fue reducido (Bias = -0,051 mg/m³), indicando una tendencia general a la subestimación de la clorofila-a satelital respecto a los valores medidos.

En la estación E3CCO, el número de coincidencias fue considerablemente menor (n = 23), lo que limita la robustez estadística del ajuste. No obstante, los resultados fueron consistentes con los observados en E2CO, mostrando una relación igualmente débil (R^2 = 0,139) y una subestimación más acusada de la clorofila-a por parte del producto satelital (Bias = -0,323 mg/m³). Los valores de error (MAE y RMSE) fueron comparables a los de E2CO, lo que sugiere un comportamiento similar entre ambas estaciones, pese a las diferencias en tamaño muestral.

La estación E4CO presentó el peor ajuste entre ambos conjuntos de datos, con un coeficiente de determinación prácticamente nulo (R^2 = 0,006) y el mayor sesgo negativo (Bias = -0,535 mg/m³), lo que evidencia una subestimación sistemática más pronunciada. Estos datos indican una escasa sensibilidad del algoritmo aplicado a la variabilidad real de la clorofila-a observada *in situ* en esta localización.

La restricción del análisis a coincidencias temporales exactas entre el muestreo *in situ* y el paso del satélite (Figura 3b), así como a observaciones obtenidas a profundidades ≤ 1 m (Figura 3c), no produjo mejoras sustanciales en el ajuste, lo que indica que las discrepancias observadas no pueden atribuirse exclusivamente ni al desfase temporal entre ambas fuentes de datos ni a diferencias asociadas a la profundidad de muestreo.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto las dificultades asociadas a la estimación satelital de clorofila-a en ambientes costeros ópticamente complejos como el Golfo Ártabro. La dispersión observada y la tendencia general a la subestimación pueden estar relacionadas con la influencia simultánea de materia orgánica disuelta coloreada, partículas en suspensión y aportes continentales, que alteran la señal

espectral del agua y reducen la eficacia de los algoritmos bio-ópticos de carácter general. Estas limitaciones parecen ser especialmente relevantes en la estación E4CO, cuyas características locales, incluida su proximidad al dique de abrigo y a la dársena, podrían favorecer una mayor variabilidad espacial y condiciones bio-ópticas diferenciadas.

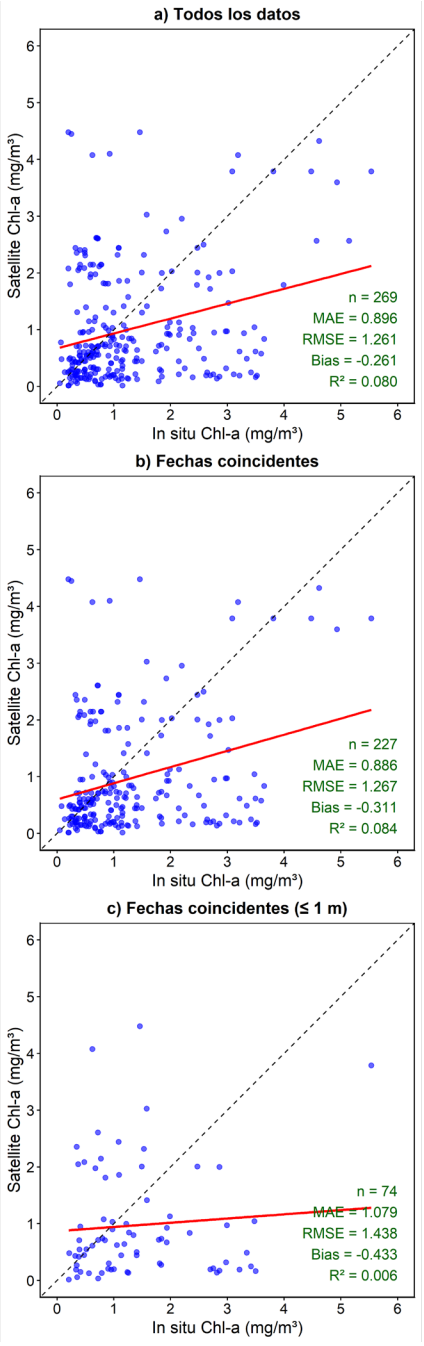


Figura 3. Gráficos de dispersión entre los productos derivados de satélite y los datos *in situ* del programa RADIALES.

Asimismo, el bajo rendimiento del procesador C2X-Nets podría estar influido, al menos en parte, por factores ambientales locales y por la resolución espacial de 10 m empleada en este análisis. En este contexto, trabajos futuros evaluarán el efecto de resoluciones espaciales más bajas (20 m y 60 m) sobre la precisión de las estimaciones de clorofila-a derivadas de C2X-Nets, así como la aplicación de algoritmos alternativos con mayor potencial de ajuste a escala regional.

4. CONCLUSIONES

Aunque el procesador C2X-Nets permite identificar parcialmente algunos patrones generales, la dispersión de los datos y la tendencia a la subestimación ponen de manifiesto la necesidad de mejorar su ajuste para la extracción de concentraciones de clorofila-a en ambientes ópticamente complejos como los presentes en el Golfo Ártabro.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de un contrato del Programa Ramón y Cajal (RYC2023-044898-I) financiado por el MCIU/AEI/10.13039/501100011033 y el FSE+, así como por dos programas de formación de grado de la Universidade da Coruña y la Universidade de Vigo. El programa RADIALES está financiado por ESMARES3 (Estrategias Marinas) y FEMPA.

6. REFERENCIAS

Brockmann, C., R. Doerffer, M. Peters, K. Stelzer, S. Embacher, Ruescas, A. (2016). Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters. In *Proceedings of the Living Planet Symposium 2016*, Prague, Czech Republic, 9-13 May 2016.

Bode, A, Anadón, R., Morán, X.A.G., Nogueira, E., Teira, E., Varela, M. (2011). *Climate Research, 48* (2-3, 293-305. http://dx.doi.org/10.3354/cr00935

Muñoz-Miranda, L.A., Iñiguez-Moreno, M. (2023). An extensive review of marine pigments: sources, biotechnological applications, and sustainability. *Aquatic Sciences, 85*, 68. https://doi.org/10.1007/s00027-023-00966-8

Szantoi, Z., Strobl, P. (2019). Copernicus Sentinel-2 Calibration and Validation. *European Journal of Remote Sensing 52* (1), 253-255. https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1582840

Valdés, L., Bode, A., Latasa, M., Enrique, N., Somavilla, R., Varela, M.M., González-Pola, C., Casas, G. (2021). Three decades of continuous ocean observations in North Atlantic Spanish Waters: The RADIALES time series Project, context, achievements and challenges. *Progress in Oceanography, 198*, 102671. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102671

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.124

Inteligencia Artificial Aplicada a los Drones: Escalado vs Super-Resolución en el Estudio de Sistemas Costeros

Román, Alejandro [1] **Tovar-Sánchez, Antonio** [1] **Xanxo, Roc** [1] **Vázquez, Águeda** [2] **Navarro, Gabriel** [1]

[1] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Departamento de Ecología y Gestión Costera

[2] Universidad de Cádiz (UCA), Departamento de Física Aplicada

ORCID: Román 0000-0002-8868-9302 Tovar-Sánchez 0000-0003-4375-1982 Xanxo 0009-0004-2154-1233 Vázquez 0000-0002-5636-2604 Navarro 0000-0002-8919-0060

Correspondencia: a.roman@csic.es a.tovar@csic.es roc.xanxo.prillo@csic.es agueda.vazquez@uca.es gabriel.navarro@csic.es

RESUMEN

En la última década, la teledetección con drones (UAVs, Unmanned Aerial Vehicles) ha ganado relevancia por su papel en la observación integrada de los sistemas costeros, al complementar algunas limitaciones de la óptica satelital. La reciente irrupción de la Inteligencia Artificial (IA) ha ampliado notablemente las oportunidades para analizar la dinámica y evolución de estos sistemas, destacando los enfoques que integran datos de alta resolución espacial con métodos de aprendizaje automático. En este trabajo presentamos un estudio metodológico que compara dos técnicas emergentes de IA – el escalado (upscaling) y la super-resolución (SR) – empleando datos multiespectrales de un sensor de 10 canales (MicaSense RedEdge-MX) embarcado en un dron, con el objetivo de mejorar los registros del satélite Sentinel-2 MSI sobre una zona de marismas en la Bahía de Cádiz (España). Para el escalado, se desarrolla un flujo de trabajo basado en un modelo XGBoost en dos etapas para la clasificación supervisada de las clases de cobertura del suelo identificadas. En el caso de la SR, se emplea un modelo de aprendizaje profundo basado en redes generativas antagónicas (GAN), entrenado con un amplio conjunto de datos capturado con el dron, que mejora la resolución espacial de Sentinel-2 de 10 m/px a 1 m/px para su posterior clasificación mediante XGBoost. El estudio propone una metodología eficaz para la observación de las dinámicas fluctuantes de los sistemas costeros en un contexto de cambio climático global, así como de los retos ecológicos que estos enfrentan.

Palabras clave: *Aprendizaje Automático; Aprendizaje Profundo; Redes Neuronales; XGBoost; UAVs*

Fecha de recepción: 5 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Inteligencia Artificial Aplicada a los Drones: Escalado vs Super-Resolución en el Estudio de Sistemas Costeros

Román, Alejandro [(1)], Tovar-Sánchez, Antonio [(1)], Xanxo, Roc [(1)], Vázquez, Águeda [(2)], Navarro, Gabriel [(1)]

[(1)] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Departamento de Ecología y Gestión Costera, España.

0000-0002-8868-9302, a.roman@csic.es.

0000-0003-4375-1982, a.tovar@csic.es.

0009-0004-2154-1233, roc.xanxo.prillo@csic.es.

0000-0002-8919-0060, gabriel.navarro@csic.es.

[(2)] Universidad de Cádiz (UCA), Departamento de Física Aplicada, España.

0000-0002-5636-2604, agueda.vazquez@uca.es.

Resumen: En la última década, la teledetección con drones (UAVs, *Unmanned Aerial Vehicles*) ha ganado relevancia por su papel en la observación integrada de los sistemas costeros, al complementar algunas limitaciones de la óptica satelital. La reciente irrupción de la Inteligencia Artificial (IA) ha ampliado notablemente las oportunidades para analizar la dinámica y evolución de estos sistemas, destacando los enfoques que integran datos de alta resolución espacial con métodos de aprendizaje automático. En este trabajo presentamos un estudio metodológico que compara dos técnicas emergentes de IA – el escalado (*upscaling)* y la super-resolución (SR) – empleando datos multiespectrales de un sensor de 10 canales (MicaSense RedEdge-MX) embarcado en un dron, con el objetivo de mejorar los registros del sensor multiespectral MSI de Sentinel-2 sobre una zona de marismas en la Bahía de Cádiz (España). Para el escalado, se desarrolla un flujo de trabajo basado en un modelo XGBoost en dos etapas para la clasificación supervisada de las clases de cobertura del suelo identificadas. En el caso de la SR, se emplea un modelo de aprendizaje profundo basado en redes generativas antagónicas (GAN), entrenado con un amplio conjunto de datos capturado con el dron, que mejora la resolución espacial de Sentinel-2 de 10 m/px a 1 m/px para su posterior clasificación mediante XGBoost. El estudio propone una metodología eficaz para la observación de las dinámicas fluctuantes de los sistemas costeros en un contexto de cambio climático global, así como de los retos ecológicos que estos enfrentan.

Palabras clave: Aprendizaje Automático; Aprendizaje Profundo; Redes Neuronales; XGBoost; UAVs.

Artificial Intelligence Applied to Drones: Upscaling vs Super-Resolution in the Study of Coastal Systems

***Abstract**: Over the past decade, drone-based remote sensing (UAVs, Unmanned Aerial Vehicles) has gained relevance due to its role in the integrated observation of coastal systems, as it complements some of the limitations of satellite imagery. The recent emergence of Artificial Intelligence (AI) has significantly expanded opportunities to analyze the dynamics and evolution of these systems, particularly through approaches that integrate high spatial resolution data with machine learning methods. In this work, we present a methodological study comparing two emerging AI techniques – upscaling and super-resolution (SR) – using multispectral data acquired by a 10-channel sensor (MicaSense RedEdge-MX) mounted on a drone, with the aim of improving Sentinel-2 MSI multispectral observations over a saltmarsh area in the Bay of Cádiz (Spain). For upscaling, a two-stage XGBoost-based workflow is developed to upgrade the supervised classification of the identified land cover classes. In the case of super-resolution, a deep learning model based on generative adversarial networks (GAN), trained on an extensive drone-acquired dataset, is employed to enhance Sentinel-2 spatial resolution from 10 m/pixel to 1 m/pixel prior to supervised classification using XGBoost. The study proposes an effective methodology for observing the fluctuating dynamics of coastal systems in the context of global climate change, as well as the ecological challenges they face.*

***Keywords**: Machine Learning; Deep Learning; Neural Networks; XGBoost; UAVs.*

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas costeros se caracterizan por su valor ecológico y económico, debido a los servicios ecosistémicos que proporcionan (*p.ej.* refugio, sumideros de CO_2 o protección costera, entre otros), aunque también por ser altamente vulnerables a los cambios globales (Orth *et al*. 2020). De hecho, las alarmantes tasas de pérdida, degradación y fragmentación de estos hábitats han hecho que el estudio de su evolución y estado sea una prioridad para la ciencia y los paneles gubernamentales (Murray *et al*. 2019). La teledetección por satélite ha permitido realizar observaciones desde ámbitos locales hasta regionales de la extensión y evolución de estos sistemas a diferentes escalas espaciales y temporales (Melet *et al*. 2020). No obstante, la limitada resolución espacial de los sensores satelitales más comúnmente empleados (*p.ej.* Sentinel-2 [S2] o Landsat-8 [L8]) y, en algunos casos, la necesidad de un mayor detalle, así como la heterogeneidad y la distribución espacial de estos hábitats, dificultan su detección precisa e incrementan el sesgo en las estimaciones. Los drones han surgido como una herramienta complementaria de gran potencial, ya que permiten observar estos sistemas a resoluciones espaciales sin precedentes. Sin embargo, su uso sigue estando restringido a observaciones locales, debido a la dificultad de cubrir grandes extensiones como consecuencia de su limitada autonomía de vuelo (Román *et al*. 2026).

En vista de las limitaciones descritas, una solución emergente ampliamente propuesta para mejorar las observaciones remotas de los sistemas costeros consiste en la adopción de enfoques multifacéticos que combinan bases de datos de alta resolución espacial (incluidos datos de drones) con técnicas de IA, siendo especialmente populares los modelos de aprendizaje automático y profundo (*p.ej.* redes neuronales). Este estudio, realizado en una marisma y planicie intermareal situada en la Bahía de Cádiz (España), explora las ventajas y limitaciones de dos aproximaciones emergentes de IA con el fin de mejorar las observaciones satelitales de Sentinel-2: el escalado y la super-resolución (SR).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolla en las proximidades del caño mareal de La Carraca, dentro del Parque Natural Bahía de Cádiz (España), uno de los humedales costeros más importantes de Europa por la gran diversidad de ecosistemas que alberga. El área de interés, monitorizada mediante drones, corresponde a una marisma y planicie intermareal de unas 156 hectáreas, que incluye marismas transformadas para la extracción de sal (salina activa y abandonada), áreas en avanzado proceso de renaturalización tras la actividad salinera, y zonas naturales inalteradas (Fig.1a). La vegetación está dominada por *Sarcocornia* spp. y *Sporobolus maritimus* (Curcio *et al*. 2023). En la zona intermareal se observa una presencia minoritaria de fanerógamas marinas como *Zostera noltei* y *Cymodocea nodosa*, así como parches de microfitobentos (Haro *et al*. 2022).

2.2. Recolección de los datos

2.2.1. Datos de la aeronave y sensor multiespectral

Se empleó un multirrotor DJI Matrice 300 operando en condiciones de RTK, y equipado con el sensor multiespectral de 10 canales MicaSense RedEdge-MX – azul 444±28 nm y 475±32 nm, verde 531±14 nm y 560±27 nm, rojo 650±16 nm y 668±14 nm, e infrarrojo cercano (NIR) 705±10 nm, 717±12 nm, 740±18 nm y 842±57 nm. Este sensor cuenta con un panel de calibración y DLS (*Downwelling Light Sensor*) para el proceso de calibración radiométrica. Se ejecutaron vuelos mensuales en el área de estudio a 120 m de altura (80-75% solapamientos frontal y lateral), alcanzando un GSD medio de 8.2 cm/px. Los mapas de reflectancia (adimensional, 0-1) fueron generados con el software Pix4D Mapper (Lausanne, Suiza, v.4.8.3).

2.2.2. Datos del satélite Sentinel-2 (S2)

Los datos de S2 MSI BOA (*Bottom of Atmosphere*) armonizados y remuestreados a 10 m/px se descargaron a través de *Google Earth Engine*. Las bandas descargadas fueron de la misma longitud de onda (± 10 nm) que las del sensor de MicaSense, síncronas con las operaciones con drones (a fecha 14/07/2025), y adquiridos en condiciones de bajamar.

2.3. Modelo de escalado dron-satélite

Para la generación de predicciones escaladas de cada clase de cobertura del suelo, se empleó un flujo de trabajo basado en la aplicación del algoritmo XGBoost. Se utilizaron bandas espectrales e índices normalizados (NDVI y GNDVI) como entrada, y porcentajes de cobertura fraccionaria como salida, agregando clasificaciones de dron dentro de píxeles de S2. XGBoost minimiza la función objetivo regularizada (Ec. 1):

$$L(\emptyset) = \sum_{i=1}^{n} l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^{K} \Omega(f_k) \qquad (1)$$

donde $l(y_i, \hat{y}_i)$ es la función de pérdida entre valores observados y predichos, y $\Omega(f_k)$ es el término de regularización de cada árbol del modelo. El modelo multisalida predice tres clases de cobertura simultáneamente y las predicciones se normalizan para que sumen el 100% en cada píxel. Los hiperparámetros se optimizaron mediante búsqueda aleatoria con validación cruzada de cinco pliegues, considerando rangos definidos para: número de árboles (100-1000), profundidad máxima (3-10), gamma (0-5), y términos de regularización L1 (alpha, 0-1) y L2 (lambda, 0-1), que controlan la penalización sobre la complejidad del modelo. La configuración final seleccionada correspondió al conjunto de parámetros que minimizó el error de validación. Se aplicó *early stopping* tras 150 rondas sin mejora, y se entrenó un *ensamble* de 20 particiones 70/30 para cuantificar la incertidumbre. La precisión de clasificación se evaluó mediante la precisión global (OA) y el índice Kappa de Cohen.

2.4. Modelo de super-resolución (SR)

Para mejorar la resolución espacial de imágenes de S2 a 1 m/px, se implementó un flujo de trabajo basado en redes neuronales generativas (GAN) empleando la arquitectura ESRGAN (*Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Network*). Para ello, se utilizaron imágenes de S2 a 10 m/px como variables de entrada del modelo, generándose versiones de alta resolución mediante un generador profundo que minimiza una función de pérdida combinada (Ec. 2):

$$L_{total} = L_{perceptual} + \lambda_{adv} L_{adv} + \lambda_{pixel} L_{pixel} \qquad (2)$$

donde $L_{perceptual}$ mide la similitud perceptual en el espacio de características, L_{adv} corresponde a la pérdida adversarial del discriminador, L_{pixel} es la pérdida a nivel de píxel, y λ_{adv}y λ_{pixel} son coeficientes que ponderan su contribución en la función total. El modelo emplea bloques residuales densos (RRDB) sin normalización por lotes para preservar detalles finos y texturas realistas. Se optimizaron hiperparámetros como tasa de aprendizaje, pesos de pérdida (λ_{adv}, λ_{pixel}) y arquitectura del discriminador mediante búsqueda sistemática. Se aplicó un entrenamiento progresivo en dos fases: preentrenamiento con pérdida de píxeles L1 y refinamiento adversarial con pérdida perceptual basada en características VGG (*Visual Geometry Group*, una red neuronal convolucional preentrenada utilizada para extraer características de alto nivel). La precisión de clasificación se evaluó mediante la OA y el índice Kappa de Cohen.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La precisión del modelo XGBoost sobre vuelo de dron (Fig.1b) reveló estadísticos robustos (OA=86% y kappa=0.78), separando entre una cobertura del 20.97% para agua (32.71 ha), 34.20% (53.35 ha) para vegetación, y 44.52% (69.45 ha) para sedimento fangoso cubierto por microfitobentos.

Tras la aplicación del modelo de escalado (Fig. 2a), se obtuvieron extensiones de cada una de las clases de cobertura terrestre (16.93% y 26.41 ha agua; 34.46% y 53.76 ha vegetación; 48.61% y 75.83 ha sedimento), a una resolución espacial de 10 m/px. Lógicamente, el análisis estadístico arroja unos valores más alejados de lo que se obtiene con tecnología de drones (OA=75% y kappa=0.61). Sin embargo, este método demuestra ser más rápido y eficiente que la ejecución de clasificaciones específicas para cada escena de S2, ya que no depende de la selección manual de regiones de entrenamiento, y puede aplicarse para predecir en otras regiones de similar naturaleza con un grado de confianza aceptable.

En la aplicación del modelo de SR a 1 m/px (Fig. 2b) es donde sí se han apreciado claras mejorías en los estadísticos de precisión de clasificación (OA=0.82% y kappa=0.70). Como resultado, la cobertura espacial de cada clase objetivo se acerca más a las estimaciones centimétricas del dron que con el método de escalado, arrojando un 18.10% (28.24 ha) para agua, 38.54% (60.12 ha) para vegetación, y un 43.36% (67.64 ha) para sedimento.

Sin duda, estos resultados sugieren un gran avance en la teledetección de los sistemas costeros intermareales, ya que no sólo se genera un modelo capaz de separar mejor entre los ecotopos de estos ecosistemas tan complejos a una escala de cobertura espacial más amplia, sino que permiten retraerse en el tiempo y elaborar series temporales robustas para analizar con mayor precisión fenologías y tendencias ante los distintos escenarios de cambio climático (Davies *et al*. 2024).

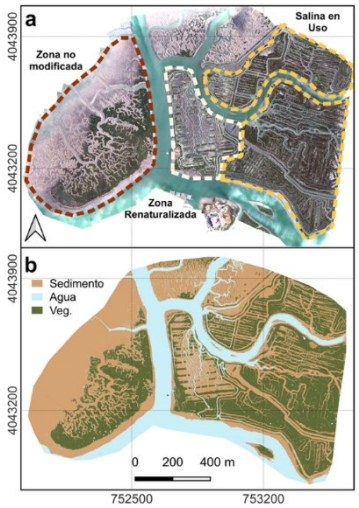


Figura 1. a) Composición RGB del vuelo de dron sobre La Carraca el 14 de julio de 2025. b) Clasificación supervisada XGBoost del vuelo. Se distinguen tres clases: agua, vegetación y sedimento.

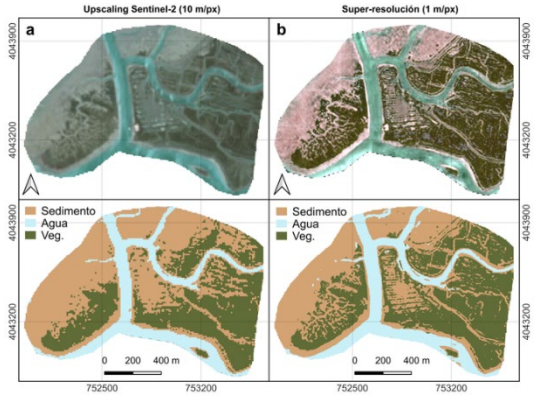


Figura 2. Clasificación XGBoost sobre: a) Escalado a resolución 10 m/px; b) SR a 1 m/px. Se distinguen tres clases: agua, vegetación y sedimento.

Aproximaciones previas basadas en imágenes S2 de resolución espacial media permitieron cartografiar la zonación intermareal del saco interno de la Bahía de Cádiz (Haro *et al*. 2022; Davies *et al*. 2024). Estos resultados se pueden refinar mediante la aplicación del presente modelo de SR a 1 m/px. El elevado valor ecológico de estos sistemas, derivado de la amplia gama de servicios ecosistémicos que proporcionan, junto con su vulnerabilidad frente a las presiones antropogénicas y la regresión de su distribución, ha suscitado un notable interés y ha impulsado diversos esfuerzos de conservación. Además, modelos como el desarrollado

en este estudio pueden contribuir a mejorar la eficacia de las acciones de restauración, ya que una monitorización precisa permite comprender con mayor detalle su fenología, dinámica y tendencias. Esto facilita la toma de decisiones orientadas a incrementar sus probabilidades de supervivencia y establecimiento (Davies *et al*. 2024).

El análisis de correlación espectral (Fig. 3) muestra que el modelo ESRGAN reproduce la respuesta radiométrica del dron con una precisión moderada (R^2 entre 0.53 y 0.75). No obstante, la comparación entre bandas revela una tendencia sistemática a subestimar las reflectancias, especialmente en los rangos medios y altos de los valores normalizados. Esta desviación, situada por debajo de la línea 1:1 ideal y con errores cuadráticos medios que oscilan entre 0.14 y 0.46, sugiere que el proceso de SR no alcanza a replicar totalmente la intensidad radiométrica capturada por el sensor del dron, posiblemente debido a una atenuación de la señal durante la reconstrucción de las características de alta frecuencia. No obstante, pese a los resultados obtenidos con estas aproximaciones, existen otros modelos de SR con mucho potencial y que ya han demostrado estar bien adaptados a los datos satelitales de S2 (*p.e.* modelos de difusión como el DiffFuSR de Sarmad *et al*. 2025 u otras redes neuronales como las empleadas por Major *et al*. 2025). De hecho, algunas de estas aproximaciones buscan refinar aún más el valor espectral del píxel en la mejora de la resolución satelital (Aybar *et al*. 2026).

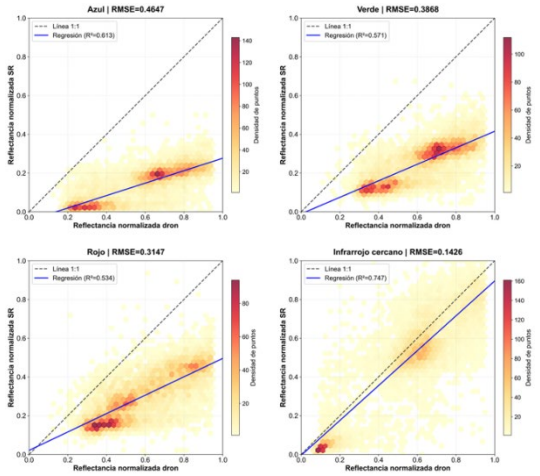


Figura 3. Análisis de correlación espectral entre los valores de reflectancia normalizados de dron y SR.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio ponen de manifiesto el potencial de integrar herramientas de IA mediante modelos multifunción con datos de teledetección a diferentes resoluciones. De las dos aproximaciones evaluadas, la SR de S2 a 1 m/px demuestra una mayor eficiencia cualitativa (especialmente en la definición espacial de estructuras), lo que favorece la clasificación supervisada de coberturas del suelo. No obstante, a nivel cuantitativo, si bien el escalado logra una aproximación a la firma espectral del dron, se observa una tendencia sistemática a la subestimación radiométrica que debe ser considerada en estudios de alta precisión. Sin duda, estas aproximaciones y la exploración de arquitecturas emergentes contribuirán a mejorar la observación de los sistemas costeros, amenazados ante los efectos del cambio climático.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible gracias a los proyectos REWRITE EU (Proyecto nº 101081357) y DIGIDRON (MMT24-ICMAN-01). A. Román, personal contratado bajo la iniciativa Generación D, promovida por Red.es, organismo adscrito al Ministerio de Transformación Digital y Función Pública, destinada a la atracción y retención de talento mediante becas y contratos de formación, financiada por el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia a través de los fondos Next Generation de la Unión Europea.

6. REFERENCIAS

Aybar, C. et al. (2026). A radiometrically and spatially consistent super-resolution framework for sentinel-2. *Remote Sensing of Environment, 334*, 115222. https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115222

Curcio, A.C. et al. (2023). UAV-Hyperspectral Imaging to Estimate Species Distribution in Salt Marshes: A Case Study in the Cadiz Bay (SW Spain). *Remote Sensing, 15*(5), 1419. https://doi.org/10.3390/rs15051419

Davies, B.F.R. et al. (2024) A sentinel watching over inter-tidal seagrass phenology across Western Europe and North Africa. *Communications Earth & Environment, 5*, 382. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01543-z

Haro, S. et al. (2022). Microphytobenthos spatio-temporal dynamics across an intertidal gradient using Random Forest classification and Sentinel-2 imagery. Science of the Total *Environment, 804*, 149983. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149983

Major, D. et al. (2025) A holistic approach for multi-spectral Sentinel-2 super-resolution and spectral evaluation. *International Journal of Remote Sensing, 46*(20). https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2549132

Melet, A. et al. (2020). Earth Observations for Monitoring Marine Coastal Hazards and Their Drivers. *Surveys in Geophysics, 41,* 1489-1534. https://doi.org/10.1007/s10712-020-09594-5

Murray, N.J. et al. (2019). The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature, 565*, 222-225. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0805-8

Román, A., et al. (2026). Unveiling the large coverage of red snow algae blooms in antarctic coastal snowfields. *Communications Earth & Environment*. https://doi.org/10.1038/s43247-025-03156-6

Sarmad, M. et al. (2025). DiffFuSR: Super-Resolution of all Sentinel-2 Multispectral Bands using Diffusion Models. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.11764

Orth, R.J., et al. (2020). Restoration of seagrass habitat leads to rapid recovery of coastal ecosystem services. *Science Advances, 6*(41), eabc6434. https://doi.org/10.1126/sciadv.abc6434

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.127

Impacto de la turbidez y la clorofila-a en la batimetría derivada de Sentinel-2: análisis en el litoral de Barcelona

Pubill Fondevila, David [1] **Gené Skrabec, Bernat** [2] **Huerta i Lluch, Roger** [2] **Angelats Company, Eduard** [1]

[1] Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA), 08860 Castelldefels, España

[2] SPASCAT Technologies S.L., 08320 El Masnou, España

ORCID: Pubill Fondevila 0000-0002-9086-4907 Gené Skrabec 0009-0007-0589-169X
Huerta i Lluch 0000-0003-2094-5485 Angelats Company 0000-0001-7321-4825

Correspondencia: david.pubill@cttc.es bernat.gene@spascat.com roger.huerta@spascat.com eduard.angelats@cttc.es

RESUMEN

La batimetría derivada por satélite a partir de imágenes multiespectrales constituye una alternativa escalable y rentable frente a los métodos tradicionales, especialmente en aguas someras. Este estudio presenta un flujo de trabajo para generar batimetría robusta y precisa a partir de imágenes Sentinel-2 en nueve zonas costeras del Área Metropolitana de Barcelona. Para ello, a partir de las imágenes corregidas atmosféricamente y libres de reflejo especular se derivaron las variables ópticas empleadas en el análisis: reflectancias visibles (R, G, B), las ratios espectrales BG (B2/B3) y BR (B2/B4), así como los productos bio-ópticos clorofila-a (CHL) y turbidez (TUR). Además, las variables espectrales se filtraron mediante una ventana 3×3 para reducir ruido subpíxel, mientras que CHL y TUR se emplearon en su resolución original. En cuanto a los resultados, los modelos basados únicamente en reflectancias presentan un MAE de 0.714m, que disminuye al incorporar la variable TUR (MAE de 0.550m). Por su parte, la ratio BG disminuye sustancialmente el error (MAE de 0.402m), y la combinación de BG y BR con CHL y TUR proporciona el mejor resultado global (MAE de 0.392m). Esto indica que BG actúa como predictor clave y que CHL y TUR aportan información complementaria en entornos ópticamente complejos. En conjunto, estos resultados demuestran que la integración de las ratios espectrales y productos bio-ópticos mediante regresión basada en redes neuronales permite obtener batimetrías más precisas y robustas en diversos entornos costeros.

Palabras clave: *Batimetría derivada por satélite, Teledetección, Sentinel-2*

Fecha de recepción: 6 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 6 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Impacto de la turbidez y la clorofila-a en la batimetría derivada de Sentinel-2: análisis en el litoral de Barcelona

Pubill Fondevila, David [(1)], Gené Skrabec, Bernat [(2)], Huerta i Lluch, Roger [(2)], Angelats Company, Eduard [(1)]

[(1)] Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA), Castelldefels, España.
0000-0002-9086-4907, david.pubill@cttc.es
0000-0001-7321-4825, eduard.angelats@cttc.es

[(2)] SPASCAT Technologies S.L., España.
0009-0007-0589-169X, bernat.gene@spascat.com
0000-0003-2094-5485, roger.huerta@spascat.com

Resumen: La batimetría derivada por satélite a partir de imágenes multiespectrales constituye una alternativa escalable y rentable frente a los métodos tradicionales, especialmente en aguas someras. Este estudio presenta un flujo de trabajo para generar batimetría robusta y precisa a partir de imágenes Sentinel-2 en nueve zonas costeras del Área Metropolitana de Barcelona. Para ello, a partir de las imágenes corregidas atmosféricamente y libres de reflejo especular se derivaron las variables ópticas empleadas en el análisis: reflectancias visibles (R, G, B), las ratios espectrales BG (B2/B3) y BR (B2/B4), así como los productos bio-ópticos clorofila-a (CHL) y turbidez (TUR). Además, las variables espectrales se filtraron mediante una ventana 3×3 para reducir ruido subpíxel, mientras que CHL y TUR se emplearon en su resolución original. En cuanto a los resultados, los modelos basados únicamente en reflectancias presentan un MAE de 0.714m, que disminuye al incorporar la variable TUR (MAE de 0.550m). Por su parte, la ratio BG disminuye sustancialmente el error (MAE de 0.402m), y la combinación de BG y BR con CHL y TUR proporciona el mejor resultado global (MAE de 0.392m). Esto indica que BG actúa como predictor clave y que CHL y TUR aportan información complementaria en entornos ópticamente complejos. En conjunto, estos resultados demuestran que la integración de las ratios espectrales y productos bio-ópticos mediante regresión basada en redes neuronales permite obtener batimetrías más precisas y robustas en diversos entornos costeros.

Palabras clave: Batimetría derivada por satélite, Teledetección, Sentinel-2

Impact of turbidity and chlorophyll-a on Sentinel-2 derived bathymetry: a study along the Barcelona coastal area

***Abstract**: Satellite-derived bathymetry from multispectral imagery presents a scalable and cost-effective alternative to traditional methods, especially in shallow waters. This study presents a workflow to generate robust and accurate bathymetry from Sentinel-2 imagery across* nine *coastal areas of the Barcelona Metropolitan Area. To this end, optically relevant variables were derived from atmospherically corrected and sunglint-free images: visible reflectances (R, G, B), the spectral ratios BG (B2/B3) and BR (B2/B4), as well as the bio-optical products chlorophyll-a (CHL) and turbidity (TUR). In addition, the spectral variables were filtered using a 3×3 window to reduce sub-pixel noise, whereas CHL and TUR were used at their original resolution. Regarding the results, models based only on reflectances show a MAE of 0.714m, which decreases when incorporating TUR (MAE of 0.550 m). The BG ratio further reduces the error (MAE of 0.402m), and the combination of BG and BR with CHL and TUR provides the best overall result (MAE of 0.392m). This indicates that BG acts as the key predictor and that CHL and TUR provide complementary information in optically complex environments. Overall, these results demonstrate that integrating spectral ratios and bio-optical products with neural network–based regression enables more accurate and robust bathymetry across diverse coastal areas.*

***Keywords**: Satellite-Derived Bathymetry, Remote Sensing, Sentinel-2*

1. INTRODUCCIÓN

La batimetría es fundamental para caracterizar la topografía submarina y su evolución, con aplicaciones en navegación, gestión del riesgo costero y restauración de hábitats. Entre las técnicas empleadas destacan los métodos ópticos (batimetría derivada a partir de imágenes multiespectrales y LiDAR batimétrico) y los hidroacústicos (SONAR multihaz), cuya aplicabilidad depende principalmente de la profundidad y de las condiciones ópticas del agua. En general, los métodos ópticos resultan eficaces en aguas claras y someras, con profundidades que pueden alcanzar hasta 60 m en el caso del LiDAR, mientras que los sistemas hidroacústicos ofrecen un mejor rendimiento en profundidades medias y grandes (20–500 m), aunque requieren mayores recursos (Mandlburger, 2022).

La batimetría derivada por satélite (SDB) ha ganado relevancia por su escalabilidad y rentabilidad. Entre los métodos semiempíricos destacan el modelo lineal de bandas (Lyzenga, 2006) y el de ratio de bandas con transformación logarítmica (Stumpf, 2003), aplicados a imágenes ópticas preprocesadas, como las de Sentinel-2 (S2), y calibrados con datos de referencia. Avances recientes han adaptado estos enfoques a aguas turbias y a regiones del Mediterráneo occidental (Caballero, 2023; Viaña-Borja, 2023), aunque no integran explícitamente parámetros bio-ópticos, como la clorofila-a (CHL) o la turbidez (TUR), como predictoras que mejoren la precisión del modelo. Los enfoques basados en la física (Casal, 2020) modelan las propiedades ópticas de la columna de agua y evitan mediciones *in situ*, pero dependen de parametrizaciones fiables y pueden degradarse en aguas ópticamente complejas.

El aprendizaje automático ofrece otra vía prometedora con modelos como *Random Forest* o redes neuronales entrenadas con datos de referencia (Eugenio, 2021). Aunque no requieren calibraciones adicionales, su transferibilidad entre regiones sigue siendo limitada (Viaña-Borja, 2023). Asimismo, se han explorado alternativas basadas en la propagación de olas (Bergsma, 2019), aunque este enfoque es más complejo y menos compatible con flujos de trabajo combinados de Observación de la Tierra (EO) y vehículos de superficie no tripulados (USV). En este contexto, el proyecto *Waterbody Assessment and Verification fusing Earth observation and Seabot Surveying* (WAVESS), parte del programa ESA Phi-LabNET Spain, surge como respuesta a estas limitaciones.

WAVESS aborda un desafío clave en la monitorización costera: desarrollar una solución escalable y rentable que combine datos de EO con mediciones de referencia en tiempo real. Mientras que los métodos tradicionales requieren campañas de campo extensas, la innovación de WAVESS radica en la fusión de imágenes satelitales con datos obtenidos por USVs. En este contexto, este estudio tiene como objetivo evaluar el uso de CHL y TUR como herramientas para mejorar la precisión de la SDB. Para ello, se emplean imágenes de S2 corregidas con ACOLITE. El análisis se centra en determinar si la integración de los parámetros bio-ópticos, junto con reflectancias corregidas y ratios espectrales, podría contribuir a reducir la incertidumbre en las estimaciones, especialmente en entornos ópticamente complejos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de interés abarca los tramos litorales de Sitges, Castelldefels, Gavà, Viladecans, Barcelona, Sant Adrià, Badalona, Montgat y El Masnou (Fig. 1). Las nueve zonas bajo estudio presentan extensiones que oscilan entre 1 y 5 km de longitud y se extienden hasta 2 km mar adentro, alcanzando profundidades máximas de 15 m. Asimismo, se trata de zonas batimétricamente activas debido a la influencia de temporales marítimos. Como datos de referencia se emplean los modelos topobatimétricos de 2021-2022 para estas zonas, disponibles en el Geoportal de Cartografía del Área Metropolitana de Barcelona (AMB, 2025), donde únicamente se especifican el mes y año de adquisición.

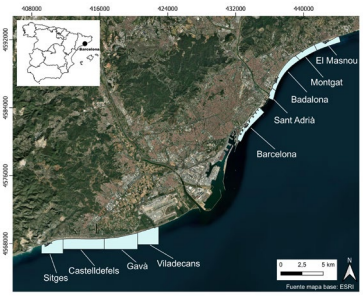


Figura 1. Zonas de estudio en el litoral de Barcelona

2.2. Datos Sentinel-2

Para cada zona de estudio se seleccionaron imágenes S2 sin nubosidad ni sombras de nubes, y coincidentes en mes y año con los modelos topobatimétricos, lo que implica posibles diferencias de varios días entre ambos conjuntos de datos. Asimismo, se comprobó la ausencia de eventos meteorológicos relevantes durante los días analizados. En total se descargaron seis imágenes S2 L1C (S2A/B-MSI) del servidor de la ESA (https://dataspace.copernicus.eu/), que contienen las 13 bandas espectrales del sensor MSI con resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m.

La corrección atmosférica y de reflejo especular de las imágenes descargadas se realizó mediante el procesador ACOLITE, versión 20250402.0 (https://github.com/acolite/acolite). Además, para cada imagen se generaron los productos de CHL y TUR preprogramados. Entre las distintas opciones posibles se seleccionó OC3 (O'Reilly, 2019) para la estimación de CHL y Dogliotti_2015 (Dogliotti, 2015) para la estimación de TUR, por ser los algoritmos más robustos y ampliamente validados en aguas costeras someras, proporcionando estimaciones estables sin necesidad de calibraciones regionales adicionales.

2.3. Procesamiento de imágenes

Para estimar la batimetría de las zonas de estudio se desarrolló un flujo de procesado en *Python* que combinó la batimetría de referencia con imágenes S2 corregidas con ACOLITE. El procedimiento aplicó máscaras de

agua específicas para cada playa y generó un conjunto de variables ópticas a partir de las bandas visibles, incluyendo las reflectancias (R, G, B) y las ratios BG (B2/B3) y BR (B2/B4). Dichas variables se suavizaron mediante una ventana de 3×3 píxeles, calculando la media local para reducir el ruido asociado al oleaje, la variabilidad subpíxel y la heterogeneidad del fondo. Un análisis preliminar confirmó que este filtrado mejoraba el rendimiento de las reflectancias y de las ratios. En cambio, para las variables CHL y TUR no se utilizó esta técnica, dado que el suavizado adicional no aportaba mejoras y, en algunos casos, degradaba los resultados.

A partir de estas variables se generaron los puntos de entrenamiento y validación mediante trayectorias simuladas que replicaban una campaña batimétrica real, con transectos perpendiculares a la costa separados 250 m. Con estas muestras se entrenó un modelo de regresión basado en una red neuronal *Multi-layer Perceptron* (MLP), que modeló la relación entre las variables ópticas y la profundidad. Finalmente, el sistema calculó métricas de evaluación como el *Mean Absolute Error* (MAE), los percentiles 95 y 99 (P95, P99) y el *Median Absolute Error* (MedianAE), lo que permitió comparar de forma consistente el rendimiento entre las distintas combinaciones de variables de entrada. Para cada tramo litoral se realizaron diez experimentos con el objetivo de evaluar la estabilidad del algoritmo y detectar posibles valores atípicos. A partir de estos ensayos se calculó la media de las métricas en cada tramo, generando un conjunto de indicadores por ubicación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados en este trabajo se basan en la media agregada de todos los tramos, lo que permite comparar de forma consistente el rendimiento entre los métodos evaluados. Para analizar la contribución de cada grupo de predictores, los resultados se organizan en tres bloques, presentados en las Tablas 1–3.

Los resultados muestran tendencias coherentes entre los distintos bloques de predictores. En primer lugar, los modelos basados únicamente en reflectancias (Tabla 1) presentan un MAE de 0.714m y un MedianAE de 0.512m. Tanto la incorporación de CHL como de TUR mejora el rendimiento, aunque la combinación de ambas alcanza el mejor resultado dentro de este bloque (MAE de 0.516m). En segundo lugar, en la Tabla 2 se incorpora la ratio BG, lo que reduce el error hasta un MAE de 0.402m y un MedianAE de 0.294m, confirmando su papel relevante como predictor óptico asociado a la profundidad. Sin embargo, añadir CHL degrada el rendimiento (MAE de 0.440m), mientras que incorporar TUR mantiene prácticamente los resultados obtenidos con solo BG (MAE de 0.402m), lo que sugiere un aporte redundante. Este patrón es coherente con las correlaciones obtenidas, ya que BG y BR muestran una correlación alta con TUR ($r \approx 0.9$), mientras que CHL presenta una correlación algo menor ($r \approx 0.8$), lo que sugiere una contribución más complementaria. En este bloque, la combinación BG+CHL+TUR produce una ligera mejora (MAE de 0.394m). Por último, en el tercer bloque (Tabla 3), la incorporación conjunta de BG y BR no mejora respecto a RGB_BG (MAE de 0.415m y MedianAE de 0.297m). En este caso, CHL sí aporta información útil y reduce el error a un MAE de 0.394m, mientras que TUR empeora el rendimiento (MAE de 0.419m). La combinación CHL+TUR junto con ambas ratios alcanza el mejor resultado global (MAE de 0.392m, P95 de 1.108m, P99 de 1.770m y MedianAE de 0.287m), lo que indica que las variables bio-ópticas pueden reforzar el modelo.

Tabla 1. Resultados modelos RGB con CHL y TUR

Modelo	MAE	P95	P99	MedianAE
RGB	0.714	2.051	3.244	0.512
RGB + CHL	0.688	1.988	3.126	0.491
RGB + TUR	0.550	1.619	2.666	0.383
RGB + CHL + TUR	0.516	1.512	2.458	0.361

Tabla 2. Resultados modelos RGB+BG con CHL y TUR

Modelo	MAE	P95	P99	MedianAE
RGB_BG	0.402	1.143	1.807	0.294
RGB_BG + CHL	0.440	1.295	2.256	0.311
RGB_BG + TUR	0.402	1.123	1.768	0.300
RGB_BG + CHL + TUR	0.394	1.113	1.766	0.289

Tabla 3. Resultados modelos RGB+BG+BR con CHL y TUR

Modelo	MAE	P95	P99	MedianAE
RGB_BG_BR	0.415	1.176	1.969	0.297
RGB_BG_BR + CHL	0.394	1.110	1.762	0.290
RGB_BG_BR + TUR	0.419	1.174	1.817	0.310
RGB_BG_BR + CHL + TUR	0.392	1.108	1.770	0.287

Aunque la ratio BG es el predictor más informativo para estimar la profundidad, los resultados muestran que las variables bio-ópticas CHL y TUR pueden aportar valor añadido en ciertos escenarios. Su incorporación permite representar variaciones en la columna de agua que las ratios espectrales no capturan por sí solas, especialmente cuando cambian las condiciones ópticas. En las zonas de interés, la TUR media es de 2.25 NTU y la CHL media de 1.8 $\mu g/m^3$, valores propios de aguas relativamente claras, lo que explica que su aporte sea moderado en este estudio. No obstante, en regiones con mayor CHL o TUR, donde la variabilidad bio-óptica influya más en la atenuación lumínica, es previsible que estas variables tengan un peso más significativo y mejoren la estimación batimétrica. En síntesis, aunque BG constituye la base más sólida, CHL y TUR pueden reforzar el modelo en situaciones con mayor complejidad bio-óptica.

Para ilustrar esta dinámica y mostrar de forma intuitiva cómo varía el error a lo largo del perfil batimétrico, la Figura 2 presenta un ejemplo representativo de la playa de Gavà. Los diagramas de barras comparan la evolución del error absoluto medio por tramos de profundidad para el modelo basado únicamente en RGB y para la configuración RGB_BG_BR+CHL+TUR. El

modelo RGB presenta errores más elevados, especialmente a partir de los –5 m, mientras que la incorporación de las ratios junto con CHL y TUR reduce el error y estabiliza las predicciones a lo largo del perfil. Por su parte, el mapa de error absoluto del modelo final RGB_BG_BR+CHL+TUR muestra errores generalmente bajos en la mayor parte de la zona y un incremento progresivo hacia los sectores más profundos.

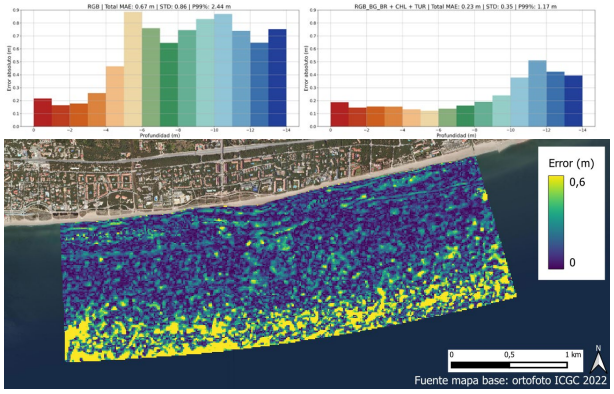


Figura 2: Error absoluto medio por tramos de profundidad en Gavà para los modelos RGB y RGB_BG_BR+CHL+TUR, junto a la distribución espacial del error absoluto del modelo final.

4. CONCLUSIONES

Los resultados parecen indicar que la selección de predictores ópticos es clave para la calidad de la batimetría derivada de S2. Aunque las reflectancias RGB ofrecen una primera aproximación, la incorporación de TUR mejora el ajuste y la ratio BG supone el avance más significativo, reduciendo el error en más de un 40% y consolidándose como el predictor más robusto en aguas someras. La combinación de BG y BR no mejora el rendimiento por sí sola, pero sí cuando se integra con CHL, que contribuye a estabilizar el modelo en condiciones ópticamente más complejas. El mejor rendimiento global de las métricas calculadas se obtiene al combinar BG, BR, CHL y TUR, lo que demuestra que las variables bio-ópticas potencian las ratios espectrales. En definitiva, la incorporación de estos predictores optimiza el rendimiento de los modelos SDB y permite obtener estimaciones batimétricas aparentemente más precisas. No obstante, la aplicación futura de este flujo de trabajo requiere una validación en más escenarios costeros para evaluar su comportamiento ante distintas tipologías de fondo y condiciones variables de CHL y TUR, por ejemplo, asociadas a eventos meteorológicos extremos. Además, podrían considerarse otras bandas, como la Banda 1, citada en otros trabajos recientes (Roca-Mora, 2026).

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la ESA Phi-Lab NET Spain en el marco del proyecto WAVESS (ref. IEEC/98/2025).

6. REFERENCIAS

AMB, Àrea Metropolitana de Barcelona. Geoportal de Cartografía. Última actualización setiembre 2025. https://geoportalcartografia.amb.cat/AppGeoportalCartografia2/index.html

Bergsma, E.W.J., Almar, R., Maisongrande, P., 2019. Radon-augmented Sentinel-2 satellite imagery to derive wave-patterns and regional bathymetry. *Remote Sensing, 11*. https://doi.org/10.3390/rs11161918

Caballero, I., Stumpf, R., 2023. Confronting turbidity, the major challenge for satellite-derived coastal bathymetry. *Science of the Total Environment, 870*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161898

Casal, G., et al., 2020. Satellite-derived bathymetry in optically complex waters using a model inversion approach and Sentinel-2 data. *Estuarine Coastal and Shelf Science, 241*, 106814. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106814

Dogliotti, A. I., et al., 2015. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment, 156*, 157–168. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020

Eugenio, F., Marcello, J., Mederos-Barrera, A., Marqués., F., 2021. High-Resolution Satellite Bathymetry Mapping: Regression and Machine Learning-Based Approaches. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing 60*:1–14. https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3135462

Lyzenga, D.R., Malinas, N.P., Tanis, F. J., 2006. Multispectral Bathymetry Using a Simple Physically Based Algorithm. I*EEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 44:* 2251–2259. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872909

Mandlburger, G., 2022. A review of active and passive optical methods in hydrography. The International *Hydrographic Review, 28*, pp. 8-52. https://doi.org/10.58440/ihr-28-a15

O'Reilly, J.E., & Werdell, P.J., 2019. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors – OC4, OC5 & OC6. *Remote Sensing of Environment, 229*, 32–47. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.021

Stumpf R.P., Holderied K., Sinclair M., 2003. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types, *Limnology and Oceanography, 1*, part, 2. https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547

Viaña-Borja, S.P., Fernández-Mora, A., Stumpf, R.P., Navarro, G., Caballero, I, 2023. Semi-automated bathymetry using Sentinel-2 for coastal monitoring in the Western Mediterranean. International *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 120*, 103328. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103328

Roca-Mora, M., et al., 2026. Blending PlanetScope and Sentinel-2 imagery to assess subtidal seagrass changes in turbid waters. Marine Pollution Bulletin, 225, 119228. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119228.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.137

Sistema integrado de detección y alerta de riesgo de derrames de petróleo en la amazonia azul brasileña

Alves de Paula, Lourenço [1,2] **Araujo Ferreira, Victor Vinicius** [3] **Eyji Sano, Edson** [1,4]

[1] Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil

[2] Rede de Modelagem Oceanográfica Observacional, Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

[3] Rede de Modelagem Oceanográfica, Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

[4] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Cerrados, Planaltina, Distrito Federal, Brasil

ORCID: Alves de Paula 0009-0002-7020-1951 Araujo Ferreira 0009-0008-5855-052X Eyji Sano 0000-0001-5760-556X

Correspondencia: lourencoalvesdepaula@gmail.com victor.ocn@gmail.com edson.sano@embrapa.br

RESUMEN

El aumento del tráfico marítimo y de las actividades de exploración y producción de petróleo y gas ha incrementado el riesgo de episodios de contaminación por hidrocarburos en zonas costeras sensibles. Este trabajo propone una arquitectura integrada de apoyo operativo que combina detecciones satelitales casi en tiempo real, clasificación, modelización lagrangiana y visualización web. Los resultados se cruzaron con Áreas Marinas Protegidas para identificar interacciones potenciales y estimar el tiempo hasta la primera intersección tras t0. Como validación exploratoria, se realizó el cruce entre las detecciones del sistema y registros independientes del organismo federal brasileño de medio ambiente, lo que indicó una convergencia preliminar entre los casos coincidentes y el índice de evidencia propuesto, aunque sin constituir una validación definitiva de la naturaleza del contaminante. Aplicada al sector sur-sureste de la Zona Económica Exclusiva brasileña, la arquitectura mostró potencial para convertir detecciones iniciales en escenarios de riesgo explícitos en el espacio y en el tiempo, con productos disponibles en un panel interactivo de avisos casi en tiempo real.

Palabras clave: *manchas de petróleo; Sentinel-1; CERULEAN; OpenDrift; Áreas Marinas Protegidas*

Fecha de recepción: 8 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 9 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Sistema integrado de detección y alerta de riesgo de derrames de petróleo en la Zona Económica Exclusiva brasileña

Alves de Paula, Lourenço [1,2], Araujo Ferreira, Victor Vinicius [3], Eyji Sano, Edson [1,4]

[1] Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil.

[2] Rede de Modelagem Oceanográfica, Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil, Brasil.

[3] Rede de Modelagem Oceanográfica, Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

[4] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Cerrados, Planaltina, Distrito Federal, Brasil

0009-0002-7020-1951, lourencoalvesdepaula@gmail.com.

0009-0008-5855-052X, victor.ocn@gmail.com.

0000-0001-5760-556X, edson.sano@embrapa.br.

Resumen: El aumento del tráfico marítimo y de las actividades de exploración y producción de petróleo y gas ha incrementado el riesgo de episodios de contaminación por hidrocarburos en zonas costeras sensibles. Este trabajo propone una arquitectura integrada de apoyo operativo que combina detecciones satelitales casi en tiempo real, clasificación, modelización lagrangiana y visualización web. Los resultados se cruzaron con Áreas Marinas Protegidas para identificar interacciones potenciales y estimar el tiempo hasta la primera intersección tras t_0. Como validación exploratoria, se realizó el cruce entre las detecciones del sistema y registros independientes del organismo federal brasileño de medio ambiente, lo que indicó una convergencia preliminar entre los casos coincidentes y el índice de evidencia propuesto, aunque sin constituir una validación definitiva de la naturaleza del contaminante. Aplicada al sector sur-sureste de la Zona Económica Exclusiva brasileña, la arquitectura mostró potencial para convertir detecciones iniciales en escenarios de riesgo explícitos en el espacio y en el tiempo, con productos disponibles en un panel interactivo de avisos casi en tiempo real.

Palabras clave: manchas de petróleo; Sentinel-1; CERULEAN; OpenDrift; Áreas Marinas Protegidas

Integrated system for detection and risk alert of oil spills in the Brazilian Blue Amazon

***Abstract**: The increase in maritime traffic and oil and gas exploration and production activities has heightened the risk of oily occurrences in sensitive coastal zones. This study proposes an integrated architecture for operational support, combining near-real-time SAR detections, an evidence index, Lagrangian modeling, and web visualization. Polygons of potential oil slicks detected by CERULEAN in Sentinel-1 imagery were ranked using an evidence index (EI) and converted into initial conditions for drift simulations with OpenDrift/OpenOil, forced by metocean data. The results were intersected with Marine Protected Areas (MPAs) to identify potential intersections and estimate the time until the first intersection after t_0. As an exploratory validation step, CERULEAN detections were cross-referenced with independent SIEMA records, indicating preliminary convergence between matching cases and higher evidence-index classes. The south-southeastern sector of the Brazilian Blue Amazon was adopted as the case study, and the resulting products were made available through a near-real-time interactive warning dashboard.*

***Keywords**: oil slicks; Sentinel-1; CERULEAN; OpenDrift; Marine Protected Areas*

1. INTRODUCCIÓN

El aumento del tráfico marítimo y de la actividad petrolera ha incrementado el riesgo de derrames y sus impactos en ambientes costeros y oceánicos sensibles. En la Zona Económica Exclusiva (ZEE) brasileña, este escenario se ve agravado por la posible expansión de la frontera petrolera en el margen ecuatorial, lo que hace esencial detectar rápidamente posibles manchas, prever su deriva y anticipar impactos en áreas críticas (Carvalho *et al*., 2025). En este contexto, los modelos lagrangianos forzados por campos de viento, corrientes y oleaje se

han utilizado ampliamente para predecir la deriva de manchas de petróleo, simulando su transporte y los procesos de intemperización.

Paralelamente, la teledetección mediante radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR) ha adquirido relevancia para la detección y el seguimiento cuasi operativo de manchas (Fingas; Brown, 2018). A partir de ello, este trabajo propone una arquitectura modular que integra detecciones SAR, disponibles en la plataforma CERULEAN, y simulaciones lagrangianas con OpenDrift (Dagestad *et al*., 2018), con el fin de estimar el riesgo de impacto sobre Áreas Marinas Protegidas (AMP). En este estudio, los datos de CERULEAN se tratan como posibles manchas de petróleo, y no como derrames confirmados, ya que la propia plataforma reconoce que los datos SAR, por sí solos, no demuestran de forma concluyente la presencia de petróleo; en algunos casos, las detecciones pueden refinarse mediante revisión humana, sin sustituir la necesidad de validación independiente.

En este contexto, el objetivo consiste en crear un sistema capaz de identificar manchas de petróleo en el mar, prever su desplazamiento e indicar posibles áreas sensibles amenazadas, proporcionando apoyo rápido a la prevención y a la respuesta ambiental.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y selección de casos

El estudio se centra en el sector sur-sureste de la plataforma continental brasileña (50.2°W; 37.7°W; 29.5°S; 21.2°S). Se trata de un corredor logístico con elevada actividad marítimo-portuaria (ANTAQ, 2025), íntegramente inserto en la ZEE de Brasil.

La región combina una variabilidad meteo-oceanográfica relevante para la deriva, incluyendo vientos estacionales, frentes fríos y procesos de mesoescala asociados a la Corriente de Brasil y a la surgencia costera, además de una elevada vulnerabilidad socioambiental, con presencia de unidades de conservación marino-costeras (ICMBio, 2020).

2.2. Datos

2.2.1. Detección SAR (CERULEAN/Sentinel-1).

CERULEAN es un sistema global de seguimiento de la contaminación marina por petróleo, desarrollado para detectar automáticamente posibles manchas de petróleo en la superficie del mar a partir de imágenes SAR de Sentinel-1, indicando posibles fuentes asociadas, como embarcaciones e infraestructuras offshore. Este sistema es mantenido por SkyTruth, con una interfaz de programación de aplicaciones (API) (https://api.cerulean.skytruth.org/) abierta para el acceso a los datos, de uso público con fines de conservación y seguimiento ambiental (SkyTruth, 2026).

A partir de esta base, en este trabajo el término *caso* corresponde al polígono asociado a una entidad detectada como posible mancha de petróleo en una determinada escena SAR. La primera detección de cada entidad se definió como el instante t_0.

Además de los polígonos, se calculó un índice de evidencia (IE) a partir de los datos facilitados por la API de CERULEAN. El valor final se obtuvo mediante suma ponderada, conforme a la Ecuación 1.

$$\mathrm{IE} = 4{*}\mathrm{C}_{\text{clasificación}} + 3{*}\mathrm{C}_{\text{contexto}} + 2{*}\mathrm{C}_{\text{morfologia}} + \mathrm{C}_{\text{estructura}} \quad (1)$$

Donde IE representa el Índice de Evidencia, calculado como una puntuación ponderada a partir de cuatro componentes: clasificación, contexto, morfología y estructura. La puntuación asignada a cada componente deriva directamente de atributos ya disponibles en la base de datos de cada caso, como nivel de revisión, etiqueta humana, confianza del modelo, confianza de la mancha, contexto de origen, métricas geométricas y características estructurales de la entidad detectada. Estos atributos se evalúan mediante un conjunto fijo de reglas que asignan incrementos o decrementos a la puntuación de cada componente según refuerzan o debilitan la plausibilidad de la ocurrencia. De este modo, la puntuación de cada componente no resulta de una variable aislada ni de un único parámetro continuo, sino de la combinación reglada de múltiples atributos extraídos de la base del caso. A continuación, las puntuaciones obtenidas se integran mediante una suma ponderada, asignando peso cuatro al componente de clasificación, peso tres al de contexto, peso dos al de morfología y peso uno al de estructura, de manera que la clasificación ejerce la mayor influencia sobre el resultado final, seguida del contexto, mientras que morfología y estructura actúan como refuerzos complementarios. El valor total se convierte después en cinco clases cualitativas de evidencia, según los siguientes umbrales: E5 para puntuaciones mayores o iguales que ocho, E4 para valores mayores o iguales que cinco, E3 para valores mayores o iguales que dos, E2 para valores mayores o iguales que 0 y E1 para valores inferiores a cero. Así, el IE no expresa una medida física directa de la mancha, sino un índice sintético de robustez relativa de las evidencias disponibles, utilizado para jerarquizar los casos y aportar mayor consistencia interpretativa a las alertas emitidas por el sistema.

2.2.2. Validación con registros independientes

Como etapa exploratoria de validación, se utilizaron registros del Sistema de Información de Emergencias Ambientales (SIEMA) del Instituto Brasileño de Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables (IBAMA), que contienen ocurrencias de contaminación por hidrocarburos con referencia espacial y temporal (IBAMA, 2024).

El cruce con las detecciones de CERULEAN se realizó en dos etapas. En primer lugar, se aplicó un filtro temporal de dos días entre la fecha de la ocurrencia en SIEMA y el instante de detección en CERULEAN. A continuación, los candidatos remanentes se evaluaron en cuanto a la proximidad espacial entre el lugar de la ocurrencia y el polígono detectado. El objetivo fue identificar correspondencias plausibles entre registros independientes y los casos detectados automáticamente.

2.2.3. Forzamientos meteo-oceanográficos

Los forzamientos meteo-oceanográficos utilizados fueron el viento a 10 metros (U10) y las corrientes oceánicas superficiales. Los campos de viento se obtuvieron del modelo Global Forecast System (GFS), con resolución de 0.25° (NCEP, 2015). Para las condiciones oceanográficas, se utilizó el producto de reanálisis/predicción del modelo Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM), acoplado al Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCODA), con resolución de 1/12° (Naval Research Laboratory, 2021).

2.2.4. Modelización y estimación del riesgo

La deriva de las manchas de petróleo se simuló con el modelo lagrangiano OpenDrift, mediante el módulo OpenOil. Los polígonos procedentes de la plataforma CERULEAN se utilizan como región inicial del desplazamiento de la mancha (t_0). Estos se rellenan virtualmente con hasta 500 partículas distribuidas sobre el área detectada. El horizonte de simulación varió entre 6 y 180 h, priorizando la predicción a corto plazo para el apoyo a respuestas rápidas de contingencia.

2.2.5. Áreas Marinas Protegidas

Las AMP empleadas en este estudio se obtuvieron a partir de la base mundial WDPA/Protected Planet (UNEP-WCMC, 2025) y se clasificaron según su categoría de gestión de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Estas áreas se utilizaron como base espacial para evaluar el potencial de intersección entre las trayectorias simuladas y regiones ambientalmente sensibles.

2.3. Arquitectura web

Se desarrolló un panel interactivo en Leaflet que integra, en un único entorno, la visualización de los casos, de las capas geoespaciales y de los resultados de las simulaciones. La interfaz permite seleccionar fecha, escena y caso, además de controlar capas, clasificación y navegación temporal. Los productos dinámicos se muestran con actualización sincronizada de las partículas y trayectorias simuladas, a partir de archivos ligeros en JSON y GeoJSON, garantizando la coherencia espacial y temporal de las visualizaciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La arquitectura propuesta permite organizar los resultados en tres escalas complementarias: fecha de detección, escena Sentinel-1 y caso individual. En este estudio, cada caso corresponde al polígono asociado a una entidad identificada como posible mancha de petróleo en una escena SAR. Esta organización es relevante porque un mismo día puede incluir más de una escena, y cada escena puede contener múltiples casos, de modo que el total de detecciones refleja no sólo la fecha de adquisición, sino también la cobertura orbital y la segmentación espacial de las entidades. Como producto adicional, se desarrolló una interfaz interactiva para la visualización de los casos, su integración con las simulaciones y la consulta de los productos generados por el sistema (https://lourencoalves.github.io/oceom-web/).

Como etapa de validación exploratoria, se seleccionaron cinco casos con correspondencia plausible entre registros del SIEMA y detecciones de CERULEAN, tras la aplicación de los criterios de proximidad temporal y espacial descritos en la metodología. En este subconjunto, se observó un predominio de evidencia muy fuerte, con cuatro casos clasificados como E5 y solo uno como E2 (Tabla 1). Este patrón sugiere consistencia en el cálculo del índice propuesto, dado que los valores altos de IE se corresponden con los registros independientes del SIEMA.

Tabla 1. Casos coincidentes entre SIEMA y CERULEAN utilizados en la validación exploratoria.

ID CERULEAN	Fecha	Contaminante SIEMA	IE	Alcanza AMP
4261998	2021-11-04	Agua oleosa	E5	No
4264978	2021-12-03	Aceite lubricante	E5	No
4253412	2022-11-22	Aceite lubricante	E5	No
3679449	2023-03-22	Aceite (no especificado)	E2	No
4254738	2022-03-06	Mezcla oleosa	E5	Si

Tres de estos cinco casos presentaron revisión humana en la base de datos de CERULEAN, todos ellos asociados a etiquetas vinculadas a embarcaciones, mientras que dos permanecieron únicamente en la clasificación automática, incluido un caso también clasificado como E5. Este resultado indica que la revisión humana refuerza la interpretación de los objetivos, pero no constituye la única condición para situar casos plausibles en las clases superiores de evidencia. Al mismo tiempo, la presencia de un caso E2 entre los coincidentes muestra que la correspondencia con SIEMA no elimina la incertidumbre, preservando gradaciones de confianza incluso dentro del subconjunto de validación.

En lo que respecta al riesgo proyectado, cuatro de los cinco casos no presentaron intersección con AMP, mientras que el caso 4254738, detectado el 06/03/2022 y clasificado con IE muy fuerte (E5), presentó una intersección alta inmediata, con una primera intersección ya presente dentro de una AMP, y una deriva simulada que indicaba riesgo para otras dos AMP en las 180 h posteriores a t_0 (Figura 1).

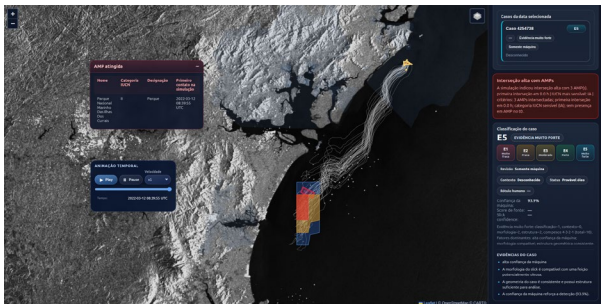


Figura 1. Panel del sistema operativo propuesto tras la detección, clasificación y simulación de deriva del caso (https://lourencoalves.github.io/oceom-web/?case=4254738).

Este resultado pone de manifiesto que la validación exploratoria de la detección y el análisis de riesgo espacial corresponden a dimensiones complementarias, aunque distintas, de la arquitectura propuesta: la primera busca verificar la plausibilidad independiente de las entidades detectadas, mientras que la segunda cualifica el potencial impacto ambiental a partir de la simulación de deriva. Así, más que demostrar de forma definitiva la naturaleza de cada ocurrencia, este subconjunto muestra que la arquitectura fue capaz de jerarquizar casos plausibles y, simultáneamente, identificar situaciones en las que una detección inicial coincide con riesgo inmediato para áreas protegidas.

4. CONCLUSIONES

Los resultados indican que la arquitectura propuesta constituye una cadena operativa prometedora para transformar detecciones SAR de CERULEAN en información útil para el triaje y el apoyo a la toma de decisiones, al integrar automáticamente la identificación inicial de la entidad, la simulación de deriva y la evaluación del riesgo sobre AMP. En el subconjunto de validación exploratoria, el predominio de casos clasificados como E5 entre aquellos coincidentes con registros independientes del SIEMA sugiere convergencia entre el índice de evidencia propuesto y las ocurrencias de contaminación por hidrocarburos notificadas, aunque sin constituir una validación definitiva de la naturaleza del contaminante. Además, el caso 4254738 mostró que la arquitectura no sólo jerarquiza casos plausibles, sino que también es capaz de identificar situaciones de riesgo inmediato para áreas sensibles. Así, la principal contribución del estudio no reside en la confirmación concluyente de manchas de petróleo, sino en la capacidad de convertir observaciones iniciales en escenarios de riesgo explícitos en el espacio y en el tiempo, con potencial de aplicación en sistemas casi en tiempo real de seguimiento y respuesta ambiental.

A pesar de encontrarse todavía en una fase inicial de operación, el sistema presentó resultados alentadores, evidenciando su potencial para convertir observaciones iniciales en escenarios de riesgo explícitos en el espacio y en el tiempo, con aplicación prometedora en sistemas casi en tiempo real. Como continuidad, la ampliación de la base muestral y la incorporación de nuevos datos permitirán aumentar la robustez de la arquitectura, reducir incertidumbres y reforzar su uso operativo, así como contribuir a la definición de mejores patrones de entrada para el modelo OpenDrift.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil, a la REMO, a la Facultad UnB Planaltina (FUP/UnB) y a SkyTruth por el apoyo prestado en el desarrollo de este estudio y por las detecciones de CERULEAN utilizadas.

6. REFERENCIAS

Agência Nacional de Transportes Aquaviários. (2025). *Boletim estatístico aquaviário* (3º trim.).

Carvalho, I. V., Mendonça, L. F. F. de, & Fernandes, E. H. L. (2025). Method for identification and simulation of oil spill dispersion in coastal regions. *Marine Pollution Bulletin, 221*, 118527.

Dagestad, K.-F., Röhrs, J., Breivik, Ø., & Ådlandsvik, B. (2018). OpenDrift v1.0: A generic framework for trajectory modelling. *Geoscientific Model Development, 11*, 1405–1420. https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018

Fingas, M., & Brown, C. E. (2018). A review of oil spill remote sensing. *Sensors, 18*(1), 91. https://doi.org/10.3390/s18010091

HYCOM Consortium. (n.d.). *GOFS3.1: 41-layer HYCOM+NCODA global 1/12° analysis*. https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/analysis

IBAMA. (2024). *Siema – Comunicado de accidente ambiental*.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). *Monitoramento da biodiversidade para conservação dos ambientes marinhos e costeiros*. Brasília, DF: ICMBio, 2024.

Liu, D., Li, Y., & Mu, L. (2023). Parameterization modeling for wind drift factor in oil spill drift trajectory simulation based on machine learning. *Frontiers in Marine Science, 10*, 222347.

National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce. (2015). *NCEP GFS 0.25 degree global forecast grids historical archive* [Dataset]. UCAR/NCAR - Geoscience Data Exchange. https://doi.org/10.5065/D65D8PWK

SkyTruth. (2026). *Cerulean methods*. https://skytruth.org/cerulean-methods/

UNEP-WCMC, & IUCN. (2025). *Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA)*. Protected Planet.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.155

Análisis de la exactitud del nivel del mar obtenido con el satélite SWOT, usando medidas in-situ

Gómez Enri, Jesús [1] **Arribas Rodríguez, Bárbara** [1] **Tejedor Ávarez, Begoña** [1] **Álvarez Esteban, Óscar** [1] **González Mejías, Carlos José** [2] **Vignudelli, Stefano** [3]

[1] Universidad de Cádiz, España

[2] Instituto Hidrográfico de la Marina

[3] Instituto de Biofísica

ORCID: Gómez Enri 0000-0001-6053-5160 Arribas Rodríguez 0009-0006-1672-5745 Tejedor Ávarez 0000-0002-3022-8095 Álvarez Esteban 0000-0001-9141-0029 González Mejías 0000-0001-6834-676X Vignudelli 0000-0002-9038-5914

Correspondencia: jesus.gomez@uca.es barbara.arribasrodriguez@alum.uca.es begonia.tejedor@uca.es oscar.alvarez@uca.es carlosjose.gonzalez@uca.es stefano.vignudelli@ibf.cnr.it

RESUMEN

en este trabajo se ha analizado la exactitud de las series temporales del nivel del mar del altímetro interferométrico en banda Ka (KaRIn) a bordo del satélite franco-estadounidense SWOT. La principal innovación de esta misión con respecto a las misiones altimétricas anteriores es la observación bidimensional de la superficie terrestre. El objetivo de este trabajo fue validar las series temporales del nivel del mar obtenidas con el altímetro KaRIn, con los niveles del mar de un mareógrafo ubicado en Huelva. Para ello, se ha estimado la desviación estándar de las diferencias (SDD) entre los datos del altímetro y del mareógrafo. Esto permite cuantificar la exactitud de las medidas altimétricas. De las opciones disponibles para calcular la anomalía del nivel del mar a partir de SWOT, se ha probado la corrección troposférica húmeda (WTC, por sus siglas en inglés), la superficie media del mar (MSS) y el modelo de marea. Las comparaciones con los mareógrafos revelaron que el modelo ECMWF para el WTC proporcionó un mayor número de datos válidos y el mismo nivel de exactitud que usando la corrección derivada del instrumento Radiómetro Avanzado de Microondas. Además, se ha observado la misma exactitud independientemente de la superficie media marina utilizada (Centre National d'Études Spatiales: CNES y Danmarks Tekniske Universitet: DTU). Finalmente, el modelo de mareas FES (Finite Element Solution) mejoró la exactitud en las estimas del nivel del mar con respecto al modelo DTU. La SDD promedio de SWOT KaRIn en la zona de estudio es de 8,3 cm (traza descendente) y 8,2 cm (traza ascendente). La distribución espacial de la SDD en las proximidades de la ubicación del mareógrafo (considerando un radio de 100 km) es considerablemente uniforme, independientemente del segmento de traza analizado.

Palabras clave: *Altimetría swath, exactitud, anomalía del nivel del mar*

Fecha de recepción: 13 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 13 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis de la exactitud del nivel del mar obtenido con el satélite SWOT, usando medidas in-situ

Gómez Enri, Jesús [(1)], Arribas Rodríguez, Bárbara [(1)], Tejedor Ávarez, Begoña [(1)], Álvarez Esteban, Óscar [(1)], González Mejías, Carlos José [(2)], Vignudelli, Stefano [(3)]

[(1)] Universidad de Cádiz, España.

0000-0001-6053-5160, jesus.gomez@uca.es ; 0009-0006-1672-5745, barbara.arribasrodriguez@alum.uca.es.

0000-0002-3022-8095, begonia.tejedor@uca.es ; 0000-0001-9141-0029, oscar.alvarez@uca.es.

[(2)] Instituto Hidrográfico de la Marina

0000-0001-6834-676X, carlosjose.gonzalez@uca.es.

[(3)] Instituto de Biofísica.

0000-0002-9038-5914, stefano.vignudelli@ibf.cnr.it.

Resumen: en este trabajo se ha analizado la exactitud de las series temporales del nivel del mar del altímetro interferométrico en banda Ka (KaRIn) a bordo del satélite franco-estadounidense SWOT. La principal innovación de esta misión con respecto a las misiones altimétricas anteriores es la observación bidimensional de la superficie terrestre. El objetivo de este trabajo fue validar las series temporales del nivel del mar obtenidas con el altímetro KaRIn, con los niveles del mar de un mareógrafo ubicado en Huelva. Para ello, se ha estimado la desviación estándar de las diferencias (SDD) entre los datos del altímetro y del mareógrafo. Esto permite cuantificar la exactitud de las medidas altimétricas. De las opciones disponibles para calcular la anomalía del nivel del mar a partir de SWOT, se ha probado la corrección troposférica húmeda (WTC, por sus siglas en inglés), la superficie media del mar (MSS) y el modelo de marea. Las comparaciones con los mareógrafos revelaron que el modelo ECMWF para el WTC proporcionó un mayor número de datos válidos y el mismo nivel de exactitud que usando la corrección derivada del instrumento Radiómetro Avanzado de Microondas. Además, se ha observado la misma exactitud independientemente de la superficie media marina utilizada (Centre National d'Études Spatiales: CNES y Danmarks Tekniske Universitet: DTU). Finalmente, el modelo de mareas FES (Finite Element Solution) mejoró la exactitud en las estimas del nivel del mar con respecto al modelo DTU. La SDD promedio de SWOT KaRIn en la zona de estudio es de 8,3 cm (traza descendente) y 8,2 cm (traza ascendente). La distribución espacial de la SDD en las proximidades de la ubicación del mareógrafo (considerando un radio de 100 km) es considerablemente uniforme, independientemente del segmento de traza analizado.

Palabras clave: Altimetría swath, exactitud, nivel del mar.

Accuracy assessment of the sea level from the SWOT satellite using in-situ measurements

***Abstract**: In this work we analyzed the accuracy of time series of sea level from the Ka-band interferometric altimeter (KaRIn) on-board the U.S-French SWOT satellite. The main innovation of this mission respect to previous satellite altimeter missions is its two-dimensional view of the earth surface. The objective of this work was to validate time series of sea level derived from swath KaRIn with the water levels from a tide gauge located at Huelva. To do this, we estimated the standard deviation of the differences (SDD) between the altimeter and the tide gauge data. From the options available to compute the sea level anomaly from SWOT, we tested the wet tropospheric correction (WTC), the mean sea surface (MSS), and the tidal model. The comparisons with the tide gauges revealed that the ECMWF model for the WTC gave a higher number of valid data and the same level of accuracy as the correction derived from the Advanced Microwave Radiometer instrument. The same accuracy was observed regardless of the MSS used (CNES and DTU). Finally, the FES tidal model improved the accuracy with respect to the DTU model. The average SDD of SWOT KaRIn is 8.3 cm (descending track) and 8.2 cm (ascending track). The spatial distribution of the SDD in the vicinity of the location of the tide gauge (considering a radius of 100 km) is quite uniform regardless the track segment analyzed. Our analysis excluded the area affected by the nadir looking altimeter Poseidon-3C on board the*

SWOT satellite.

***Keywords**: Swath altimetry, accuracy, sea level.*

1. INTRODUCCIÓN

El satélite SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*) se lanzó el 16 de diciembre de 2022 (Rodríguez *et al*., 2017; Desai *et al*., 2018). Se trata de una misión conjunta entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y el CNES (Centre National d'Études Spatiales). El satélite transporta un instrumento de radar de apertura sintética (SAR) con interferómetro de franja de doble visión y trayectoria transversal que opera en banda de microondas Ka (KaRIn) y un altímetro convencional de clase Jason-3 de doble frecuencia (bandas Ku/C) de observación nadir (Poseidon-3C). El interferómetro SAR KaRIn es único con respecto a las misiones altimétricas anteriores, ya que proporciona mediciones en una franja de 120 km con dos subfranjas de 50 km desde 10 a 60 km a cada lado de la trayectoria terrestre del nadir, cubierta por el altímetro nadir. Es decir, por primera vez, es posible obtener observaciones en dos dimensiones de variables como el nivel del mar.

El objetivo principal de la misión SWOT es proporcionar con alta precisión y exactitud una visión bidimensional no sólo del nivel del mar, sino también de las aguas superficiales terrestres (Fu *et al*., 2024). Algunos autores han demostrado que las medidas de KaRIn pueden resolver procesos oceánicos de pequeña escala con longitudes de onda de hasta 5 km, mucho más bajas que la resolución de 50 km de misiones altimétricas anteriores, e incluso mejores que la resolución esperada para SWOT (15 km) (Fu *et al*., 2024, Archer *et al*., 2020).

El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados de la validación de las series temporales obtenidas con KaRIn, a bordo del satélite SWOT. Las series se han comparado con las obtenidas por un mareógrafo situado en Huelva, gestionado por Puertos del Estado.

2. ZONA DE ESTUDIO

El trabajo se centra en la sub-cuenca este del golfo de Cádiz (Figura 1). Esta zona ya se ha utilizado previamente para la validación de datos de diversas misiones altimétricas (Gómez-Enri *et al*., 2018; Aldarias *et al*., 2020). Esta sub-cuenca está limitada en su parte oeste por el cabo de Santa María y por la este por el estrecho de Gibraltar. Cuenta con una plataforma continental amplia (~50 km), limitada por la isóbata de 100 m. Como parte del golfo de Cádiz, se trata de un área compleja en la que se mezclan aguas del océano Atlántico y del mar Mediterráneo, así como aguas procedentes de las desembocaduras del río Guadalquivir, sistema Tinto-Odiel y río Guadiana. Se caracteriza por un régimen meso-mareal con un rango de marea que oscila entre 3,5 m (parte noroeste) y 2,5 m (estrecho de Gibraltar). Toda la zona está dominada por el giro anti-ciclónico de la corriente del gofo de Cádiz (GCC por sus singlas en inglés). También hay que destacar la existencia de una contracorriente costera (CCC) que fluye hacia el oeste muy cerca de la costa (15-20 km de la costa), aunque el mecanismo que desencadena esta CCC está aún bajo estudio.

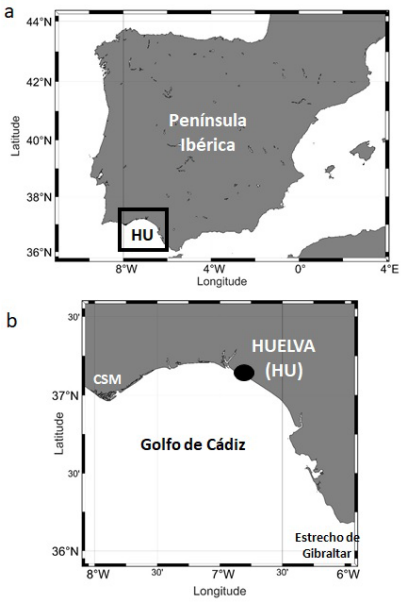


Figura 1. Zona de estudio. a) Ubicación en la península Ibérica. b) Sub-cuenca este del golfo de Cádiz, entre el cabo de San Vicente (CSM) y estrecho de Gibraltar. El punto negro indica la posición del mareógrafo de Huelva.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. SWOT

Los datos SWOT se obtuvieron de la herramienta de alto nivel para la extracción interactiva de datos (HiTIDE) disponible en: https://hitide.podaac.earthdatacloud.nasa.gov/ (doi: 10.5067/SWOT-SSH-2.0). Del conjunto de productos disponibles, se seleccionó el 'Expert', versión C de Nivel 2 de KaRIn Low Rate (LR). La versión D, que posee diversas actualizaciones que prevé mejorar la calidad del dato SWOT aún no está disponible en el periodo objeto de estudio. Los datos abarcaron 1,5 años (28 ciclos con resolución temporal de 21 días) desde el comienzo de la misión científica, es decir, desde julio de 2023 hasta febrero de 2025. El producto está disponible en una cuadrícula regular de 2 km × 2 km. Se utilizaron las dos trazas (*tracks*) más cercanas al área de estudio, una ascendente (#447) y otra descendente (#154).

3.2. Datos in-situ

La validación de los datos altimétricos de SWOT LR-2D se realizó usando un mareógrafo radar con datos disponibles gratuitamente a través de Puertos del Estado (https://www.puertos.es/servicios/oceanografia). Se utilizó el producto de nivel del mar con frecuencia de muestreo de 5 minutos para asegurar las mediciones más cercanas en tiempo a las mediciones SWOT. El

radar Miros cuenta con una precisión de 1 mm, operando a una frecuencia de 2 Hz formando parte del Servicio Permanente del Nivel Medio del Mar y del Sistema Mundial de Observación del Nivel del Mar, por lo que los datos se someten a un estricto control de calidad y mantenimiento (Pérez *et al*., 2013) para garantizar su continuidad y trazabilidad.

3.3. Corrección Atmosférica Dinámica (DAC)

Los datos in-situ no se corrigen por los efectos atmosféricos (corrección DAC). Para comparar los datos del mareógrafo y del altímetro KaRIn, se debe aplicar la denominada Corrección Atmosférica Dinámica (DAC) a ambos instrumentos. Esta corrección está disponible globalmente en una cuadrícula regular de 0,25º × 0,25º con una resolución temporal de 6 horas. El producto, accesible vía FTP, se genera de manera rutinaria por el *Collecte Localisation Satellites* utilizando el modelo Mog2D (Lynch y Gray, 1979) de Legos y distribuido por Aviso+, con el apoyo del CNES en: https://www.aviso.altimetry.fr/. (doi: 10.24400/527896/a01-2022.001).

3.4. Metodología

3.4.1. Series temporales de Anomalía del Nivel del Mar (SLA) de SWOT

Se estimó la Anomalía del Nivel del Mar (SLA por sus siglas en inglés) en cada una de las celdas con datos disponibles de SWOT, siguiendo (Eq. 1).

$$SLA_SWOT = ssha_karin + height_cor_xover \quad (1)$$

donde *ssha_karin* es la SLA obtenida con el producto utilizado al que se le han aplicado todas las correcciones necesarias, *height_cor_xover* es una corrección a la altura a partir de la calibración cruzada entre los datos KaRIn/KaRIn y las mediciones KaRIn/Poseidon-3C en diferentes pasadas y considerando una ventana temporal que rodea la medición de la altura de la superficie del mar. A modo de ejemplo, se muestra la SLA antes (Figura 2.a) y después (Figura 2.b) aplicando la corrección height_cor_xover. Se seleccionó el ciclo 1 (26/07/2023) de la traza descendente #154. El efecto de esta corrección sobre la SLA se aprecia claramente, ya que la Figura 2.b muestra una imagen más realista de la variabilidad espacial del nivel del mar en la zona.

3.4.2. Series temporales de Anomalía del Nivel del Mar (SLA) de los datos in-situ

La SLA se estimó siguiendo (Eq. 2).

$$SLA_MAR = NM - predicción\ marea - DAC \quad (2)$$

donde *NM* es el nivel del mar medido por el mareógrafo, *predicción marea* elimina las mareas usando un análisis armónico estándar y *DAC* se obtiene interpolando en tiempo y espacio a partir de los mapas de 6 horas de DAC.

3.4.3. Exactitud de los datos SWOT

La exactitud de la SLA procedente de SWOT se estimó utilizando la desviación estándar de las diferencias (SDD). Debido a que ambos conjuntos de datos no están referenciados al mismo cero, antes de estimar la SDD, se restó la media temporal correspondiente a cada una de las series temporales (SLA_SWOT, y SLA_MAR). La SDD indica cuánto varía la observación (la diferencia entre el altímetro y el TG) con respecto a su media. El cálculo de la SDD se realizó en cada celda de la malla de posiciones con datos de SWOT. Sólo se tuvieron en cuenta aquéllas posiciones que estuviesen a una distancia de 100 km de la ubicación del mareógrafo.

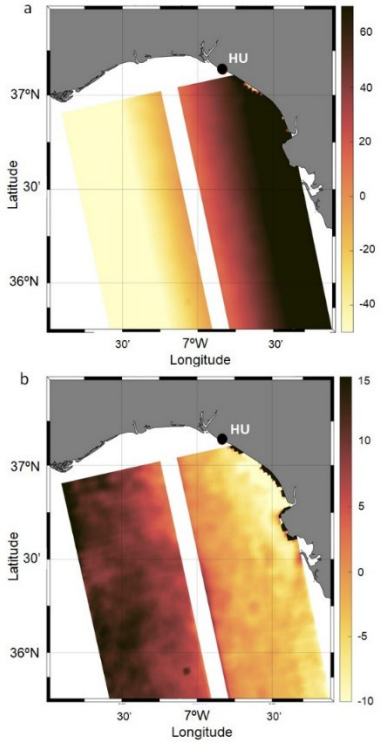


Figura 2. SLA según la trayectoria descendente #154 para el ciclo 1 (26/07/2023) antes (a) y después (b) de aplicar la corrección height_cor_xover. El punto negro muestra la posición del mareógrafo (HU).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En un primer análisis (resultados no mostrados en este trabajo), se determinó qué conjunto de correcciones eran las más adecuadas para estimar SLA_SWOT. Basándonos en la comparación con los datos in-situ, el mejor conjunto de correcciones es: ECMWF_WTC (que usa la corrección troposférica húmeda del modelo del ECMWF), MSS_CNES (correspondiente a la superficie media marina del CNES) y tidal_FES (modelo de marea FES2014b).

La Figura 3 muestra la variabilidad espacial de SDD_SWOT para las trazas seleccionadas: #154 y #447 (Figuras 3.a y 3.b, respectivamente). Se muestra la variabilidad espacial del SDD_SWOT para todos los puntos de cuadrícula válidos considerando una distancia máxima de 100 km al mareógrafo. Se observa una precisión que oscila entre 5 y 12 cm en ambas trazas, con una moderada variabilidad espacial. La Figura 3 muestra también la ubicación de las trazas más cercanas al mareógrafo del satélite Sentinel-3A. La exactitud (SDD) de los datos de SLA de esta misión ha sido analizada en un estudio previo (Aldarias *et al*., 2020). En un trabajo que se encuentra en su segunda revisión, los autores han comparado la SDD de ambas misiones

durante el periodo de tiempo con datos de SWOT. Los resultados indican que SWOT muestra valores de SDD ligeramente más altos a los estimados con Sentinel-3A, lo cual estaría indicando una ligera mejor calidad de este último en nuestra zona de estudio. Aún existen pocos trabajos enfocados en la validación de SWOT. En un trabajo reciente, Zhu *et al*. (2025) encontraron errores cuadráticos medios (estadístico equiparable al SDD) similares a los obtenidos en nuestra zona de estudio.

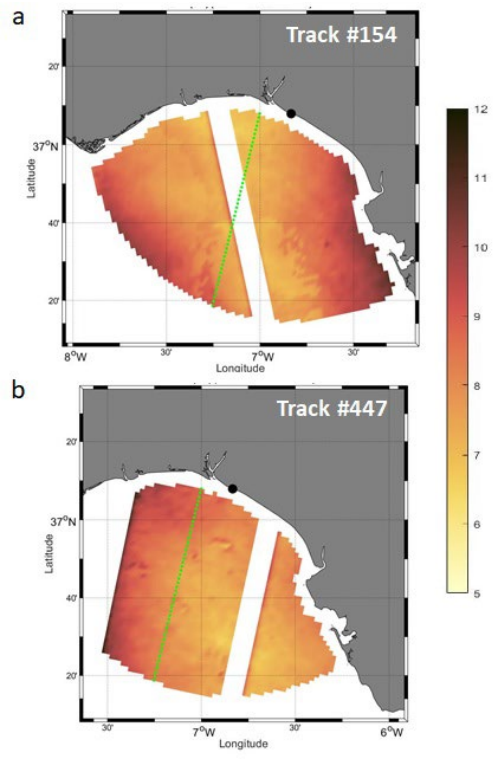


Figura 3. *Distribución espacial del SDD de SLA_SWOT para la traza #154 (a) y #447 (b)* en cada una de las celdas que componen la malla de datos. El hueco en blanco indica la zona de influencia de las medidas nadir del radar altimétrico Poseidon-3C a bordo de SWOT.

5. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, se deducen las siguientes conclusiones.

La exactitud de SWOT KaRIn es considerablemente uniforme a lo largo del área utilizada en este estudio, con independencia de la traza utilizada. Esto demuestra que no existen diferencias entre trazas ascendentes y descendentes. El valor promedio de la SDD es 8,3 cm (#154) y 8,2 cm (#447). No obstante, el periodo de tiempo utilizado (1,5 años: 28 ciclos), no es lo suficientemente extenso como para asegurar la robustez de los resultados obtenidos. Además, en un futuro estudio se utilizarán los datos SWOT en su versión D, que prevé una mejora significativa en la calidad y consistencia de las mediciones de KaRIn (refinamiento de calibración y algoritmos, actualización de modelos geofísicos, etc.), respecto de la versión C usada en este trabajo.

6. AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó utilizando datos de nivel del mar de PO.DAAC (Jet Propulsion Laboratory) SWOT KaRIn (doi: 10.5067/SWOT-SSH-2.0). Los autores también agradecen a Puertos del Estado por proporcionar datos de nivel del mar in-situ. La corrección atmosférica dinámica fue proporcionada por Aviso (doi: 10.24400/527896/a01-2022.001).

7. REFERENCIAS

Aldarias, A., Gómez-Enri, J., Laiz, I., Tejedor, B., Vignudelli, S,. & Cipollini, P. Validation of Sentinel-3A SRAL Coastal Sea Level Data at High Posting Rate: 80 Hz. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1–13, 2020, https://doi.org/10.1109/tgrs.2019.2957649.

Archer, M. R., Li, Z., & Fu, L. L. Increasing the space–time resolution of mapped sea surface height from altimetry. *Journal of Geophysical Research-Oceans, 124*, e2019JC015878, 2020, https://doi.org/10.1029/2019JC015878.

Desai, S., Fu, L. L., Cherchali, S., & Vaze, P. Surface Water and Ocean Topography Mission (SWOT) Project science requirements document. Technical Report JPL D-61923., Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, Pasadena, 2018.

Fu, L. L., Pavelsky, T., Cretaux, J. F., Morrow, R., Farrar, J. T., Vaze, P., et al., The Surface Water and Ocean Topography Mission: A breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water," Geophysycal *Research Letters, 51*, e2023GL107652, 2024, https://doi.org/10.1029/2023GL107652.

Gómez-Enri, J., Vignudelli, S., Cipollini, P., Coca, J. & González, C. J. Validation of CryoSat-2 SIRAL sea level data in the eastern continental shelf of the Gulf of Cadiz (Spain). *Advances in Space Research*, 2018, https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.042.

Lynch, D. R. & Gray, W. G. A wave equation model for finite element tidal computations. *Computers and Fluids, 7* (3), 207-228, 1979, https://doi.org/10.1016/0045-7930(79)90037-9.

Pérez, B., Álvarez, F. E., Pérez, S., de Alfonso, M., & Vela, J. Use of tide gauge data in operational oceanography and sea level hazard warning systems". *Journal of Operational Oceanography, 6*, (2), 1–18, 2013, https://doi.org/10.1080/1755876X.2013.11020147.

Rodriguez, E., Esteban Fernandez, D., Peral, E., Chen, C. W., De Bleser, J. W., & Williams, B. Wide-swath altimetry," In Satellite altimetry over oceans and land surfaces, 1st ed. D. Stammer and A. Cazenave (Eds.), Taylor & Francis, CRC Press, 2017, pp. 71–112. https://doi.org/10.1201/9781315151779-2.

Zhu H, Peng F, & Shen Y. Validation of Sea Level Anomalies from the SWOT Altimetry Mission Around the Coastal Regions of East Asia and the US West Coast. *Water. 2025 17*(21): 3066. https://doi.org/10.3390/w17213066.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.156

Evaluación de la corriente geostrófica derivada del satélite SWOT mediante radar de alta frecuencia

Arribas Rodríguez, Bárbara [1] **Muleo Martínez, Roberto** [2] **Gómez Enri, Jesús** [1]

[1] Universidad de Cádiz, España

[2] Servicios para energías renovables OWC

ORCID: Arribas Rodríguez 0009-0006-1672-5745 Muleo Martínez 0000-0002-1736-907X Gómez Enri 0000-0001-6053-5160

Correspondencia: barbara.arribasrodriguez@alum.uca.es roberto.mulero@uca.es jesus.gomez@uca.es

RESUMEN

El satélite *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), lanzado en diciembre de 2022, tiene como objetivo mejorar la comprensión de la dinámica oceánica mediante altimetría de alta resolución. En este estudio se validan las corrientes geostróficas derivadas de la anomalía del nivel del mar proporcionada por SWOT utilizando datos horarios de radares de alta frecuencia (HF) de la red de Puertos del Estado. El análisis se realiza para tres pases orbitales de SWOT sobre la subcuenca occidental del golfo de Cádiz, asociados a distintos regímenes atmosféricos característicos de la región: Levante, Poniente y calma. Los datos altimétricos se filtran mediante un método Loess para reducir el ruido, mientras que los datos de radar HF se procesan mediante un promedio horario. Asumiendo que en mar abierto la circulación superficial es mayoritariamente geostrófica, se comparan ambas corrientes sobre mallas espaciales coincidentes, evaluando su concordancia mediante el error cuadrático medio (RMSE). Los resultados muestran el mejor ajuste durante el evento de calma (RMSEmódulo = 4,5 cm/s), y valores mayores en Levante (RMSEmódulo = 10,1 cm/s) y Poniente (RMSEmódulo = 10,9 cm/s). A pesar del limitado número de validaciones disponibles, los resultados son coherentes con estudios previos en la región, lo que confirma la capacidad de SWOT para proporcionar datos de alta calidad y su potencial para el estudio de la circulación oceánica superficial. No obstante, se requiere más investigación para comprender la exactitud de las medidas de SWOT a frente a distintas forzantes atmosféricas y extender su validación a otras regiones y condiciones oceanográficas.

Palabras clave: *SWOT, validación, anomalía del nivel del mar, golfo de Cádiz*

Fecha de recepción: 13 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 13 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación de la corriente geostrófica derivada del satélite SWOT mediante radar de alta frecuencia

Arribas Rodríguez, Bárbara [1], Muleo Martínez, Roberto [2], Gómez Enri, Jesús [1]

[1] Universidad de Cádiz, España.

0009-0006-1672-5745, barbara.arribasrodriguez@alum.uca.es ; 0000-0001-6053-5160, jesus.gomez@uca.es.

[2] Servicios para energías renovables OWC.

0000-0002-1736-907X, roberto.mulero@uca.es.

Resumen: El satélite *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), lanzado en diciembre de 2022, tiene como objetivo mejorar la comprensión de la dinámica oceánica mediante altimetría de alta resolución. En este estudio se validan las corrientes geostróficas derivadas de la anomalía del nivel del mar proporcionada por SWOT utilizando datos horarios de radares de alta frecuencia (HF) de la red de Puertos del Estado. El análisis se realiza para tres pases orbitales de SWOT sobre la subcuenca occidental del golfo de Cádiz, asociados a distintos regímenes atmosféricos característicos de la región: Levante, Poniente y calma. Los datos altimétricos se filtran mediante un método Loess para reducir el ruido, mientras que los datos de radar HF se procesan mediante un promedio horario. Asumiendo que en mar abierto la circulación superficial es mayoritariamente geostrófica, se comparan ambas corrientes sobre mallas espaciales coincidentes, evaluando su concordancia mediante el error cuadrático medio (RMSE). Los resultados muestran el mejor ajuste durante el evento de calma (RMSEmódulo = 4,5 cm/s), y valores mayores en Levante (RMSEmódulo = 10,1 cm/s) y Poniente (RMSEmódulo = 10,9 cm/s). A pesar del limitado número de validaciones disponibles, los resultados son coherentes con estudios previos en la región, lo que confirma la capacidad de SWOT para proporcionar datos de alta calidad y su potencial para el estudio de la circulación oceánica superficial. No obstante, se requiere más investigación para comprender la exactitud de las medidas de SWOT a frente a distintas forzantes atmosféricas y extender su validación a otras regiones y condiciones oceanográficas.

Palabras clave: SWOT, validación, anomalía del nivel del mar, golfo de Cádiz.

Evaluation of the SWOT satellite using derived geostrophic currents

***Abstract**: The Surface Water and Ocean Topography (SWOT) satellite, launched in December 2022, aims to improve the understanding of ocean dynamics through high-resolution altimetric measurements. This study validates geostrophic surface currents derived from sea surface height anomalies provided by SWOT using hourly high-frequency (HF) radar observations from the Puertos del Estado network. Three SWOT orbital passes over the western sub-basin of the Gulf of Cádiz are analysed, each corresponding to a characteristic atmospheric regime of the region: Levante, Poniente, and calm conditions. Altimetric data are filtered using a Loess method to reduce noise, while HF radar data are processed using hourly averages. Assuming that open-ocean surface circulation is predominantly geostrophic, SWOT-derived geostrophic currents are compared with total surface currents measured by HF radar. The comparison is performed on coincident spatial grids using a nearest-neighbour approach based on Euclidean distance, and accuracy is assessed through the root mean square error (RMSE). The best agreement is obtained under calm conditions (RMSEmodule = 4.5 cm/s), while higher errors are observed during Levante (RMSEmodule =10.1 cm/s) and Poniente (RMSEmodule = 10.9 cm/s) events. Despite the limited number of existing SWOT validation studies, the results are consistent with previous validations conducted in the region using other observational platforms, supporting the robustness of the methodology and confirming SWOT's capability to provide high-quality surface current estimates. These findings highlight the potential of SWOT for studying ocean surface circulation, while emphasizing the need for further validation across diverse oceanic regions and environmental conditions. However, further research is needed to understand the accuracy of SWOT measurements under different atmospheric forcings and to extend their validation to other regions and oceanographic conditions.*

***Keywords**: SWOT, validation, sea surface height anomaly, gulf of Cadiz.*

1. INTRODUCCIÓN

La teledetección se ha consolidado como una herramienta esencial para el estudio del medio marino, proporcionando observaciones sistemáticas con amplia cobertura espacial y temporal difícilmente alcanzable de forma *in situ*. Entre sus aplicaciones destaca la altimetría satelital, que permite medir la altura de la superficie del océano y variabilidad del nivel del mar. Sin embargo, la altimetría tradicional presenta limitaciones en áreas costeras, donde la circulación incluye procesos locales y ageostróficos, lo que dificulta la interpretación de los datos. El golfo de Cádiz (GDC) es un ejemplo de región costera compleja, condicionada por el intercambio entre aguas atlánticas y mediterráneas, el giro subtropical del Atlántico Norte y el sistema de afloramiento portugués (Laiz *et al*., 2019).

En este contexto, la misión *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), lanzada en diciembre de 2022, supone un avance significativo. Su radar interferométrico KaRIn proporciona las primeras observaciones bidimensionales de alta resolución de la superficie oceánica. Aunque los estudios aún son limitados, los primeros resultados muestran que SWOT permite analizar procesos de circulación oceánica desde grandes escalas hasta aproximadamente 5 km, ampliando considerablemente el potencial de la altimetría satelital para comprender la dinámica costera y oceánica (Esselborn *et al*., 2025; Fu *et al*., 2024).

El objetivo principal de este estudio es validar la corriente geostrófica obtenida a partir de los datos del instrumento KaRIn a bordo del satélite SWOT, determinando previamente un procesamiento óptimo de los datos.

2. ZONA DE ESTUDIO

El GDC es una subcuenca del Atlántico Norte que conecta con el Mar Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar (EDG). Su circulación superficial está dominada por la corriente del GDC (GCC), alimentada por la corriente de las Azores y la corriente de Portugal, mientras que próxima a costa circula la corriente contracostera (CCC) asociada a la salida superficial del Mediterráneo. Este conjunto genera un patrón anticiclónico predominante en verano, alternando con una circulación ciclónica menos definida en invierno, y favorece la formación de lentes de agua mediterránea (meddies) cerca del Cabo de San Vicente (Criado-Aldeanueva *et al*., 2009; Peliz *et al*., 2009).

El presente estudio se centra en la zona occidental del GDC (Figura 1), entre el Cabo de San Vicente (CSV) y Santa María (CSM), limitada al sur por la latitud 36°N, que coincide con la órbita 460 del satélite SWOT y con la cobertura de los radares de alta frecuencia de la región.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. SWOT

Los datos satelitales empleados provienen de la misión *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), desarrollada por *NASA* y *CNES*, operativa desde diciembre de 2022 con un ciclo orbital de 21 días. Se utilizó el producto *SWOT_L2_LR_SSH* (*Level 2 KaRIn Low Rate Sea Surface Height*), que proporciona la altura de la superficie del mar obtenida mediante el interferómetro KaRIn, cubriendo 120 km con dos subfranjas de 50 km desde 10 a 60 km a cada lado de la trayectoria terrestre del nadir a lo largo de la órbita del satélite, con una malla de 2 km × 2 km.

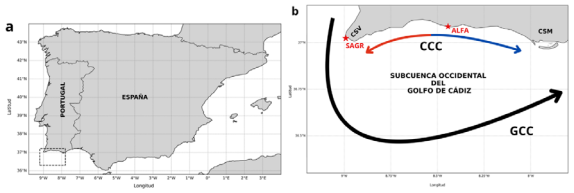


Figura 1. Zona de estudio. (a) Ubicación en la península Ibérica. (b) Subcuenca occidental del golfo de Cádiz, corrientes principales y puntos de referencia (CCC: Corriente Contracostera; GCC: Corriente del Golfo de Cádiz; CSV: Cabo de San Vicente; CSM: Cabo de Santa María; SAGR: Radar HF de Sagres; ALFA: Radar de HF de Alfanzina).

Los datos L2 están georreferenciados y corregidos de errores instrumentales y atmosféricos. Se empleó el conjunto Expert, que incluye información detallada del instrumento, correcciones ambientales y datos derivados del radiómetro y modelos geofísicos. Los archivos se descargaron en formato NetCDF-4 desde la plataforma HiTIDE: https://hitide.podaac.earthdatacloud.nasa.gov/.

3.2. Datos radar de alta frecuencia

Los datos empleados para la validación corresponden a las mediciones de velocidad superficial de la corriente recogidas por la red de radares de alta frecuencia (HF) de Puertos del Estado, concretamente del sistema operativo en el GDC, compuesto por las antenas de Sagres y Faro Alfanzina. Estos radares operan a una frecuencia de 13,5 MHz y proporcionan datos horarios de corriente superficial con una resolución espacial de 1,5 km. Dichos datos han sido descargados en formato NetCDF desde su catálogo OpenDAP: https://opendap.puertos.es/thredds/catalog/radar_local_huelva/catalog.html.

La fiabilidad de los datos de radares HF está respaldada por numerosos estudios que los comparan con mediciones independientes en distintas condiciones oceánicas (Cosoli y Bolzon, 2015; Lorente *et al*., 2015).

3.3. Viento

La zona de estudio está influenciada por regímenes de viento zonales que modifican las condiciones oceanográficas. Se consideran condiciones de Levante o Poniente cuando el módulo de la velocidad del viento supera los 5 m/s (Ortega *et al*., 2022) durante al menos 6 horas (Ezzat *et al*., 2018), entendiéndose los valores intermedios como eventos de calma. Los datos provienen del servicio *Copernicus Marine Data Service*, del producto de reanálisis *Global Ocean Hourly Reprocessed Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model"*; con resolución de 0,125° × 0,125° y frecuencia horaria, obtenido a 10 m sobre la superficie del mar.

3.4. Procesamiento

Promedio temporal de los datos radar HF Para cada evento (Levante, Poniente y calma) se tomaron 72 horas de datos (hora posterior al paso de SWOT + 71 horas anteriores), calculando la media temporal de estos en cada punto de la malla del radar HF. Solo se incluyeron puntos con cobertura superior al 60%.

Con el objetivo de determinar si el promedio de 72 horas es adecuado en la zona de estudio, se prueba la validación del radar tanto para un único momento, más próximo a la pasada del satélite, como aplicando esta metodología para las últimas 6, 12, 24, 48 y 72 horas anteriores al paso del satélite.

3.4.1. Correcciones de los datos SWOT

Se aplicó la corrección troposférica húmeda y la corrección *height_cor_xover (Chen et al., 2025)*. Posteriormente, se analizó el indicador *quality_flag*, seleccionando solo los valores clasificados como "bueno" y se eliminaron los valores no *NaN* al borde de la malla, así como de la franja nadir. Además, se suavizó la señal mediante un filtro Loess bidimensional, técnica de suavizado no paramétrica que funciona ajustando regresiones locales a subconjuntos de datos por el método de vecindarios. Se prueba un rango de suavizado definido por los puntos de [2 a 62] km (Mulero *et al*., 2024).

3.4.2. Cálculo de la corriente geostrófica

A partir de la SLA corregida se calculó la topografía dinámica absoluta (ADT) (1) y su gradiente, obteniendo las componentes zonal y meridional de la corriente geostrófica mediante la ecuación geostrófica (2).

$$\boldsymbol{ADT = SSHA + MDT} \qquad (1)$$

$$\overrightarrow{\boldsymbol{Vg}} = \boldsymbol{-gf\nabla h} \qquad (2)$$

Siendo ∇h es el gradiente de la topografía dinámica obtenido del ADT.

Para asegurar la consistencia de los resultados se filtraron valores fuera del rango [-10, 10] m/s y que se desviaran de la media por más de tres veces la desviación estándar (std) (Lehmann, 2013).

3.4.3. Comparación con radar HF

En mar abierto, la circulación superficial se encuentra dominada principalmente por los procesos geostróficos (Stewart, 2007), lo que justifica suponer iguales la corriente geostrófica (medida por el KaRIn) y la corriente total (medida por el radar HF).

Para comparar los datos del radar de alta frecuencia con los del satélite SWOT, ambos se interpolaron a la misma resolución asignando a cada punto de SWOT los valores de velocidad zonal y meridional del punto de radar más cercano, calculado mediante distancia euclídea.

Ambos conjuntos de datos (SWOT y radar) se enmascararon para conservar únicamente los puntos válidos en ambas fuentes (Figura 2).

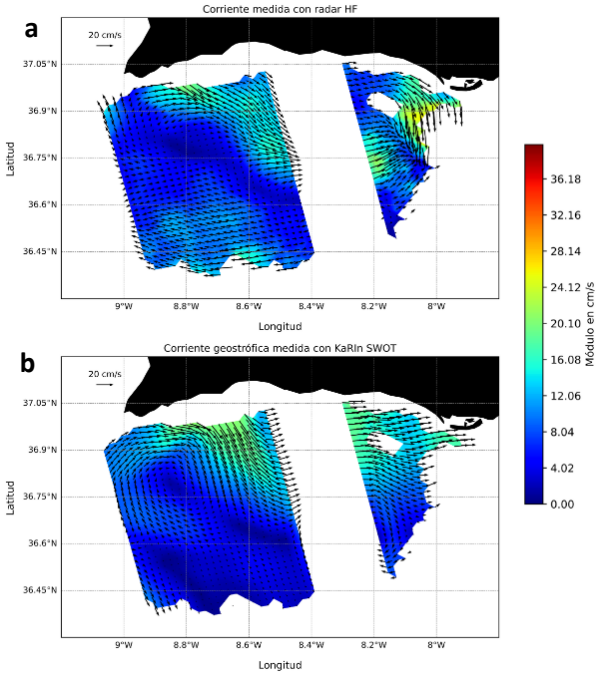


Figura 2. Corriente medida por (a) el radar (promedio de 72 h) y (b) el satélite (550 puntos suavizados con Loess) sobre la zona de estudio, correspondiente al evento de calma del 30/12/2023.

Se estudia el RMSE por componentes, zonal y meridional, para todos los casos, buscando la mayor exactitud combinando ambos filtros aplicados en el estudio: promedio temporal para el radar de alta frecuencia y Loess para el SWOT.

3.4.4. Determinación de fenómenos de viento

El régimen de viento se caracterizó mediante la componente zonal, seleccionando tres fechas representativas coincidentes con los pasos de SWOT: el 30/12/2023 (media zonal de -1,00 m/s), el 10/02/2024 (5,48 m/s) y el 13/04/2024 (-7,26 m/s).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Procesamiento de datos SWOT y radar HF

Los resultados indican en cuanto al filtro Loess un suavizado en los datos, evidenciado por la reducción de las anomalías en el conjunto (Figura 3).

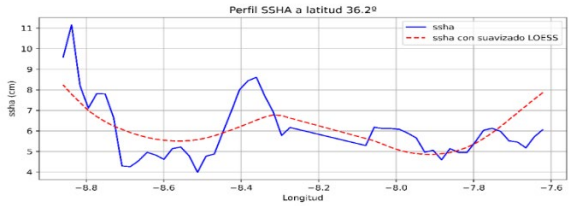


Figura 3. Efecto del filtro Loess sobre una franja longitudinal para 550 puntos en el evento de calma (30/12/2023).

Respecto a los datos del radar de alta frecuencia, se observó que el promediado horario aumenta la cobertura y atenúa procesos de alta frecuencia.

4.2. Validación

Para los eventos de calma, Poniente y Levante, la aplicación del filtro Loess con máxima cobertura (550 puntos) produjo los valores más bajos de RMSE para las componentes zonal y meridional de la corriente. En el evento de calma, los mejores resultados del radar HF se obtuvieron considerando pocas horas de promediado mientras que en Poniente fue más efectivo usar únicamente la hora más cercana a la pasada del satélite. En el evento de Levante, en cambio, se logró un RMSE mínimo aplicando promediados de 6 horas (zonal) y 48 horas (meridional) (Tabla 1).

Los valores de RMSE obtenidos se encuentran en línea con estudios previos de referencia en el GDC bajo condiciones de viento similares (Mulero *et al*., 2024).

Tabla 1. Valores de RMSE para las componentes zonal, meridional y módulo de la velocidad de corriente obtenidos para los parámetros considerados e indicados en cada caso, bajo un promediado Loess de 550 puntos para los datos SWOT.

Evento	RMSE v (cm/s)	RMSE u (cm/s)	RMSE Vg (cm/s)	Nº horas promediadas (datos HF)
Calma	5,3	6,1	4,5	12
Poniente	15,6	15,3	10,9	1
Levante	9,9	9,1	10,1	48

5. CONCLUSIONES

El análisis del tratamiento y validación de los datos del instrumento KaRIn a bordo del satélite SWOT pone de manifiesto varios hallazgos relevantes.

En primer lugar, el filtrado Loess aplicado a los datos de KaRIn mejora la calidad de las medidas al aumentar el radio de influencia, reduciendo el ruido sin comprometer la representación de la dinámica oceánica.

Por su parte, el promediado temporal de los datos del radar de alta frecuencia incrementa la cobertura espacial, aunque su usa eleva el RMSE, por lo que debe evaluarse con cautela.

La comparación entre los datos de SWOT y los del radar de alta frecuencia arroja valores de RMSE bajos y coherentes con estudios previos, aunque se observa menor concordancia bajo condiciones dinámicas. No obstante, el análisis se limita a un único pase de SWOT por evento (tres en total), lo que hace que los resultados sean ilustrativos, pero estadísticamente limitados. Aun así, evidencian el potencial de SWOT como un avance significativo en la observación altimétrica y subrayan la necesidad de continuar desarrollando metodologías específicas de procesamiento y validación, así como de ampliar el número de casos de estudio para consolidar el uso operativo de estos productos en futuras investigaciones oceanográficas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a PO.DAAC (Jet Propulsion Laboratory) por proporcionar los datos del satélite SWOT, a Puertos del Estado por el suministro de los datos del radar de alta frecuencia (HF) y a Copernicus Marine Service por facilitar los datos de viento superficial.

7. REFERENCIAS

Chen, A., Dubois, P., Chen, C., Bohé, A., Algermissen, S., & Germineaud, C. (2025). SWOT Product Description. Level 2 KaRIn Low Rate Sea Surface Height Product (L2_LR_SSH) (Revision C). Jet Propulsion Laboratory. D-56407.

Criado-Aldeanueva, F., García-Lafuente, J., Navarro, G., y Ruiz, J. (2009). Seasonal and interannual variability of the surface circulation in the eastern Gulf of Cadiz (SW Iberia). *Journal of Geophysical Research: Oceans, 114*(C1). https://doi.org/10.1029/2008JC005069

Esselborn, S., Schöne, T., Dobslaw, H., y Sulzbach, R. (2025). The 2023 Major Baltic Inflow Event Observed by Surface Water and Ocean Topography (SWOT) and Nadir Altimetry. *Remote Sensing, 17*(7), Article 7. https://doi.org/10.3390/rs17071289

Ezzat, A.A., Jun, M., y Ding, Y. (2018). Spatio-temporal asymmetry of local wind fields and its impact on short-term wind forecasting. *IEEE Transactions on Sustainable Energy, 9*, 1437–1447.

Fu, L., Pavelsky, T., Cretaux, J., Morrow, R., Farrar, J., Vaze, P., Sengenes, P., Vinogradova-Shiffer, N., Sylvestre-Baron, A., Picot, N., y Gerald, D. (2024). The SWOT Mission: A Breakthrough in Radar Remote Sensing of the Ocean and Land Surface Water. Geophysical Research *Letters, 51*. https://doi.org/10.1029/2023GL107652

Laiz, I., Plecha, S., Teles-Machado, A., González-Ortegón, E., Sánchez-Quiles, D., Cobelo-García, A., Roque, D., Peliz, A., Sánchez-Leal, R. F., y Tovar-Sánchez, A. (2019). The role of the Gulf of Cadiz circulation in the redistribution of trace metals between the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134964

Lehmann, R. (2013). 3sigma-Rule for Outlier Detection from the Viewpoint of Geodetic Adjustment. *Journal of Surveying Engineering, 139*, 157–165. https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000112

Mulero Martínez, R. (2024). Coastal surface circulation of the Gulf of Cadiz from satellite altimetry measurements [Doctoral thesis]. https://rodin.uca.es/handle/10498/33790

Ortega, M., Sanchez, E., Gutiérrez, C., Molina, M. O., y López de la Franca Arema, N. (2022). Regional winds over the Iberian Peninsula (Cierzo, Levante and Poniente) from high-resolution COSMO-REA6 reanalysis. *International Journal of Climatology, 43*. https://doi.org/10.1002/joc.7860

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.161

Aplicación de código abierto para el seguimiento de arribazones de Rugulopteryx okamurae acumulados en playas mediante Sentinel-2

Haro, Sara [1] **Caballero, Isabel** [1] **Navarro, Gabriel** [1]

[1] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, España

ORCID: Haro 0000-0002-0026-102X Caballero 0000-0001-7485-0989 Navarro 0000-0002-8919-0060

Correspondencia: sara.haro@csic.es isabel.caballero@csic.es gabriel.navarro@csic.es

RESUMEN

El desarrollo de herramientas que acerquen la teledetección a sus potenciales usuarios constituye un reto clave para mejorar la monitorización ambiental. En este trabajo se presenta una aplicación de código abierto desarrollada en Python que integra la API de Google Earth Engine para la monitorización sistemática de biomasa fotosintética intermareal mediante imágenes Sentinel-2 desde 2017 hasta la actualidad. Los parámetros de entrada se han adaptado al seguimiento de arribazones del alga parda invasora Rugulopteryx okamurae, con el objetivo de analizar sus patrones espaciales y temporales de acumulación en playas. Desde 2015, R. okamurae se ha expandido rápidamente por el suroeste de Europa y el noroeste de África, generando importantes impactos ecológicos y socioeconómicos asociados a la acumulación masiva de biomasa en zonas costeras. El sistema automatiza la selección de imágenes libres de nubes según umbrales definidos por el usuario e incorpora la detección de condiciones de marea baja mediante el Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI). Para la monitorización de la biomasa fotosintética durante la marea baja se emplea el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), aplicando un umbral de NDVI > 0,08 para identificar píxeles con presencia de algas pardas dentro de un área de interés (AOI) previamente definida, donde se observan de forma recurrente arribazones dominados por R. okamurae. La herramienta genera visualizaciones RGB con superposición de NDVI, mapas de ocurrencia y análisis de series temporales que incluyen cobertura (ha), promedio y mediana de NDVI para el AOI. Las salidas se exportan en formatos georreferenciados (GeoTIFF) y tablas estadísticas (.xlsx). Su aplicación en la playa de Los Lances (Tarifa, Cádiz) durante 2021 demuestra su capacidad para monitorizar y analizar la acumulación de arribazones de algas pardas en esta zona de estudio, ofreciendo una herramienta accesible y transferible para investigadores y gestores costeros.

Palabras clave: *Python, Google Earth Engine API, Sentinel-2, alga parda invasora, seguimiento costero*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Aplicación de código abierto basada en Sentinel-2 para el seguimiento de biomasa fotosintética intermareal: Arribazones del alga parda invasora *Rugulopteryx okamurae*

Haro, Sara [(1)], Caballero , Isabel [(1)], Navarro, Gabriel [(1)]

[(1)] Depto. de Ecología y Gestión Costera, Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Cádiz, España

0000-0002-0026-102X, sara.haro@csic.es ; 0000-0001-7485-0989, isabel.caballero@csic.es

0000-0002-8919-0060, gabriel.navarro@csic.es

Resumen: El desarrollo de herramientas que acerquen la teledetección a sus potenciales usuarios constituye un reto clave para mejorar la monitorización ambiental. En este trabajo se presenta una aplicación de código abierto desarrollada en Python que integra la API de *Google Earth Engine* para la monitorización sistemática de biomasa fotosintética intermareal mediante imágenes Sentinel-2 desde 2017 hasta la actualidad. Los parámetros de entrada se han adaptado al seguimiento de arribazones del alga parda invasora *Rugulopteryx okamurae*, con el objetivo de analizar sus patrones espaciales y temporales de acumulación en playas. Desde 2015, *R. okamurae* se ha expandido rápidamente por el suroeste de Europa y el noroeste de África, generando importantes impactos ecológicos y socioeconómicos asociados a la acumulación masiva de biomasa en zonas costeras. El sistema automatiza la selección de imágenes libres de nubes según umbrales definidos por el usuario e incorpora la detección de condiciones de marea baja mediante el Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI). Para la monitorización de la biomasa fotosintética durante la marea baja se emplea el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), aplicando un umbral de NDVI > 0,08 para identificar píxeles con presencia de algas pardas dentro de un área de interés (AOI) previamente definida, donde se observan de forma recurrente arribazones dominados por *R. okamurae.* La herramienta genera visualizaciones RGB con superposición de NDVI, mapas de ocurrencia y análisis de series temporales que incluyen cobertura (ha), promedio y mediana de NDVI para el AOI. Las salidas se exportan en formatos georreferenciados (GeoTIFF) y tablas estadísticas (.xlsx). Su aplicación en la playa de Los Lances (Tarifa, Cádiz) durante 2021 demuestra su capacidad para monitorizar y analizar la acumulación de arribazones de algas pardas en esta zona de estudio, ofreciendo una herramienta accesible y transferible para investigadores y gestores costeros.

Palabras clave: *Python*, *Google Earth Engine* API, Sentinel-2, alga parda invasora, seguimiento costero

An open-source application based on Sentinel-2 for monitoring intertidal photosynthetic biomass: Strandings of the invasive brown seaweed Rugulopteryx okamurae

***Abstract**: Developing tools that make remote sensing more accessible to potential users is a key challenge for improving environmental monitoring. This work presents an open-source application developed in Python that integrates the Google Earth Engine API for the systematic monitoring of intertidal photosynthetic biomass using Sentinel-2 imagery from 2017 to the present. Input parameters were adapted to monitor strandings of the invasive brown seaweed Rugulopteryx okamurae, with the aim of analysing its spatial and temporal accumulation patterns on beaches. Since 2015, R. okamurae has spread rapidly across southwestern Europe and northwestern Africa, causing significant ecological and socioeconomic impacts associated with the massive accumulation of biomass in coastal areas. The system automates the selection of cloud-free images based on user-defined thresholds and incorporates low-tide condition detection using the Normalized Difference Water Index (NDWI). For monitoring intertidal photosynthetic biomass during low tide, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is applied, using a threshold of NDVI > 0.08 to identify pixels with brown seaweed presence within a predefined area of interest (AOI), where strandings dominated by R. okamurae are recurrent. The application generates RGB visualizations with NDVI overlay, occurrence maps, and time-series analyses including coverage (ha), mean, and median NDVI for the AOI. Outputs are exported as georeferenced files (GeoTIFF)*

and statistical tables (xlsx). Its application at Los Lances Beach (Tarifa, Cádiz) during 2021 demonstrates its capability to monitor and analyse stranded brown seaweed biomass, providing an accessible and transferable tool for researchers and coastal managers.

***Keywords**: Python, Google Earth Engine API, Sentinel-2, invasive brown seaweed, coastal monitoring*

1. INTRODUCCIÓN

El alga parda invasora *Rugulopteryx okamurae* (Dictyotales, Phaeophyceae), originaria del Pacífico nororiental y comúnmente conocida como alga asiática, representa actualmente una de las mayores amenazas para los ecosistemas costeros del suroeste de Europa y noroeste de África (Román & Vázquez, 2025). Incluida en el Catálogo Español de Especies Exóticas Invasoras desde 2020 (Orden TED/1126/2020), esta alga ha experimentado una expansión sin precedentes desde su primera observación en el Estrecho de Gibraltar en 2015, alcanzando las costas atlánticas y mediterráneas de la Península Ibérica, el norte de Marruecos, la Macaronesia y el noroeste de Sicilia (Román & Vázquez, 2025). La colonización masiva de sustratos rocosos submareales por *R. okamurae* está provocando una profunda transformación de los fondos marinos, con pérdida de biodiversidad, alteración de las redes tróficas y deterioro de los servicios ecosistémicos (García-Gómez *et al*., 2020).

Las corrientes arrastran grandes cantidades de biomasa (arribazones) de *R. okamurae* hasta la costa, donde se acumulan y se descomponen sobre la arena de las playas. Estos arribazones generan graves impactos socioeconómicos: asfixia de comunidades bentónicas, emisión de gases de efecto invernadero, generación de olores desagradables y afectación del uso recreativo de las playas. En los últimos cinco años, los municipios gaditanos y malagueños (Andalucía, España) han retirado miles de toneladas de biomasa, con costes que ascienden al millón de euros anuales (Mogollón *et al*., 2024). Ante esta problemática, el plan de gestión frente al alga *R. okamurae* en la costa andaluza, aprobado en julio de 2025, establece la vigilancia y el seguimiento sistemático como elementos clave para orientar la gestión.

En este contexto, el desarrollo de metodologías basadas en teledetección para el seguimiento de *R. okamurae* se ha convertido en una línea emergente de investigación. Hasta la fecha, solo se han publicado dos estudios sobre teledetección de arribazones de esta especie (Haro *et al*., 2024; Roca *et al*., 2022). En este trabajo se presenta una aplicación de escritorio de código abierto para la monitorización de la biomasa fotosintética intermareal en áreas de interés (AOI) definidas, donde crece o se acumula de forma dominante una única especie, utilizando imágenes de los satélites Sentinel-2. Los valores de entrada incluidos por defecto han sido configurados específicamente para el seguimiento y análisis de arribazones de algas pardas acumuladas en playas, como *R. okamurae*, proporcionando a investigadores y gestores costeros una herramienta operativa para el análisis espaciotemporal de estas acumulaciones.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Descripción de la aplicación

Se trata de una aplicación de escritorio de código abierto desarrollada en Python 3 que integra la API de *Google Earth Engine* (GEE) para el seguimiento automatizado de biomasa fotosintética durante la marea baja. Se emplea el NDVI, índice de vegetación más empleado para la monitorización de productores primarios bentónicos durante la marea baja (Haro *et al*., 2026). La aplicación incluye una interfaz gráfica de usuario construida con *CustomTkinter*, que permite configurar los parámetros de búsqueda (Tabla 1) y visualizar los resultados sin necesidad de conocimientos de programación.

La aplicación está configurada para generar y analizar mapas de arribazones del alga parda *R. okamurae* acumulados en playas, con una resolución espacial de 10 m, a partir de imágenes Sentinel-2.

2.1.1. Autenticación y acceso a datos satelitales

El acceso a las imágenes Sentinel-2 se realiza mediante autenticación OAuth con GEE. La aplicación utiliza la colección "COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED", que proporciona imágenes de reflectancia superficial desde marzo de 2017 hasta la actualidad.

2.1.2. Definición del área de estudio

El usuario proporciona un *asset* vectorial (formato *shapefile*) alojado en GEE que delimita el AOI, indicando como entrada la ruta correspondiente (Tabla 1). Este AOI se emplea para recortar las imágenes y calcular los índices espectrales (Ec. 1; Ec. 2), restringiendo el análisis a la línea de costa o a la zona intermareal.

El estudio se centra en la playa urbana de Los Lances, ubicada en Tarifa (Cádiz). Los Lances es una playa arenosa (36°02′24″N, 5°38′04″O; Fig. 1) situada en el Parque Natural del Estrecho de Gibraltar, una de las zonas más afectadas por los arribazones de *R. okamurae* desde 2015. El AOI fue delimitado manualmente, combinando conocimientos de campo y observación de imágenes satelitales adquiridas durante la marea más baja, abarcando una superficie de 21 ha.

2.1.3. Filtrado y selección de imágenes

Se implementa un sistema de filtrado multicapa para la selección automática de imágenes Sentinel-2 adecuadas para el análisis de biomasa fotosintética bajo condiciones mareales comparables:

- **Filtro temporal y espacial:** El usuario define un rango de fechas y un identificador de tesela Sentinel-2 (*tile*).

- **Filtro de cobertura nubosa:** Se establece un umbral máximo de nubosidad mediante el metadato CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE de Sentinel-2, que indica el porcentaje de píxeles nubosos a nivel de escena completa.
- **Filtro de presencia de agua:** Para maximizar la superficie intermareal expuesta y garantizar la comparabilidad de las observaciones, se calcula el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI; Ecuación 1):

  NDWI = (B3 - B8) / (B3 + B8) (1),

  donde B3 (verde, 560 nm) y B8 (infrarrojo cercano, 842 nm) son bandas de Sentinel-2. Valores de NDWI > 0 indican presencia de agua, mientras que en zonas intermareales los píxeles de arena húmeda presentan valores intermedios (0-0,3). El usuario selecciona el umbral de NDWI (≥ 0; 0,1; 0,2 o 0,3) a partir del cual un píxel se clasifica como agua, adaptándolo al AOI. Las imágenes cuyo porcentaje de píxeles de agua supere el valor máximo definido son excluidas automáticamente.

Tabla 1. Parámetros de entrada para el seguimiento y análisis de los arribazones del alga parda *R. okamurae* en la playa urbana de Los Lances (Tarifa, Cádiz) durante el año 2021.

Parámetros	Descripción	Valores
Fechas	Inicio y final del periodo de análisis	2021-01-01 2021-12-31
Tile	Identificador de tesela Sentinel-2	T29SQV
Máx. nubes (%)	Porcentaje máximo de cobertura nubosa en la tesela	20
Máx. agua (%)	Porcentaje máximo de píxeles de agua en el AOI	10
Umbral NDWI	Valor NDWI para clasificar píxeles como agua	≥0.2
Rango NDVI	Umbral inferior y superior del NDVI	0,08 - 1
Asset GEE	Áreas de interés (AOI)	projects/ee-XX/assets/AOI
EPGS	Sistemas de coordenadas de salida	32629
Directorio de salida	Nombre de la carpeta de salida	C:/Ruguloptery x/ AOI

2.1.4. Identificación de biomasa fotosintética

Para la detección de píxeles con presencia de biomasa fotosintética se calcula el NDVI (Ec. 2):

NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4) (2),

donde B8 (infrarrojo cercano, 842 nm) y B4 (rojo, 665 nm) son bandas de Sentinel-2. El usuario define un rango de valores NDVI, variable según el hábitat de estudio, para seleccionar los píxeles con biomasa fotosintética (Haro *et al*., 2026); los que quedan fuera se asignan como NoData y se excluyen de los cálculos posteriores. Para el caso de los arribazones de algas pardas se aplica un umbral mínimo de 0,08, que permite discriminarlos respecto a la arena (Haro *et al*., 2023, 2024).

2.1.5. Exportación, visualización y análisis

Para cada imagen procesada, se generan y descargan dos archivos GeoTIFF georreferenciados: NDVI (recortado al AOI) y RGB (bandas B4, B3, B2).

La aplicación incluye un visor integrado en el que la imagen RGB sirve como fondo para el control de calidad de nubes sobre el AOI. Sobre ella se superponen, para este caso de estudio, únicamente los píxeles con NDVI comprendido entre 0,1 y 0,6, atribuidos a la presencia de arribazones de algas pardas, representados mediante una paleta de colores amarillo-naranja-marrón. La superposición de NDVI puede activarse o desactivarse, y se incluyen controles para navegar entre las imágenes seleccionadas en orden cronológico.

El visor genera gráficos de evolución temporal de cobertura (número de píxeles, expresado en hectáreas), promedio y mediana del NDVI para el AOI, así como un mapa de ocurrencia que representa el porcentaje de veces que cada píxel presenta valores válidos de NDVI a lo largo de la serie analizada. Los datos de las series temporales pueden exportarse en formato Excel (.xlsx) para su análisis posterior.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el periodo de estudio analizado, de enero a diciembre de 2021, se procesaron 109 imágenes, de las cuales 35 cumplieron con los criterios de cobertura nubosa y presencia de agua. De este conjunto, se descartaron 4 imágenes debido a la presencia de nubes, sombras o *sun glint*, identificados mediante inspección visual de las composiciones RGB (Fig. 1).

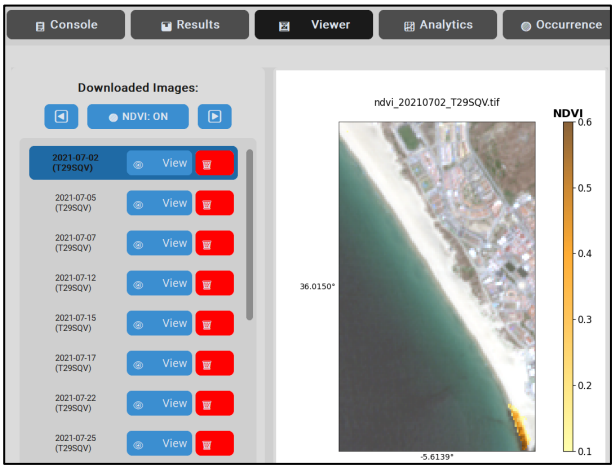


Figura 1. Visor con las fechas de las imágenes Sentinel-2 seleccionadas y los píxeles con valores de NDVI atribuidos a la presencia de arribazones de algas pardas para el 2 de julio de 2021.

Finalmente, 31 imágenes fueron seleccionadas para el análisis temporal y la elaboración del mapa de ocurrencia (Fig. 2; Fig. 3).

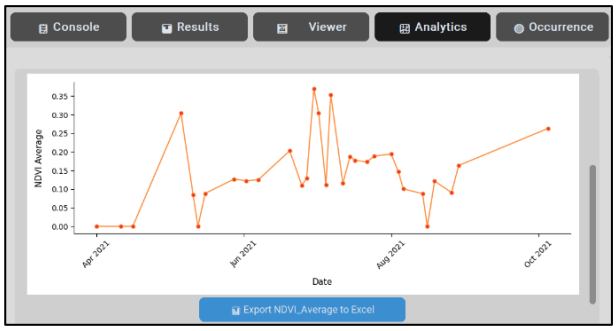


Figura 2. Serie temporal de NDVI promedio para el AOI en el año 2021.

La mayor presencia de arribazones se observó el 25/07/2021 (con 3,7 ha), mientras que los valores promedio de NDVI oscilaron entre 0,11 y 0,35 para el AOI durante el mes de julio (Fig. 2). El mapa de ocurrencia muestra cómo las mayores acumulaciones de arribazones se producen en el extremo este de la playa urbana de Los Lances (Fig. 3), lo cual probablemente ocurre con vientos del suroeste, oeste o noroeste, como observaron Haro *et al*. (2024). Estos análisis sientan las bases para el desarrollo futuro de sistemas de alerta temprana, la optimización de las labores de limpieza y la evaluación de áreas potenciales de emisión de gases de efecto invernadero.

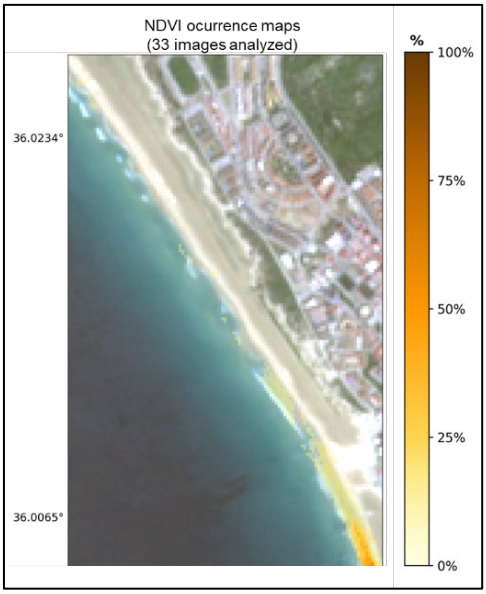


Figura 3. Mapa de frecuencia de los píxeles con valores de NDVI atribuidos a arribazones de algas pardas de *R. okamurae* en la playa de Los Lances (2021).

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una aplicación de código abierto que integra el flujo completo de procesamiento de imágenes Sentinel-2 para la monitorización de la biomasa fotosintética intermareal, como los arribazones de *R. okamurae*: desde la búsqueda y el filtrado de imágenes hasta la generación de series temporales, estadísticos de NDVI y mapas de ocurrencia. Su interfaz gráfica intuitiva elimina las barreras técnicas habituales en teledetección, permitiendo su uso por parte de investigadores y gestores costeros sin conocimientos en programación.

5. AGRADECIMIENTOS

Este software ha sido financiado por los VIII Premios Mares Circulares (Asociación Chelonia/Coca-Cola) y por un contrato postdoctoral (DGP_POST_2024_00524) financiado por la Junta de Andalucía / CUII y el Fondo Social Europeo Plus (FSE+).

6. REFERENCIAS

García-Gómez, J. C., Sempere-Valverde, J., González, A. R., Martínez-Chacón, M., Olaya-Ponzone, L., Sánchez-Moyano, E., Ostalé-Valriberas, E., & Megina, C. (2020). From exotic to invasive in record time: The extreme impact of *Rugulopteryx okamurae* (Dictyotales, Ochrophyta) in the strait of Gibraltar. *Science of the Total Environment*, *704*, 0–2. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135408

Haro, S., Bermejo, R., Veylit, L., & Morrison, L. (2026). Updated 2.0 to Biointertidal Mapper software: A satellite approach for NDVI-based intertidal habitat mapping. *SoftwareX*, *33*, 102539. https://doi.org/10.1016/j.softx.2026.102539

Haro, S., Bermejo, R., Wilkes, R. J., Bull, L., & Morrison, L. (2023). Monitoring intertidal golden tides dominated by *Ectocarpus siliculosus* using Sentinel-2 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *122*, 103451. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103451

Haro, S., Morrison, L., Caballero, I., Figueroa, F. L., Korbee, N., Navarro, G., & Bermejo, R. (2024). Assessing Golden Tides from Space: Meteorological Drivers in the Accumulation of the Invasive Algae *Rugulopteryx okamurae* on Coasts. *Remote Sensing*, *16*(15), 2689. https://doi.org/10.3390/rs16152689

Mogollón, S. L., Zilio, M. I., Buitrago, E. M., Caraballo, M. Á., & Yñiguez, R. (2024). Economic impact of *Rugulopteryx okamurae* (Dictyotales, Ochrophyta) along the Andalusian coastline: the case of Tarifa, Spain. *Wetlands Ecology and Management*, *32*(1), 19–32. https://doi.org/10.1007/s11273-023-09951-2

Roca, M., Dunbar, M. B., Román, A., Caballero, I., Zoffoli, L. M., Gernez, P., & Navarro, G. (2022). Monitoring the marine invasive alien species *Rugulopteryx okamurae* using unmanned aerial vehicles and satellites. *Frontiers in Marine Science*, *9*, 1–15. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1004012

Román, S., & Vázquez, R. (2025). Assessment of the *Rugulopteryx okamurae* invasion in Northeastern Atlantic and Mediterranean bioregions: Colonisation status, propagation hypotheses and temperature tolerance thresholds. *Marine Environmental Research*, *207*, 107093. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.107093

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.166

El potencial del SAR para el análisis de cambios morfológicos en playas: tendencias actuales y nuevas fronteras

Millán Roldán, María del Carmen [1] **Pellón de Pablo, Erica** [1] **Gomes da Silva, Paula** [1]

[1] IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, Spain, España

ORCID: Millán Roldán 0009-0006-1302-8442 Pellón de Pablo 0000-0002-5742-9225 Gomes da Silva 0000-0003-4766-8449

Correspondencia: millanmc@unican.es pellone@unican.es gomesp@unican.es

RESUMEN

La monitorización continua de las zonas costeras es de gran relevancia por su naturaleza dinámica y su alta exposición a riesgos climáticos y presiones antrópicas. Ante la escasez de mediciones in situ, los datos satelitales han revolucionado el sector, con sensores SAR permitiendo adquisiciones independientes de la iluminación y la nubosidad. Sin embargo, la aplicación de SAR en entornos costeros sigue siendo limitada y fragmentada. Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar el estado actual de la detección de líneas de costa y topografías intermareales mediante imágenes SAR e identificar los principales factores que condicionan su rendimiento y las futuras líneas de investigación necesarias para potenciar sus ventajas y favorecer una toma de decisiones más robusta. Para ello, se analizan estudios previos evaluando elecciones metodológicas recurrentes, incluyendo selección de banda y polarización, datos de referencia y entornos de estudio, complementada con un caso práctico utilizando imágenes Sentinel-1 en condiciones ambientales variadas. Se evidencia que el rendimiento de la extracción de líneas de costa con SAR depende fuertemente del contexto morfodinámico, la configuración del sensor y las decisiones de procesamiento, sin existir actualmente configuraciones óptimas universalmente válidas. La escasa intercomparación sistemática entre sitios y la fragmentación metodológica limitan la transferibilidad de los métodos. La principal barrera para su operatividad es la ausencia de datos de referencia homogéneos y fiables y la falta de conocimiento de las interacciones del radar con estos entornos dinámicos.

Palabras clave: *SAR; Monitorización costera; Línea de costa; Topografía intermareal; Imágenes satelitales*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

El potencial del SAR para el análisis de cambios morfológicos en playas: tendencias actuales y nuevas fronteras

Millán Roldán, María del Carmen [(1)], Pellón de Pablo, Erica [(1)], Gomes da Silva, Paula [(1)]

[(1)] IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, Spain, España.

0009-0006-1302-8442, millanmc@unican.es ; 0000-0002-5742-9225, pellone@unican.es

0000-0003-4766-8449, gomesp@unican.es

Resumen: La monitorización continua de las zonas costeras es de gran relevancia por su naturaleza dinámica y su alta exposición a riesgos climáticos y presiones antrópicas. Ante la escasez de mediciones *in situ*, los datos satelitales han revolucionado el sector, con sensores SAR permitiendo adquisiciones independientes de la iluminación y la nubosidad. Sin embargo, la aplicación de SAR en entornos costeros sigue siendo limitada y fragmentada. Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar el estado actual de la detección de líneas de costa y topografías intermareales mediante imágenes SAR e identificar los principales factores que condicionan su rendimiento y las futuras líneas de investigación necesarias para potenciar sus ventajas y favorecer una toma de decisiones más robusta. Para ello, se analizan estudios previos evaluando elecciones metodológicas recurrentes, incluyendo selección de banda y polarización, datos de referencia y entornos de estudio, complementada con un caso práctico utilizando imágenes Sentinel-1 en condiciones ambientales variadas. Se evidencia que el rendimiento de la extracción de líneas de costa con SAR depende fuertemente del contexto morfodinámico, la configuración del sensor y las decisiones de procesamiento, sin existir actualmente configuraciones óptimas universalmente válidas. La escasa intercomparación sistemática entre sitios y la fragmentación metodológica limitan la transferibilidad de los métodos. La principal barrera para su operatividad es la ausencia de datos de referencia homogéneos y fiables y la falta de conocimiento de las interacciones del radar con estos entornos dinámicos.

Palabras clave: *SAR; Monitorización costera; Línea de costa; Topografía intermareal; Imágenes satelitales*

SAR's potential for analyzing morphologic changes in beaches: current trends and new frontiers

Abstract*: Continuous monitoring of coastal zones is highly relevant given their dynamic nature and strong exposure to climate-related hazards and anthropogenic pressures. In the absence of extensive in situ measurements, satellite data have revolutionized the field, with Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors offering significant advantages by enabling day and night acquisitions under cloud-covered conditions. However, the application of SAR in coastal environments remains limited and fragmented. Therefore, the objective of this work is to analyze the current state of SAR-based shoreline and intertidal topography detection, identifying the main factors controlling method performance and the future research directions required to fully exploit its potential and promote more robust decision-making. To this end, a structured analysis of previous studies is conducted, assessing recurrent methodological choices including selection of band and polarization, ground truth and study site, complemented by a case study using Sentinel-1 imagery in varied environmental conditions. The results demonstrate that shoreline extraction performance strongly depends on the morphodynamic context, sensor configuration and processing decisions, with no universally optimal parameter settings currently identified. The limited systematic intercomparison between sites and methodological fragmentation constrain transferability. The main barrier to operational implementation is the lack of homogeneous and reliable reference data, together with insufficient understanding of radar interactions within these dynamic coastal environments.*

Keywords*: SAR; Coastal monitoring; Shoreline; Intertidal topography; Satellite imagery*

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son entornos altamente dinámicos, albergan una parte significativa de la población mundial y están expuestas a riesgos climáticos relevantes. Su monitorización, tradicionalmente limitada a un número reducido de playas, ha experimentado un notable avance con el desarrollo de la observación de la Tierra desde satélite, siendo la línea de costa un parámetro clave en estudios de evolución costera.

La detección de la línea de costa mediante sensores ópticos ha sido ampliamente utilizada gracias a la facilidad de interpretación de las imágenes y a su elevada resolución espacial y temporal, lo que ha permitido el desarrollo de herramientas semiautomáticas que constituyen el estado del arte, como *CoastSat* (Vos *et al*., 2019). Asimismo, estos datos han posibilitado la estimación de topografías intermareales mediante el *Waterline Method*, mejorando la representación de procesos relevantes como la inundación costera (Mason *et al*., 1995).

No obstante, los sensores ópticos presentan limitaciones significativas, ya que no permiten la adquisición de observaciones útiles en condiciones de nubosidad o durante la noche, lo que resulta especialmente restrictivo en regiones con climatología adversa y reduce de forma considerable la disponibilidad de datos. En este contexto, los sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) constituyen una alternativa prometedora, al operar de manera independiente de las condiciones meteorológicas y de iluminación, proporcionando un volumen de datos significativamente mayor en regiones persistentemente nubosas (Savastano *et al*., 2024). Además, la señal radar aporta información sobre propiedades físicas de la superficie, como la rugosidad, la pendiente o la humedad. En particular, en la detección de la línea de costa, los sensores SAR permiten discriminar la frontera entre mar y tierra aprovechando el contraste de retrodispersión entre ambos medios, siendo la de tierra generalmente más elevada.

A pesar del reconocido potencial del SAR en diferentes ámbitos científicos, su aplicación en zonas costeras sigue siendo limitada. Esto se debe principalmente a la complejidad en la interpretación de las imágenes en zonas de transición tierra-agua. Entre los factores que dificultan su análisis se encuentran el ruido *speckle*, las distorsiones geométricas inherentes a la geometría radar y la elevada variabilidad de la morfología costera, influenciada por el rango mareal, la dinámica sedimentaria y las condiciones de oleaje. Estos factores pueden introducir ruido en la señal y afectan de forma variable en función de los parámetros de adquisición del sensor, como la polarización, la banda o la geometría orbital. Como consecuencia, existe un número reducido de metodologías consolidadas para la detección de la línea de costa mediante SAR, así como una notable fragmentación en los enfoques desarrollados.

En este contexto, el presente trabajo realiza un análisis crítico de estudios centrados en la detección de la línea de costa mediante datos SAR, con el objetivo de identificar patrones comunes, limitaciones y principales fuentes de incertidumbre. Como complemento, se presenta un caso práctico comparativo que ilustra la sensibilidad de la digitalización de la línea de costa frente a distintos parámetros de adquisición y condiciones ambientales. Los resultados obtenidos permiten orientar futuros esfuerzos hacia la optimización de técnicas basadas en SAR y el desarrollo de metodologías adaptadas a diferentes tipologías de ambientes costeros.

2. MÉTODOLOGÍA

2.1. Análisis del estado actual

Se realiza un análisis crítico de 30 estudios seleccionados utilizando las palabras clave "*SAR*", "*coastline*", "*coast*", "*coastal bathymetry*" e "*intertidal*" en Scopus, considerando únicamente trabajos centrados en la extracción de líneas de costa y en la aplicación del *Waterline Method*.

Este conjunto permite identificar patrones comunes en la selección de parámetros de adquisición, incluyendo polarización, banda y geometría orbital, así como en los procedimientos de pre y posprocesado. Asimismo, se analiza la tipología de los ambientes costeros considerados en cada estudio con el objetivo de evaluar la generalidad de los métodos propuestos y sus limitaciones en función del contexto morfodinámico.

A partir de este análisis comparativo, se identifican vacíos de conocimiento y se plantean líneas de investigación orientadas a mejorar la robustez, transferibilidad y aplicabilidad operacional de las técnicas SAR en la monitorización costera.

2.2. Caso práctico

Con el objetivo de mostrar la influencia de distintos parámetros, se extraen líneas de costa en dos fechas próximas a la adquisición de una topobatimetría de alta resolución (14 de septiembre de 2021) en la playa de Salinas (Asturias, España), bajo condiciones de oleaje y nivel de marea contrastadas.

Se analizan imágenes de Sentinel-1 en modo de adquisición *Interferometric Wide Swath* y producto *Ground Range Detected*. La cadena de preprocesado incluye corrección orbital, eliminación de ruido térmico y de bordes, calibración radiométrica, aplanamiento de terreno, filtrado de *speckle* mediante filtro *Lee Sigma*, conversión a decibelios, corrección geométrica *Doppler* y recorte a subconjunto. Posteriormente, se aplican técnicas de mejora de imagen mediante descomposición *wavelet* y difusión anisotrópica. La segmentación se realiza mediante el método de *Otsu*, y la extracción de la línea de costa se lleva a cabo mediante el algoritmo *Marching Squares*.

Para cada fecha, se comparan las líneas obtenidas con las polarizaciones VV (transmisión y recepción con polarización vertical) y VH (transmisión en vertical y recepción en horizontal) frente al contorno del nivel del mar derivado de la topobatimetría en el instante de adquisición de las imágenes (línea de referencia). La comparación se realiza mediante transectos perpendiculares a la línea de costa. En aquellos casos en los que una misma línea presenta múltiples intersecciones con un transecto, se selecciona la intersección más tierra adentro.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis del estado actual

El análisis de la literatura permite identificar los principales factores que condicionan la detección de la línea de costa mediante imágenes SAR. La configuración del sensor influye de manera determinante en la detectabilidad de la frontera tierra-agua. Las bandas de menor longitud de onda tienden a mejorar la detección (Angelini *et al*., 2025), si bien su selección suele estar condicionada por la disponibilidad de datos. En cuanto a la polarización, no existe consenso sobre la configuración óptima, aunque Haarpaintner *et al*. (2021) sugiere un mejor rendimiento de VV en condiciones de marea baja y de VH en marea alta, lo que indica una fuerte dependencia de las condiciones locales para seleccionar la polarización. Asimismo, el uso de doble polarización ha mostrado mejores resultados que los canales individuales (Ferrentino *et al*., 2021). La falta de experimentación sistemática e intercomparación limita la identificación de configuraciones óptimas.

El rendimiento de los métodos varía significativamente en función del entorno costero. La presencia de sedimentos gruesos favorece el contraste tierra-agua, mientras que se observan mayores errores en zonas con estructuras artificiales, barras arenosas, estuarios o lagunas (Angelini *et al*., 2025; Tajima *et al*., 2019). La orientación de la costa respecto a la geometría de adquisición también resulta relevante en presencia de relieve en la zona supramareal, como dunas, acantilados o edificaciones (Savastano *et al*., 2024). Además, las condiciones de viento y oleaje incrementan la retrodispersión del agua, pudiendo desplazar la posición aparente de la línea de costa dependiente de la marea. Algunos estudios abordan este problema mediante la preselección de imágenes en función de estas condiciones (Tajima *et al*., 2019).

La mayoría de los trabajos se centran en un único entorno, generalmente morfodinámicamente simples, lo que limita la generalización de los resultados. Las comparaciones entre múltiples sitios muestran que métodos eficaces en playas micromareales reducen su rendimiento en entornos más complejos, como llanuras macromareales o estuarios, lo que evidencia que el SAR detecta una frontera condicionada por la morfología local y los mecanismos de dispersión (Angelini *et al*., 2025). En este contexto, los enfoques basados en aprendizaje automático requieren conjuntos de entrenamiento que abarquen una amplia diversidad de entornos para garantizar su transferibilidad. Algunos estudios aplican posprocesados para eliminar *outliers* en función de la distancia a una referencia (Savastano *et al*., 2024), aunque este enfoque puede omitir errores dentro de la zona intermareal o descartar eventos extremos reales.

Desde una perspectiva general, una de las principales limitaciones es la ausencia de datos de referencia homogéneos y fiables. La validación suele basarse en digitalizaciones manuales o en conjuntos de datos heterogéneos, lo que introduce incertidumbre y dificulta evaluar de forma robusta la influencia de los parámetros de adquisición y su interacción con la morfología costera. Además, la interpretación de imágenes SAR resulta menos intuitiva que la de datos ópticos, lo que puede dar lugar a discrepancias significativas en la digitalización manual (Zollini *et al*., 2020).

Finalmente, la fragmentación de enfoques, la limitada disponibilidad de código, la ausencia de *benchmarks* abiertos y la dependencia de ajustes manuales dificultan la reproducibilidad y la continuidad entre estudios. Estos factores constituyen una barrera significativa para el desarrollo de aplicaciones operacionales basadas en series temporales largas y análisis a escala regional.

3.2. Caso práctico

La Figura 1 muestra las líneas de costa extraídas para ambas polarizaciones (VV y VH) en dos fechas con condiciones contrastadas de oleaje y nivel del mar (9 y 15 de septiembre), evidenciando la influencia de estos factores en el proceso de detección.

Las métricas presentadas en la Tabla 1 indican que, en las imágenes evaluadas de Salinas, la polarización VV proporciona mejores resultados en condiciones de oleaje calmado y niveles de mar elevados. En la mitad occidental de la playa, ambas polarizaciones generan líneas similares, en un entorno urbano con escaso ancho de playa seca que puede llegar a desaparecer en condiciones de marea alta, alcanzando el paseo marítimo. En contraste, en la mitad oriental, caracterizada por la presencia de un sistema dunar y mayores anchos de playa, se observan diferencias más marcadas. En este sector, la polarización VH tiende a detectar el pie de la duna o el inicio de la vegetación, mientras que VV se aproxima más a la interfaz agua-tierra.

En condiciones de oleaje más energético y niveles de mar más bajos, las líneas obtenidas presentan una mayor sinuosidad y errores significativamente superiores

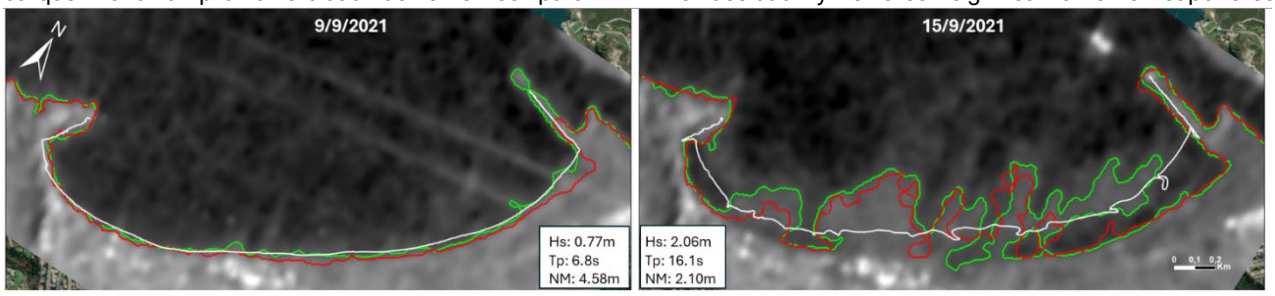


Figura 1. Líneas de costa extraídas en Salinas en dos fechas distintas, comparando la línea de referencia (blanco), la extracción con polarización VV (verde) y VH (rojo). De fondo la imagen preprocesada, previa a la segmentación correspondiente en ambos casos a VV.

respecto a la referencia. Tal como se observa en la Figura 1, las zonas próximas a la orilla muestran una retrodispersión mayor de la esperada para superficies de agua, posiblemente asociada a procesos de rotura del oleaje y a la exposición de formas intermareales con mayores niveles de humedad que la arena seca, lo que introduce errores en la detección.

Aunque en estas condiciones VH muestra resultados ligeramente mejores en términos métricos (Tabla 1), el análisis visual de la Figura 1 indica que ambos métodos fallan en el intento de detectar la interfaz agua tierra, y resalta la complejidad a la hora de definir el método óptimo en condiciones de mar energético.

Tabla 1. Métricas de error en metros para las dos fechas y las dos polarizaciones (VV verde y VH rojo): media, raíz del error cuadrático medio (RMSE), desviación típica, error absoluto medio (MAE) y desviación absoluta media (MAD).

Fecha	9/9/2021	15/9/2021
Media	3.29 / 24.55	41.25 / 52.15
RMSE	17.33 / 36.20	158.47 / 130.56
Desviación típica	17.28 / 27.02	155.46 / 121.60
MAE	14.06 / 30.42	144.31 / 113.70
MAD	13.26 / 17.74	126.26 / 93.17

Este caso práctico pone de manifiesto la fuerte influencia de factores como la polarización, el oleaje, el nivel del mar y la tipología del entorno costero en la extracción de la línea de costa. Asimismo, evidencia la necesidad de ampliar el análisis a un mayor número de condiciones y fechas para avanzar hacia metodologías más robustas y generalizables.

4. FUTUROS PASOS

Para consolidar el uso del SAR como herramienta operativa en estudios de morfodinámica costera, resulta prioritario mejorar la comprensión física de la señal en estos entornos y determinar qué indicadores de línea de costa pueden detectarse de forma fiable bajo distintas condiciones ambientales y de adquisición. En particular, es necesario analizar la influencia de factores como el estado mareal, la humedad del sedimento, la morfología de la playa y el oleaje en la respuesta de la retrodispersión y en la visibilidad de los distintos indicadores costeros.

Asimismo, se requieren evaluaciones comparativas sistemáticas de las configuraciones SAR, incluyendo bandas, polarizaciones, ángulos de incidencia y geometrías orbitales, aplicadas a una amplia variedad de tipologías costeras. Los resultados disponibles evidencian la ausencia de un método universal y la fuerte dependencia del rendimiento respecto al entorno, como el rango mareal, la orientación, la pendiente, el tamaño de grano o la presencia de elementos antrópicos, lo que pone de manifiesto la necesidad de desarrollar metodologías adaptativas.

Otro aspecto crítico es la disponibilidad de datos de referencia fiables y homogéneos. El desarrollo de bases de datos públicas, obtenidas mediante mediciones in situ o imágenes de alta resolución y no únicamente por digitalización manual de imágenes SAR, resulta esencial para la validación robusta de métodos y el entrenamiento de modelos de aprendizaje automático, así como para mejorar la comparabilidad entre estudios. En este sentido, el acceso abierto a datos y algoritmos es clave para reducir la fragmentación actual y favorecer el avance coordinado del campo.

Finalmente, el avance hacia aplicaciones operacionales requiere la automatización de los flujos de trabajo, la integración de datos SAR y ópticos y la explotación de nuevas misiones satelitales, como NISAR, SWOT o Sentinel-1 Next Generation. Estas líneas permitirán el desarrollo de sistemas reproducibles y escalables, capaces de generar series temporales largas y análisis a escala regional.

5. REFERENCIAS

Angelini, R., Angelats, E., Ribas, F., Luzi, G., Ciaccio, F. D., Mugnai, F., & Masiero, A. (2025). Enhanced SAR-Based Shoreline Extraction in Microtidal Beaches Through Improved Preprocessing of Sentinel-1 and TerraSAR-X Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1–17.

Ferrentino, E., Buono, A., Nunziata, F., Marino, A., & Migliaccio, M. (2021). On the Use of Multipolarization Satellite SAR Data for Coastline Extraction in Harsh Coastal Environments: The Case of Solway Firth. IEEE *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14*, 249–257.

Haarpaintner, J., Davids, C., Haarpaintner, J., & Davids, C. (2021). Mapping Atmospheric Exposure of the Intertidal Zone with Sentinel-1 CSAR in Northern Norway. *Remote Sensing, 13*(17).

Mason, D. C., Davenport, I. J., Robinson, G. J., Flather, R. A., & McCartney, B. S. (1995). Construction of an inter-tidal digital elevation model by the 'Water-Line' Method. *Geophysical Research Letters, 22*(23), 3187–3190.

Savastano, S., Gomes da Silva, P., Sánchez, J. M., Tort, A. G., Payo, A., Pattle, M. E., Garcia-Mondéjar, A., Castillo, Y., & Monteys, X. (2024). Assessment of Shoreline Change from SAR Satellite Imagery in Three Tidally Controlled Coastal Environments. *Journal of Marine Science and Engineering, 12*(1), Article 1.

Tajima, Y., Wu, L., Fuse, T., Shimozono, T., & Sato, S. (2019). Study on shoreline monitoring system based on satellite SAR imagery. *Coastal Engineering Journal, 6*1(3), 401–421.

Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software, 122*, 104528.

Zollini, S., Alicandro, M., Cuevas-González, M., Baiocchi, V., Dominici, D., & Buscema, P. M. (2020). Shoreline Extraction Based on an Active Connection Matrix (ACM) Image Enhancement Strategy. *Journal of Marine Science and Engineering, 8*(1), Article 1.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.167

¿Se está deteniendo la AMOC? Lo que la teledetección puede decir al respecto

Turiel Martínez, Antonio [1] **Bergas Ques, Joan** [1] **Ruiz Sebastián, Arnau** [1] **González Gambau, Verónica** [1] **Olmedo Casal, Estrella** [1]

[1] Instituto de Ciencias del Mar, CSIC, España & Barcelona Expert Center

ORCID: Turiel Martínez 0000-0001-6103-224X Bergas Ques 0009-0006-3909-2266 Ruiz Sebastián 0009-0002-7596-9185 González Gambau 0000-0002-6380-3754 Olmedo Casal 0000-0002-3178-1554

Correspondencia: turiel@icm.csic.es jbergas@icm.csic.es arnauruiz@icm.csic.es vgonzalez@icm.csic.es olmedo@icm.csic.es

RESUMEN

En los últimos años se ha reabierto el debate sobre la posible ralentización (o incluso detención) del Brazo Atlántico de la Corriente Meridional de Lazo (AMOC), una importante corriente oceánica que garantiza un clima estable en Europa. Las medidas in situ de la intensidad de la AMOC son escasas y requieren largos períodos de integración para aportar una información fiable, pero en los últimos años se han acumulado indicios de cambios en la AMOC, y dada la gravedad de lo que supondría pasar este punto de no retorno (tipping point), se hace necesario intentar conseguir tanta información relevante como sea posible. En este trabajo, mostraremos que los datos de teledetección actuales tienen el potencial de mostrar y monitorizar los cambios de la AMOC, incluyendo estimar su intensidad. No solo eso: la observación satelital nos proporciona una descripción oceanográficamente precisa de su variabilidad y evidencia un cuadro muchísimo más rico y complejo que la simplificación conceptual actual. La teledetección servirá por tanto no tan solo para mejorar la monitorización de este proceso y los cambios en la formación de aguas profundas en general, sino para afinar la descripción física de los procesos y mejorar la predicción climática.

Palabras clave: *AMOC, punto de no retorno, Oceanografía Analítica por Satellite, formación de aguas profundas, interacción atmósfera-océano.*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

¿Se está deteniendo la AMOC? Lo que la teledetección puede decir al respecto

Turiel Martínez, Antonio [(1)], Bergas Ques, Joan [(1)], Ruiz Sebastián, Arnau [(1)], González Gambau, Verónica [(1)], Olmedo Casal, Estrella [(1)]

[(1)] Instituto de Ciencias del Mar, CSIC, España & Barcelona Expert Center.

0000-0001-6103-224X, turiel@icm.csic.es ; 0009-0006-3909-2266, jbergas@icm.csic.es.

0009-0002-7596-9185, arnauruiz@icm.csic.es ; 0000-0002-6380-3754, vgonzalez@icm.csic.es.

0000-0002-3178-1554, olmedo@icm.csic.es.

Resumen: En los últimos años se ha reabierto el debate sobre la posible ralentización (o incluso detención) del Brazo Atlántico de la Corriente Meridional de Lazo (AMOC), una importante corriente oceánica que garantiza un clima estable en Europa. Las medidas *in situ* de la intensidad de la AMOC son escasas y requieren largos períodos de integración para aportar una información fiable, pero en los últimos años se han acumulado indicios de cambios en la AMOC, y dada la gravedad de lo que supondría pasar este punto de no retorno (*tipping point*), se hace necesario intentar conseguir tanta información relevante como sea posible. En este trabajo, mostraremos que los datos de teledetección actuales tienen el potencial de mostrar y monitorizar los cambios de la AMOC, incluyendo estimar su intensidad. No solo eso: la observación satelital nos proporciona una descripción oceanográficamente precisa de su variabilidad y evidencia un cuadro muchísimo más rico y complejo que la simplificación conceptual actual. La teledetección servirá por tanto no tan solo para mejorar la monitorización de este proceso y los cambios en la formación de aguas profundas en general, sino para afinar la descripción física de los procesos y mejorar la predicción climática.

Palabras clave: AMOC, punto de no retorno, Oceanografía Analítica por Satellite, formación de aguas profundas, interacción atmósfera-océano.

Is AMOC slowing down? What remote sensing can say about that.

***Abstract**: During the last years, the old debate about the possible Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) slowdown (or even shutdown) has been reopened. The AMOC is an important oceanic current that grants a stable climate for Europe. In situ measurements of AMOC strength are scarce and require long integration periods, in order to provide a reliable information, but during the last years the evidences of changes in AMOC are mounting, and given the seriousness of passing this tipping point, to gather as much relevant information as possible has become mandatory. In this talk, we will show that current remote sensing data have the potential to evidence and to monitor the changes in AMOC, including the estimation of its strength. Not only that: satellite data provides us with a more oceanographically precise description of its variability and evidences a richer and more complex framework for AMOC beyond the current conceptual simplification. Remote sensing will therefore be useful not only to improve the monitoring of AMOC and the changes in deep water formation in general, but also to improve the physical description of the processes and so enhancing climate forecasting.*

***Keywords**: AMOC, tipping point, Satellite-based Analytic Oceanography, deep water formation, sea-atmosphere interaction*

1. INTRODUCCIÓN

La Corriente Meridional del Lazo (Meridional Overturning Current, MOC), también conocida como Corriente Termohalina o Gran Cinta Transportadora, es una corriente oceánica que en superficie fluye de manera predominantemente zonal (eje oeste-este) siguiendo dos de los grandes sistemas de corrientes (la Corriente del Golfo y la Corriente Circumpolar Antártica) y que en profundidad circula de manera predominantemente meridional (eje norte-sur). En superficie, esta corriente sigue los grandes patrones de circulación inducidos por el viento y el ajuste geostrófico, mientras que en profundidad su movimiento viene determinado por las variaciones de densidad asociadas a los cambios de temperatura y salinidad del paquete de agua. Esta corriente es fundamental para la redistribución de energía entre los polos y el ecuador, y para la ventilación

de las aguas profundas. El brazo atlántico de la MOC, conocido como AMOC (ver conceptualización en la Figura 1) genera un flujo de energía hacia Europa de hasta 1 PW que mantiene Europa Central en un estado más cálido de lo que correspondería por su latitud.

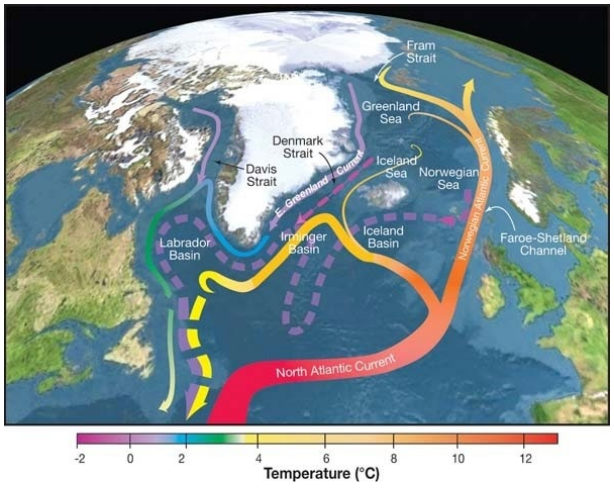


Figura 1. Esquema conceptual de la AMOC. La corriente fluye desde América del Norte hacia Europa como un brazo de la Corriente del Golfo, del que luego se separa para fluir hacia la Europa del Norte, librando calor y humedad en el proceso, y luego retrocede hasta que el agua se vuelve tan densa que se hunde hasta una profundidad de 2000 metros en el interior del océano, por donde circula de norte a sur.

Los procesos asociados al Cambio Climático, en particular, la mayor presencia de agua dulce en superficie, los cambios de los patrones de viento que provocan enfriamiento y evaporación del agua y por tanto su densificación, así como la modificación de la circulación de mesoescala, pueden estar contribuyendo a ralentizar la AMOC, y eventualmente podrían causar su detención. La detención de la AMOC se considera un punto de no retorno planetario catastrófico, que haría caer las temperaturas de la Europa del Norte hasta 30ºC y desplazaría la ICTZ hacia el sur y con ella la precipitación en la Amazonia, la selva centroafricana y el monzón asiático: más de 3000 millones de personas se verían gravemente afectadas (van Westen, 2024).

2. TELEDETECCIÓN DE LOS INDICIOS DE CAMBIO EN LA AMOC

Desde 2014, se ha registrado la presencia de una anomalía persistente de temperatura del agua del mar al sur de Groenlandia: mientras que en la mayoría del planeta la temperatura superficial del agua del mar sube con mayor o menos intensidad, en esta amplia zona disminuye, lo cual es un indicio de detención de la AMOC que además no pueden explicar los modelos del CMIP6 utilizados por el IPCC (Rahmstorf, 2024). Como mostramos en (Turiel, 2024), ese cambio está asociado a cambios en los patrones globales de circulación.

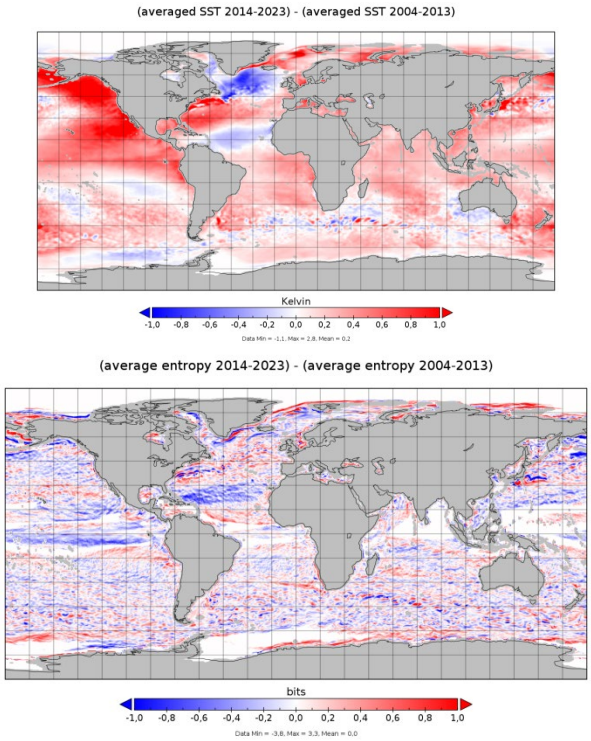


Figura 2. Arriba: Diferencia interdecadal de la temperatura promedio de la superficie del mar. La mayor anomalía negativa se registra al sur de Groenlandia. Abajo: Diferencia interdecadal del contenido de información, reflejando un cambio de los patrones globales de circulación. Adaptado de Turiel, 2026 – en preparación.

3. TELEDETECCIÓN DE LA INTERACCIÓN ATMÓSFERA-OCÉANO

Siguiendo la formulación presentada por (Groeskamp, 2019), se puede deducir el ritmo de formación de aguas profundas en la superficie del mar a partir de la derivada material de la densidad del agua del mar, de la siguiente forma:

$$M = h\, D\rho = h\,(\partial_t \rho + \vec{v}\cdot\nabla\rho) \qquad (1)$$

donde M es el flujo de masa, h es la profundidad de la capa de mezcla, ρ es la densidad del agua del mar y $\vec{v}$ es la velocidad del agua.

Aplicando la ecuación termodinámica del agua del mar (TEOS10) (Pawlowicz, 2012) se puede calcular la densidad ρ a partir de la temperatura y la salinidad superficiales, que son variables obtenibles por teledetección. Para calcular la derivada material, se precisa una secuencia temporal y el valor del campo de velocidad, el cual se puede estimar con radares altímetros. Para acabar el cálculo, se precisa tener la profundidad de la capa de mezcla, la cual no se puede obtener por medios de teledetección y debe incorporarse a partir de estimaciones de datos *in situ*.

En (Piracha, 2023) se utilizó este formalismo, llamado formalismo cinemático, para estimar los flujos de masa asociados a la formación de aguas profundas desde la

superficie del mar. Para la temperatura de la superficie del mar se utilizaron datos de OSTIA de nivel 4 diarios, reducidos a una resolución de 0.25º; para la salinidad, el producto global de nivel 4 generado por el BEC, 0.25º y un día; para las corrientes superficiales, el producto OSCAR de la NASA también a 0.25º de promedios diarios, y para la profundidad de la capa de mezcla el producto de JAMSTEC de 1º derivado de datos in situ (derivadores-perfiladores Argo). Este primer trabajo demostró la factibilidad de estimar flujos a través de la superficie oceánica incorporando solamente datos de observación del mar, sin incluir datos atmosféricos, y mayoritariamente proveniente de fuentes de teledetección.

4. ¿SE PUEDE ESTIMAR LA INTENSIDAD DE LA AMOC A PARTIR DE MEDIDAS DE LA SUPERFICIE DEL OCÉANO?

En (Desbruyères, 2019), usando datos de simulaciones numéricas del océano, se mostró que se puede relacionar la circulación forzada en superficie (SFOC), que se estima con derivadas de variables de la superficie, con la intensidad de la AMOC.

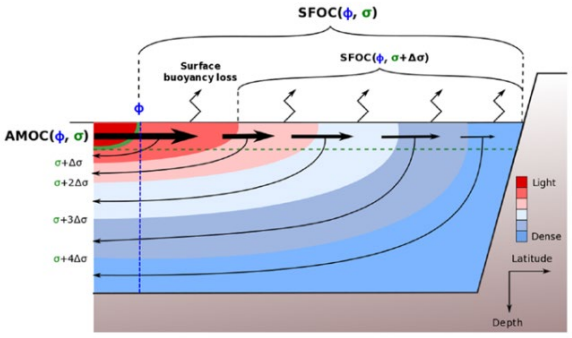


Figura 3. Relación entre la circulación forzada en superficie (SFOC) y la intensidad de la AMOC. Extraído de la figura 1 en (Desbruyères, 2019).

La clave es determinar las isopicnas superficiales asociadas a la densidad del agua transportada con la AMOC. La intensidad de la AMOC se puede calcular por tanto como:

$$\Phi(\rho_0) = \iint_{C_{\rho_0}} h(\vec{x})\, D\rho(\vec{x})\; d\vec{x} \qquad (2)$$

donde ρ_0 es la densidad característica del agua asociada a la AMOC y C_{ρ_0} es el contorno en la superficie del mar formado por los puntos con esa densidad (isopicna).

Como se muestra en (Desbruyéres, 2019), al comparar los datos la SFOC con los de la AMOC en algún transecto habitual como el formado por la red de boyas OSNAC, se ve un desfase temporal en años correspondiente al tiempo que tarda la señal de superficie en propagarse hasta la latitud de la red (en el caso de OSNAC, 5 años). Esto evidencia otro de los intereses de estimar la fuerza de la AMOC a partir de los datos de teledetección, y es que podemos observar estos cambios mucho antes de que las actuales redes instrumentales puedan reportarlo, lo cual da más opciones a una respuesta inmediata.

5. LIMITACIONES ACTUALES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

La limitación más importante es la de la calidad de los datos de teledetección y la imposibilidad de obtener una fuente de datos de teledetección y de alta resolución espacio-temporal de la profundidad de la capa de mezcla. Respecto a lo primero, nuestros trabajos preliminares (ver contribución por Bergas *et al*. en este mismo congreso) muestran que el nivel de ruido en SSS, SST, corrientes y MLD limitan al resolución espacial efectiva de los flujos verticales, incluyendo el flujo de masa asociado a la AMOC, a unos 100 kilómetros de resolución espacial y unos 9 días en resolución temporal, y un error relativo del 20%. Aunque ésa sea una resolución bastante grosera, es más que suficiente para estudios de carácter climático como es la caracterización de los cambios de la AMOC; es más, son valores mucho más resueltos que las actuales estimaciones basadas en datos atmosféricos e integración con modelos numéricos del océano.

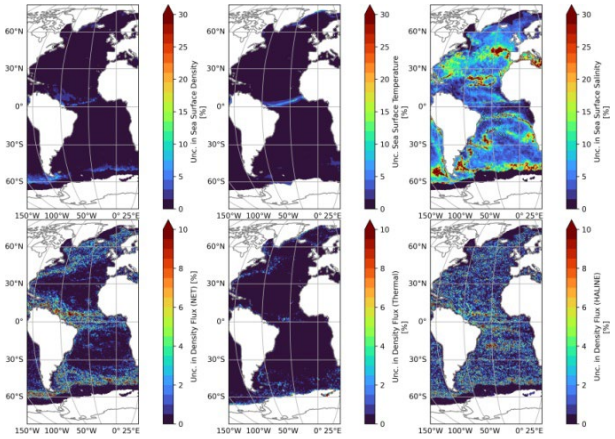


Figura 4. Incertidumbre relativa en las componentes del flujo de masa estimada con datos de teledetección adaptado de (Piracha, 2023, 2024). Izquierda: total; centro: componente térmica; derecha: componente halina.

Sin embargo, de caras al futuro sería ideal poder mejorar la resolución para poder caracterizar los procesos de formación de aguas profundas. Resulta que la formación de aguas profundas es fuertemente intermitente y muy dispersa en el espacio, lejos de la simplificación conceptual que se usa siempre (ver Figura 1). La variable donde se tiene que incidir más, por sus limitaciones de adquisición actuales, es la salinidad. En el corto plazo tenemos la misión CIMR, que incorporará un radiómetro en banda L que debería servir para mejorar las actuales estimaciones de la salinidad con la europea SMOS, la americana SMAP y la china COSM. A medio plazo, la misión candidata a Earth Explorer 12 CryoRad incorporará, si es seleccionada, medidas continuas en la banda de 0.5 a 2 GHz, que corresponde con el rango de frecuencias en el que la señal radiométrica tiene la máxima sensibilidad a la salinidad. Y a largo plazo, la apuesta principal es por SAILIN, un interferómetro de

apertura sintética en banda L formado por tres antenas hexagonales que se desplegarían en tres plataformas satelitales que volarían en formación, y que nos permitirían alcanzar una resolución real de 15 km con una precisión mucho mejor que la actual.

La estimación por medios de teledetección de la profundidad de la capa de mezcla requiere de unos desarrollos conceptuales aún inexistentes. Posibles estrategias instrumentales/metodológicas incluyen el uso de LIDAR, el procesamiento conjunto de información multiespectral para estimar la profundidad óptica y los cambios de turbidez asociados al proceso de mezcla vertical, y otras aproximaciones más sofisticadas y especulativas, como la caracterización de la profundidad de la capa de mezcla por la curvatura local en el rango de la submesoescala de las isolíneas de ciertas variables oceánicas. El objetivo sería obtener un producto repetitivo, sinóptico, con una resolución de 0.25º y una precisión relativa de al menos el 20%.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos revisado tanto las capacidades actuales de teledetección relacionadas con el monitoreo de la AMOC como los desarrollos metodológicos necesarios para esta monitarización, en los cuales nuestro grupo, el Barcelona Expert Center, ha tenido una contribución muy destacada. Hemos visto que las variables físicas de la superficie del océano obtenidas por medios de teledetección ofrecen información suficiente para reconstruir los procesos de formación de aguas profundas y a través de ellos saber qué está pasando con la AMOC y otros procesos claves del océano. La principal limitación a día de hoy es el nivel de error de los datos de partida, pero incluso contando con eso la ganancia respecto al conocimiento actual, tanto en resolución espacio-temporal como en la precisión de la descripción de los procesos es muy grande.

Este trabajo ha evidenciado el gran potencial de una nueva disciplina, la Oceanografía Analítica por Satélite, en la cual se aplican directamente las ecuaciones de la física oceánica a los datos de teledetección para obtener una mejor estimación de variables clave como los flujos de calor y agua dulce, o los ritmos de transformación de aguas. Este enfoque permite ir más allá del paradigma de la utilización de modelos numéricos y sacar mucho más provecho de un tesoro acumulado durante décadas de datos de teledetección, cuyo uso ha sido más cualitativo que cuantitativo.

Gracias a las iniciativas de la Agencia Espacial Europea para la mejora de la explotación de los datos satelitales, a través de los contratos ARCTIC FLOW y CCI Ocean Surface Heat Flux, se está abriendo una puerta a la mejora de la comprensión de los procesos tan intensos que está experimentando el océano en los últimos años, y que no se limitan a la AMOC, sino a todo tipos de procesos, desde los cambios del estado del Océano Austral (Silvano, 2025) como la detención repentina del afloramiento del Golfo de Panamá o la sobrerrecurrencia de El Niño.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto EO4TIP de la Agencia Estatal de Investigación (PID2023-149659OB-C21) y por los contratos ARCTIC FLOW y CCI OSHF de la Agencia Espacial Europea. Los autores forman parte del Instituto de Ciencias del Mar, acreditado como Centro de Excelencia “Severo Ochoa” CEX-2024-001494-S por la Agencia Estatal de Investigación.

8. REFERENCIAS

Desbruyères, D. G., Mercier, H., Maze, G., and Daniault, N. (2019). Surface predictor of overturning circulation and heat content change in the subpolar North Atlantic, *Oc. Sci., 15*, 809–817, https://doi.org/10.5194/os-15-809-2019.

Groeskamp, J., Griffies, S. M., Iudicone, D., Marsh, R., Nurser, A.G., Zika, J.D. (2019). The Water MassTransformation Framework for Ocean Physics and Biogeochemistry. *Annu*. *Rev. Mar. Sci. 11*:21.1–21.35.

Pawlowicz, R., et al. (2012). The TEOS-10 Gibbs Function and Its Thermodynamic Properties. *J. Phys. Ocean*.

Piracha A, Olmedo E, Turiel A, Portabella M and González-Haro C (2023). Using satellite observations of ocean variables to improve estimates of water mass (trans)formation. *Front. Mar. Sci. 10*:1020153.

Piracha, A. M. (2024). Updated framework for inferring interior ocean circulation from high resolution marine satellite observations. Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.

Rahmstorf, S. (2024). Is the Atlantic overturning circulation approaching a tipping point? *Oceanography*, https://doi.org/10.5670/oceanog.2024.501

Silvano, A., Narayanan A., Catany, R., Olmedo, E., González-Gambau, V., Turiel, A., Sabia, R., Mazloff, M.R., Spira, T, Haumannh, F.A. , and Naveira Garabato, A.C. (2025). Rising surface salinity and declining sea ice:Ocean state revealed by satellites. Proc. Nat. *Ac. Sci. 122*, e2500440122.

Turiel A., Isern-Fontanet J. y González-Haro C. Estructura e información en teledetección oceánica: de la fusión de datos a la identificación de puntos de inflexión climáticos. Teledetección y CambioGlobal: Retos y Oportunidades para un Crecimiento Azul. 2024, Cádiz. ISBN: 978-84-9828-941-1

van Westen, R.M., Kliphuis, M., & Dijkstra, H.A. (2024). Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course. *Sci. Adv. 10*, eadk1189

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.170

Teledetección con drones y satélites para la monitorización medioambiental de la Antártida

Navarro Almendros, Gabriel [1] **Román Vázquez, Alejandro** [1] **Tovar Sánchez, Antonio** [1]

[1] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAC-CSIC), España

ORCID: Navarro Almendros 0000-0002-8919-0060 Román Vázquez 0000-0002-8868-9302 Tovar Sánchez 0000-0003-4375-1982

Correspondencia: gabriel.navarro@csic.es a.roman@csic.es a.tovar@csic.es

RESUMEN

La Antártida constituye un laboratorio natural excepcional para comprender las respuestas del sistema climático terrestre ante el calentamiento global. Sin embargo, la monitorización de sus ecosistemas resulta particularmente compleja debido a las condiciones meteorológicas extremas y la inaccesibilidad del territorio. En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) y la teledetección satelital se han consolidado como herramientas fundamentales para la investigación polar. Este trabajo presenta los principales avances obtenidos mediante la integración de sensores embarcados en drones (ópticos RGB, multiespectrales, hiperespectrales, térmicos y LiDAR) junto con imágenes del satélite Sentinel-2, en diversas campañas antárticas realizadas en las islas Shetland del Sur entre 2022 y 2025. Los resultados abarcan tres líneas de investigación complementarias: (i) la generación de conjuntos de datos topográficos y fotogramétricos de alta resolución a escala centimétrica, que cubre los ~35 km del anillo costero de la bahía de Port Foster en Isla Decepción; (ii) la estimación de la abundancia poblacional del pingüino barbijo mediante arquitecturas de aprendizaje profundo aplicadas a ortomosaicos de UAV en la colonia de Collado Vapor; y (iii) la detección y cuantificación de floraciones de algas rojas de nieve en los campos nevados costeros del archipiélago, combinando imágenes hiperespectrales de dron con clasificación supervisada de imágenes Sentinel-2. Estos estudios evidencian el potencial de la teledetección aerotransportada y satelital para ampliar la capacidad de observación en regiones polares, reduciendo la perturbación sobre los hábitats vulnerables y generando información esencial para evaluar los efectos del cambio climático en el ecosistema antártico.

Palabras clave: *Antártida, UAV, LiDAR, Sentinel-2, teledetección*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Teledetección con drones y satélites para la monitorización medioambiental de la Antártida

Navarro Almendros, Gabriel [(1)], Román Vázquez, Alejandro [(1)], Tovar Sánchez, Antonio [(1)]

[(1)] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN-CSIC), España.

0000-0002-8919-0060, gabriel.navarro@csic.es ; 0000-0002-8868-9302, a.roman@csic.es.

0000-0003-4375-1982, a.tovar@csic.es.

Resumen: La Antártida constituye un laboratorio natural excepcional para comprender las respuestas del sistema climático terrestre ante el calentamiento global. Sin embargo, la monitorización de sus ecosistemas resulta particularmente compleja debido a las condiciones meteorológicas extremas y la inaccesibilidad del territorio. En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) y la teledetección satelital se han consolidado como herramientas fundamentales para la investigación polar. Este trabajo presenta los principales avances obtenidos mediante la integración de sensores embarcados en drones (ópticos RGB, multiespectrales, hiperespectrales, térmicos y LiDAR) junto con imágenes del satélite Sentinel-2, en diversas campañas antárticas realizadas en las islas Shetland del Sur entre 2022 y 2025. Los resultados abarcan tres líneas de investigación complementarias: (i) la generación de conjuntos de datos topográficos y fotogramétricos de alta resolución a escala centimétrica, que cubre los ~35 km del anillo costero de la bahía de Port Foster en Isla Decepción; (ii) la estimación de la abundancia poblacional del pingüino barbijo mediante arquitecturas de aprendizaje profundo aplicadas a ortomosaicos de UAV en la colonia de Collado Vapor; y (iii) la detección y cuantificación de floraciones de algas rojas de nieve en los campos nevados costeros del archipiélago, combinando imágenes hiperespectrales de dron con clasificación supervisada de imágenes Sentinel-2. Estos estudios evidencian el potencial de la teledetección aerotransportada y satelital para ampliar la capacidad de observación en regiones polares, reduciendo la perturbación sobre los hábitats vulnerables y generando información esencial para evaluar los efectos del cambio climático en el ecosistema antártico.

Palabras clave: Antártida, UAV, LiDAR, Sentinel-2, teledetección

Drone and satellite remote sensing for Antarctic environmental monitoring

***Abstract**: Antarctica is an exceptional natural laboratory for understanding the responses of the Earth's climate system to global warming. However, monitoring its ecosystems is particularly challenging due to extreme weather conditions and territorial inaccessibility. In this context, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and satellite remote sensing have become essential tools for polar research. This work presents the main advances obtained through the integration of drone-mounted sensors (optical RGB, multispectral, hyperspectral, thermal, and LiDAR) together with Sentinel-2 satellite imagery, across several Antarctic campaigns conducted in the South Shetland Islands between 2022 and 2025. The results cover three complementary research lines: (i) the generation of high-resolution topographic and photogrammetric datasets at centimeter scale, including the FosterCoast repository covering the ~35 km coastal ring of Port Foster Bay on Deception Island; (ii) the estimation of chinstrap penguin population abundance using deep-learning architectures applied to UAV orthomosaics at the Vapour Col colony; and (iii) the detection and quantification of red snow algae blooms on the archipelago's coastal snowfields, combining drone-based hyperspectral imagery with supervised classification of Sentinel-2 images. These studies demonstrate the potential of airborne and satellite remote sensing to expand observational capabilities in polar regions, while minimizing disturbance to vulnerable habitats and providing essential information for assessing the effects of climate change on the Antarctic ecosystem.*

***Keywords**: Antarctica, UAV, LiDAR, Sentinel-2, remote sensing*

1. INTRODUCCIÓN

La Antártida, junto con el océano Austral que la rodea, se encuentra entre las regiones del planeta más sensibles al cambio climático (Meredith *et al*., 2019). Entender la dinámica de sus ecosistemas constituye un reto científico de primer orden para anticipar y mitigar riesgos tanto a escala regional como global. No obstante, la lejanía, las condiciones meteorológicas adversas y la orografía accidentada de estas regiones limitan considerablemente la aplicación de técnicas convencionales de observación terrestre.

En las últimas décadas, la teledetección satelital ha permitido importantes avances en el conocimiento de los ecosistemas polares. Sin embargo, las imágenes de muy alta resolución presentan restricciones significativas en la Antártida Marítima, derivadas de la cobertura nubosa casi permanente, los elevados costes de adquisición y la irregularidad temporal de las capturas (Pina y Vieira, 2022).

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs o drones) se han posicionado como plataformas intermedias entre la observación satelital y los muestreos de campo, proporcionando una alternativa ágil, económica y de mínima intrusión sobre la fauna. Gracias a la fotogrametría *Structure-from-Motion* (SfM) y a la integración de sensores LiDAR, es posible generar ortomosaicos georreferenciados con precisión centimétrica, modelos digitales de elevación (DEMs) y nubes de puntos tridimensionales de gran densidad (Tovar-Sánchez *et al*., 2021). Por otra parte, la sinergia entre datos hiperespectrales de drones y las imágenes multiespectrales del satélite Sentinel-2 permite abordar estudios a escalas complementarias.

Este trabajo sintetiza los principales resultados obtenidos a lo largo de varias campañas antárticas españolas (2021-2025) en las islas Shetland del Sur (Figura 1). Se presentan tres líneas de investigación complementarias: la creación de repositorios topográficos de referencia, la estimación poblacional de pingüinos barbijo mediante aprendizaje profundo y la cartografía de floraciones de algas rojas de nieve mediante teledetección multiescalar.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

El área de trabajo comprende las islas Decepción y Livingston, pertenecientes al archipiélago de las Shetland del Sur. Decepción (Smith *et al*., 2003), emplazada entre 62°53′ - 63°01′S y 60°29′ - 60°45′W, representa el centro volcánico con mayor actividad de toda la región. En su interior se encuentra la bahía de Port Foster, una caldera inundada de 8 a 10 km de diámetro que se comunica con el océano abierto mediante el estrecho conocido como fuelles de Neptuno. El paisaje insular refleja la interacción entre procesos volcánicos y glaciares, con aproximadamente un 57 % del territorio ocupado por masas de hielo y materiales piroclásticos. La zona interna de la caldera concentra la actividad geotermal más intensa, registrándose temperaturas del suelo superiores a 110 °C en determinados puntos (ej. fumarolas). Junto a estas singularidades geológicas, la isla sustenta comunidades de briófitas termófilas y dos colonias relevantes de pingüino barbijo en Collado Vapor y Morro Baily (Belyaev *et al*., 2024).

Por su parte, Livingston (62°27′ - 62°48′S, 59°45′ - 61°15′W) constituye la segunda isla en extensión del archipiélago y exhibe una notable riqueza biológica, particularmente en las superficies libres de hielo estacional. La Península Hurd, donde se ubica la Base Antártica Española Juan Carlos I, destaca por su heterogeneidad tanto geológica como ecológica, con presencia de agrupaciones de pingüinos y una cobertura vegetal diversificada.

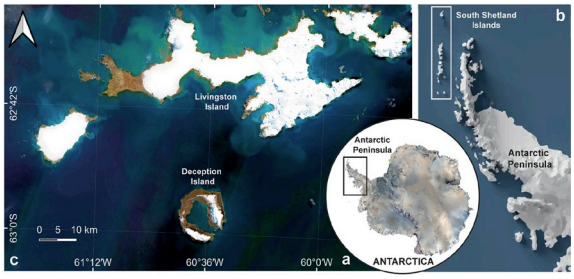


Figura 1. Mapa que muestra las ubicaciones de: (a) la Península Antártica en una vista general, (b) las Islas Shetland del Sur en la Península Antártica; y (c) escena Sentinel 2A de las islas Decepción y Livingston el 17 de marzo de 2023.

2.2. Drones y sensores

Para los diferentes estudios se emplearon plataformas aéreas no tripuladas: El cuadricóptero DJI Matrice 300 RTK equipado con sensores ópticos RGB (Zenmuse P1), multiespectrales (MicaSense RedEdge-MX), LiDAR (Zenmuse L1 y L2); el DJI Mavic 2 Enterprise Advanced con sensor RGB de 48 MP; y el hexacóptero DJI Matrice 600 Pro con sensor hiperespectral (Headwall Photonics VNIR-SWIR). La georreferenciación se realizó mediante tecnología RTK y Post-Processing Kinematic (PPK), alcanzando precisiones centimétricas sin necesidad de puntos de control terrestre. Los productos fotogramétricos se generaron con los softwares *Pix4D Mapper* y *DJI Terra*, mientras que el procesado hiperespectral se realizó con *SpectralView* y *ENVI*.

A escala satelital, se utilizaron imágenes Sentinel-2 Level 2A con resolución de 10 m, procesadas a través de *Google Earth Engine*. La detección de floraciones de algas rojas combinó una biblioteca espectral derivada de los datos hiperespectrales del dron con algoritmos de clasificación supervisada (*Spectral Angle Mapper* y *Support Vector Machine*) aplicados a las imágenes multiespectrales. Para el censo de pingüinos, se empleó la arquitectura de detección de objetos YOLOv8, entrenada con un conjunto de 349 imágenes anotadas a partir de los ortomosaicos de UAV, diferenciando individuos adultos y polluelos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Repositorios fotogramétricos y LiDAR

Los conjuntos de datos generados comprenden dos repositorios públicos de referencia. El primero,

ShetlandsUAVmetry (Román *et al*., 2024), recopila los productos fotogramétricos de 28 vuelos de UAV realizados durante la campaña 2021-2022, con un total de 15.691 capturas ópticas de alta resolución en las islas Decepción y Livingston (Figura 2), constituyendo el primer repositorio fotogramétrico basado en UAV de acceso abierto para un área antártica.

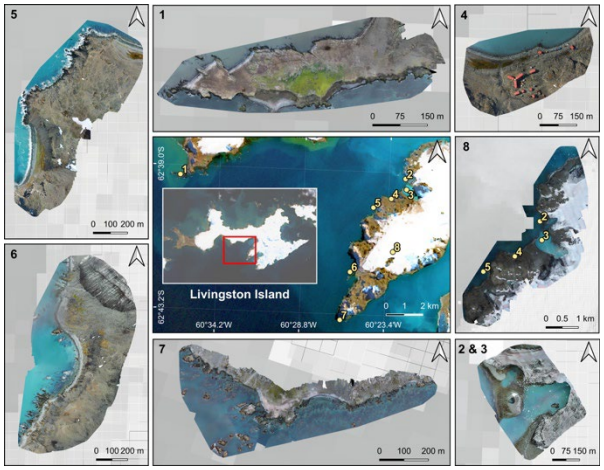


Figura 2. Resumen de los ortomosaicos ópticos RGB generados tras el proceso fotogramétrico para cada zona de estudio en la Isla Livingston (panel central, escena S2A de la Isla Livingston del 17/03/2023). 1) Punta Hannah, 2) Cresta Charrúa, 3) Johnsons Dock, 4) BAE Juan Carlos I, 5) Caleta Argentina, 6) Sally Rocks, 7) Miers Bluff y 8) Península Hurd.

El segundo repositorio, *FosterCoast* (Román *et al*., 2025a), recoge los datos LiDAR y fotogramétricos de 13 vuelos que cubren íntegramente el anillo interior de la bahía de Port Foster (~35 km), realizado durante la campaña 2024-2025 (Figura 3). Este conjunto incorpora 5.631 capturas RGB con posicionamiento PPK, ortomosaicos con resolución media de 4,7 cm/px, DEMs y nubes de puntos con densidad de 20 cm. La validación frente al modelo de referencia REMA arrojó un RMSE de 1,124 m y un R^2 de 0,99, confirmando la idoneidad del conjunto de datos para aplicaciones geomorfológicas, glaciológicas y de seguridad en la navegación.

3.2. Censo de pingüino barbijo mediante aprendizaje profundo

El modelo YOLOv8 aplicado en la colonia de Collado Vapor (Isla Decepción, Figura 4) detectó 12.097 ± 1.573 individuos adultos y 12.357 ± 3.090 polluelos, con errores totales del ~13 % y ~25 % respectivamente (Belyaev *et al*., 2024). Dado que el vuelo se realizó en enero de 2022 —fuera del pico de puesta—, se aplicó un modelo estocástico de corrección fenológica basado en fechas de inicio de puesta, obteniéndose una estimación de entre 13.250 y 22.000 parejas reproductoras durante la temporada 2021-2022, cifra coherente con censos previos. Adicionalmente, la modelización de escorrentías superficiales a partir del DEM permitió identificar cinco rutas principales de descarga de guano al medio marino, proporcionando información para el establecimiento de estaciones de muestreo biogeoquímico costero.

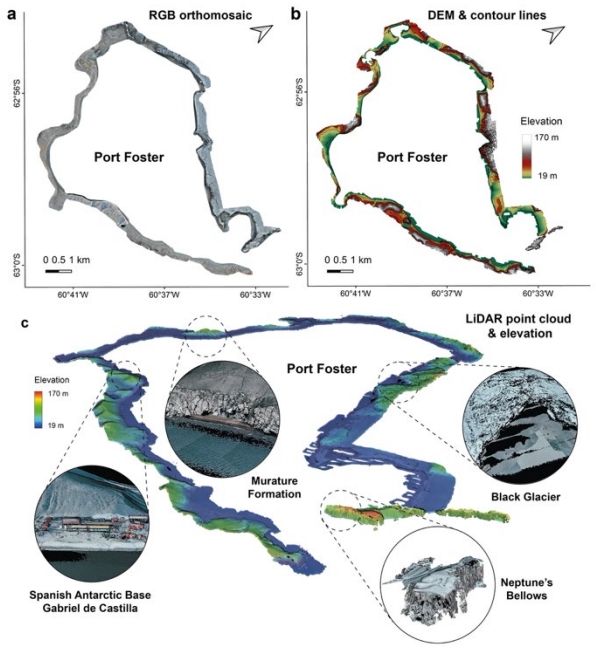


Figura 3. Mapas del anillo interior completo de Port Foster en Isla Decepción: (a) ortomosaico RGB; (b) DEM y curvas de nivel; (c) nube de puntos LiDAR con elevaciones superpuestas.

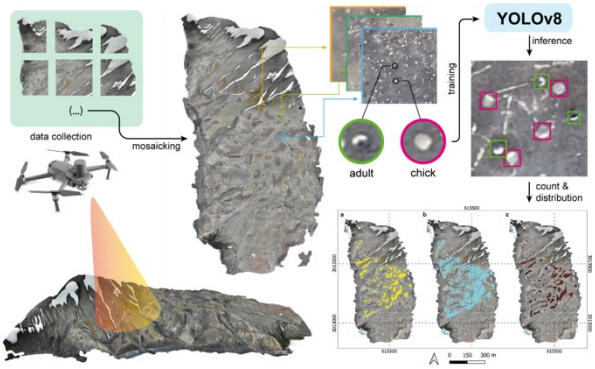


Figura 4. Descripción esquemática del censo de pingüinos mediante la combinación de UAV y aprendizaje profundo. a) Recopilación de los datos fotográficos con el UAV y generación del ortomosaico. b) Selección de áreas representativas dentro de la colonia para crear un conjunto de datos de entrenamiento, incluyendo adultos y polluelos de pingüino barbijo sobre distintos tipos de sustrato para añadir variabilidad. c) Desplegado de modelo sobre la totalidad del ortomosaico de la colonia, obteniéndose el recuento y la distribución espacial de cada individuo.

3.3. Floraciones de algas rojas de nieve

El análisis de 45 escenas Sentinel-2 libres de nubes entre 2018 y 2024 reveló que las floraciones de algas rojas pueden cubrir hasta el 12% de la superficie total de una isla individual del archipiélago durante la temporada de crecimiento, equivalente a unos 176 km² (Román *et al*., 2025b). La comunidad microalgal, dominada por *Sanguina nivaloides* (61%) y la diatomea *Nitzschia amplectens* (26%), reduce el albedo de la nieve hasta un 20 %, acelerando la fusión de campos de nieve costeros

(Figura 5). La distribución espacial de estas floraciones forma un patrón anular en torno a las costas insulares (Figura 6), posiblemente vinculado al aporte de nutrientes procedentes de colonias de pingüinos y mamíferos marinos. Estos resultados subrayan la relevancia de las algas de nieve como productores primarios fotoautotróficos extensivos en la Antártida y su papel en los mecanismos de retroalimentación climática.

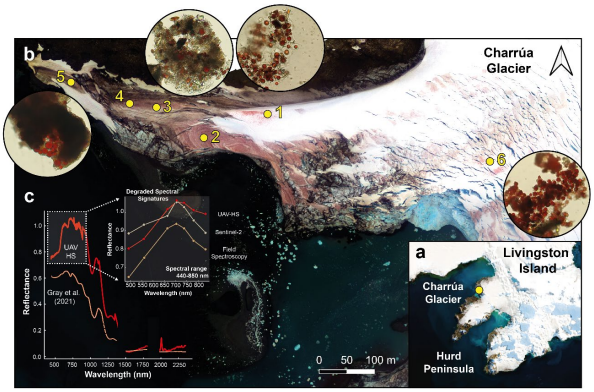


Figura 5. a) Mapa del Glaciar Charrúa en la Península Hurd, Isla Livingston, basado en una imagen Sentinel-2A del 17/03/2023. b) Ortomosaico RGB obtenido con dron en el Glaciar Charrúa el 6/03/2022, con puntos amarillos numerados que señalan las localizaciones de muestreo. c) Firma espectral media de la floración de algas rojas de nieve obtenida a partir de imágenes hiperespectrales de dron (línea rojo oscuro) y espectros de campo recogidos por Gray et al. (2021) (línea rojo claro).

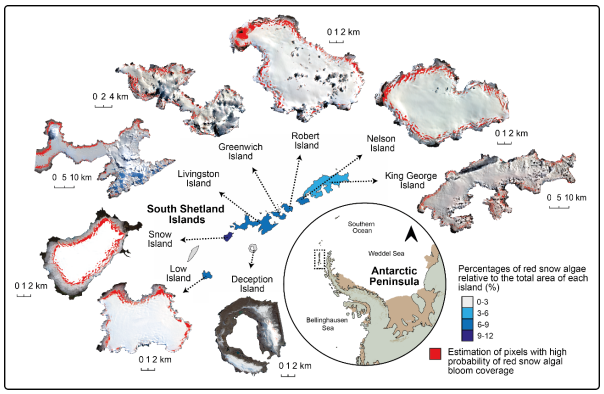


Figura 6. Extensión representativa de las floraciones de algas rojas de nieve con una superposición de clasificación supervisada en las Islas Shetland del Sur, mostrando una escena libre de nubes para cada isla correspondiente al período de máximo crecimiento dentro del periodo de estudio. Los porcentajes de cobertura de floraciones algales respecto a la superficie total de cada isla se presentan en el mapa central

4. CONCLUSIONES

Los resultados presentados demuestran que la combinación de plataformas UAV con teledetección satelital constituye un enfoque robusto y escalable para la investigación medioambiental antártica. Los repositorios fotogramétricos y LiDAR de acceso abierto generados representan recursos de referencia para la comunidad polar internacional, mientras que las aplicaciones de aprendizaje profundo y clasificación supervisada abren nuevas posibilidades para el seguimiento automatizado de fauna y fenómenos biogeoquímicos en ecosistemas remotos. La continuidad de estas series temporales resultará esencial para evaluar la evolución de los ecosistemas antárticos bajo los distintos escenarios de cambio climático.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por los proyectos RTI2018-098048B-100 (PiMetAn) y PID2021-1257830B-100 (DICHOSO) de la AEI, PIE 202530E177 (TAMIMAR) y MMT24-ICMAN-01 (DIGIDRON). A. Román, personal contratado bajo la iniciativa Generación D, promovida por Red.es, organismo adscrito al MTDFP, destinada a la atracción y retención de talento mediante becas y contratos de formación, financiada por el PRTR a través de los fondos *Next Generation* de la UE.

6. REFERENCIAS

Belyaev, O., Román, A., Belliure, J., Navarro, G., Barbero, L., y Tovar-Sánchez, A. (2024). Assessing topographic features and population abundance in an Antarctic penguin colony through UAV-based deep-learning models. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 134, 104124. https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104124

Meredith, M. et al. (2019). Polar regions. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/

Pina, P. y Vieira, G. (2022). UAVs for Science in Antarctica. *Remote Sensing, 14*, 1610. https://doi.org/10.3390/rs14071610

Román, A., Tovar-Sánchez, A., Olivé-Abelló, A., y Navarro, G. (2024). ShetlandsUAVmetry: unmanned aerial vehicle-based photogrammetric dataset for Antarctic environmental research. *Scientific Data, 11*, 202. https://doi.org/10.1038/s41597-024-03045-1

Román, A., Tovar-Sánchez, A., Larrad, M., Alva, F., y Navarro, G. (2025a). LiDAR-based topographic data for the coastline of Port Foster (Deception Island, Antarctica). *Scientific Data, 12*, 1363. https://doi.org/10.1038/s41597-025-05726-x

Román, A., Navarro, G., Barbero, L., Fernández-Marín, B., García-Plazaola, J. I., González-Ortegón, E., Caballero, I., y Tovar-Sánchez, A. (2025b). Unveiling the large coverage of red snow algae blooms in Antarctic coastal snowfields. *Communications Earth & Environment, 7*, 53. https://doi.org/10.1038/s43247-025-03156-6

Smith, K., Baldwin, R., Kaufmann, R., y Sturz, A. (2003). Ecosystem Studies at Deception Island, Antarctica: An Overview. Deep-Sea Research II, 50, 1595-1609. https://doi.org/10.1016/S0967-0645(03)00081-X

Tovar-Sánchez, A., Román, A., Roque-Atienza, D., y Navarro, G. (2021). Applications of unmanned aerial vehicles in Antarctic environmental research. *Scientific Reports, 11*, 21717. https://doi.org/10.1038/s41598-021-01228-z

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.193

Nuevas estimaciones satelitales de flujos oceánicos superficiales

Bergas Ques, Joan [1] **Ruiz Sebastián, Arnau** [1] **González Gambau, Verónica** [1] **Turiel Martínez, Antonio** [1] **Arias Ballesteros, Manuel** [2] **Sagués Carracedo, Ana** [2] **Olmedo Casal, Estrella** [1]

[1] Barcelona Expert Center (BEC) & Instituto de Ciencias del Mar (ICM), CSIC

[2] Zenithal Blue Technologies (ZBT)

ORCID: Bergas Ques 0009-0006-3909-2266 Ruiz Sebastián 0009-0002-7596-9185 González Gambau 0000-0002-6380-3754 Turiel Martínez 0000-0001-6103-224X Arias Ballesteros 0000-0002-1951-1105 Sagués Carracedo 0000-0002-3498-2167 Olmedo Casal 0000-0002-3178-1554

Correspondencia: jbergas@icm.csic.es arnauruiz@icm.csic.es vgonzalez@icm.csic.es turiel@icm.csic.es m.arias@zenithalblue.com a.sagues@zenithalblue.com olmedo@icm.csic.es

RESUMEN

Este estudio presenta una aproximación cinemática para la estimación de flujos superficiales del océano (salinidad, densidad y calor) utilizando principalmente datos de teledetección, proponiéndola como alternativa a los modelos y estimaciones tradicionales basados en aproximaciones termodinámicas de interacción atmósfera-océano. Metodológicamente, la aproximación cinemática calcula la derivada material de las variables observadas integradas en la capa de mezcla. Esto permite capturar simultáneamente las interacciones entre la capa superficial del océano y la atmósfera y el impacto de la dinámica de la capa de mezcla. La comparación con modelos (FESOM2 y ERA5) muestra una sólida concordancia en patrones de gran escala. Sin embargo, a escalas temporales diarias aparecen diferencias significativas. La parte espacialmente incoherente de estas diferencias está asociada a los errores en las medidas satelitales. Lo que es más interesante, otra parte de estas diferencias está asociada a fenómenos geofísicos de alta frecuencia, como el forzamiento del viento, señal que capturan las medidas satelitales pero que no se refleja de manera precisa en las salidas de los modelos.

Palabras clave: *Oceanografía Analítica por Satélite, derivada material, interacción atmósfera-océano*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Nuevas estimaciones satelitales de flujos oceánicos superficiales

Bergas Ques, Joan [(1)], Ruiz Sebastián, Arnau [(1)], González Gambau, Verónica [(1)], Turiel Martínez, Antonio [(1)], Arias Ballesteros, Manuel [(2)], Sagués Carracedo, Ana [(6)], Olmedo Casal, Estrella [(1)]

[(1)] Barcelona Expert Center (BEC) & Instituto de Ciencias del Mar (ICM), CSIC.
0009-0006-3909-2266, jbergas@icm.csic.es ; 0009-0002-7596-9185, arnauruiz@icm.csic.es
0000-0002-6380-3754, vgonzalez@icm.csic.es ; 0000-0001-6103-224X, turiel@icm.csic.es
0000-0002-3178-1554, olmedo@icm.csic.es.

[(2)] Zenithal Blue Technologies (ZBT).
0000-0002-1951-1105, m.arias@zenithalblue.com ; 0000-0002-3498-2167, a.sagues@zenithalblue.com

Resumen: Este estudio presenta una aproximación cinemática para la estimación de flujos superficiales del océano (salinidad, densidad y calor) utilizando principalmente datos de teledetección, proponiéndola como alternativa a los modelos y estimaciones tradicionales basados en aproximaciones termodinámicas de interacción atmósfera-océano. Metodológicamente, la aproximación cinemática calcula la derivada material de las variables observadas integradas en la capa de mezcla. Esto permite capturar simultáneamente las interacciones entre la capa superficial del océano y la atmósfera y el impacto de la dinámica de la capa de mezcla. La comparación con modelos (FESOM2 y ERA5) muestra una sólida concordancia en patrones de gran escala. Sin embargo, a escalas temporales diarias aparecen diferencias significativas. La parte espacialmente incoherente de estas diferencias está asociada a los errores en las medidas satelitales. Lo que es más interesante, otra parte de estas diferencias está asociada a fenómenos geofísicos de alta frecuencia, como el forzamiento del viento, señal que capturan las medidas satelitales pero que no se refleja de manera precisa en las salidas de los modelos.

Palabras clave: Oceanografía Analítica por Satélite, derivada material, interacción atmósfera-océano.

Novel satellite-based estimates of ocean fluxes

***Abstract**: This study presents a kinematic approach for estimating ocean surface fluxes (salinity, density, and heat) using primarily remote-sensing data, proposed as an alternative to traditional model-based and thermodynamic approaches to air–sea interaction. Methodologically, the kinematic approach computes the material derivative of the observed variables integrated over the mixed layer. This formulation enables the simultaneous capture of interactions between the ocean surface layer and the atmosphere, as well as the impact of mixed-layer dynamics. Comparison with model outputs (FESOM2 and ERA5) shows strong agreement in large-scale patterns. However, significant differences emerge in daily timescales. The spatially incoherent component of these differences is associated with errors in satellite measurements. More interestingly, another component is linked to high-frequency geophysical processes, such as wind forcing, which are captured by satellite observations but are not accurately represented in model outputs.*

***Keywords**: Satellite-based Analytic Oceanography, material derivative, sea-atmosphere interaction*

1. INTRODUCCIÓN

Los mapas de variables oceánicas (p. ej. salinidad, temperatura, corrientes) obtenidos mediante teledetección representan el estado del océano en un tiempo dado, lo que permite estudiar características geofísicas como gradientes, frentes, máximos, mínimos y anomalías de la distribución resultante.

Por otra parte, los flujos de dichas variables (que pueden también ser derivados a partir de los datos de teledetección) pueden mostrar una información adicional relacionada con la dinámica del sistema. Por ejemplo, los flujos de salinidad ofrecen información sobre los procesos de formación y fusión del hielo marino, o la evaporación y precipitación en la superficie oceánica; mientras que los flujos de densidad dan información sobre los movimientos verticales del océano y la circulación a gran escala.

Históricamente los flujos oceánicos se han calculado a partir de las ecuaciones primitivas de los procesos conocidos de interacción atmósfera-océano utilizando una aproximación termodinámica, y con datos atmosféricos provenientes de reanálisis meteorológicos (precipitación y evaporación, flujos de calor radiativos y turbulentos, etc.). En este estudio, por el contrario, se han calculado los flujos oceánicos mediante una aproximación cinemática basada en la estimación directa de la derivada material de las variables a partir de datos de teledetección. Esto permite evidenciar simultáneamente todas las interacciones atmósfera-océano (no solo las conocidas) y las interacciones de la capa superficial del océano con capas más profundas. En este estudio se mostrará cómo se calculan los flujos de densidad, de salinidad y de calor superficial del océano con la aproximación cinemática y se compararán los resultados con los obtenidos mediante la aproximación termodinámica a partir de las salidas de los modelos.

2. ESTIMACIÓN DE FLUJOS OCEÁNICOS

2.1. Estimación de flujos de salinidad

A partir de principios de conservación se puede llegar a la ecuación:

$$h\frac{Ds}{Dt} = s(E - P - R - I) + h\nabla(K\nabla s) - (s_0 - s_{-h})\left(\frac{Dh}{Dt} + w_{-h}\right) \quad (1)$$

donde s es la salinidad superficial del océano (obtenida con datos de teledetección), h es la profundidad de la capa de mezcla (Mixed Layer Depth, MLD), E es el ritmo de evaporación, P es el ritmo de precipitación, R es la escorrentía fluvial, I es el ritmo de derretimiento del hielo, K es la difusividad de la salinidad y w_{-h} es la velocidad vertical del agua en la base de la capa de mezcla.

La aproximación cinemática se basa en el cálculo de la parte izquierda de la ecuación 1: la derivada material de la salinidad superficial multiplicada por la MLD (se considera una capa de mezcla homogénea).

Dado que actualmente no hay medios de teledetección para estimar la MLD, ésta deberá calcularse con datos *in-situ* a través del análisis de perfiles verticales.

Por otro lado, la aproximación termodinámica calcula los flujos de salinidad a partir del primer término de la parte derecha de la ecuación, sin considerar los consiguientes términos de difusividad y arrastre (*entrainment*), y cualquier otro proceso físico relevante (por ejemplo, la dinámica en la interacción del hielo marino o el efecto del oleaje).

2.2. Estimación de flujos de densidad

La ecuación que rige los flujos de densidad es:

$$h\frac{D\rho}{Dt} = -\alpha\frac{Q_{net}}{C_p} + \beta\rho s\varepsilon + h\nabla(K\nabla\rho) - (\rho_0 - \rho_{-h})\left(\frac{Dh}{Dt} + w_{-h}\right) \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del agua, obtenida a partir de la salinidad y la temperatura mediante la aplicación de la ecuación termodinámica del agua del mar, TEOS10 (Feistel, 2008), α es el coeficiente de expansión térmica, Q_{net} es la suma de flujos de calor atmósfera-océano, C_p es la capacidad calorífica del agua, β es el coeficiente de contracción salina y ε es el balance de agua dulce (E-P-R-I).

De nuevo, la aproximación cinemática calcula los flujos a partir de la parte izquierda de la ecuación 2 y la aproximación termodinámica calcula los dos primeros términos del lado derecho.

2.3. Estimación de flujos de calor

La ecuación que rige los flujos de calor es:

$$h\frac{Dq}{Dt} = Q_{net} + h\nabla(K\nabla q) - (q_0 - q_{-h})\left(\frac{Dh}{Dt} + w_{-h}\right) \quad (3)$$

donde q es la densidad de calor del agua oceánica, producto de la densidad, capacidad calorífica y temperatura.

De forma análoga a los casos anteriores, la aproximación cinemática utiliza la parte izquierda de la ecuación 3 y la aproximación termodinámica el primer término del lado derecho, que incluye los flujos de calor de longitud de onda corta, onda larga, y la parametrización efectiva de los flujos turbulentos de calor latente y sensible.

2.4. Aproximación numérica

El cálculo de la derivada material se realiza mediante la advección temporal de la variable de estudio debida a las corrientes oceánicas utilizando un método de integración numérica (p. ej. método Euler, Runge Kutta, etc.).

Con esto, las derivada material se calcula con la siguiente ecuación:

$$\frac{D\gamma}{Dt} = \frac{\gamma_{teledetec} - \gamma_{advec}}{Dt} \quad (4)$$

Donde $\gamma_{teledetec}$ es la variable de estudio medida con teledetección en un tiempo (t), γ_{advec} es la variable de estudio medida en otro tiempo anterior (t- Dt) y luego advectada numéricamente por las corrientes hasta el tiempo de t, donde Dt es el intervalo temporal.

Este método precisa de una secuencia temporal de salinidad y temperatura, así como el campo de velocidades, variables que nos proporcionan los satélites.

Dado que los flujos resultantes presentan cierto nivel de ruido, en los resultados finales se ha aplicado un filtro gaussiano paso bajo para reducir el ruido espacialmente incoherente, obteniendo una resolución espacial efectiva de 100 km.

3. DATOS

Los flujos con la aproximación cinemática se han calculado usando los siguientes grupos de datos: para la temperatura de la superficie del mar se utilizaron datos

de OSTIA de nivel 4 diarios (https://doi.org/10.5067/GHOST-4FK02, (Donlon *et al*., 2012), reducidos a una resolución de 25 km; para la salinidad, el producto global de nivel 4 generado por el BEC a 25 km y un día (https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/16251, A. García-Espriu, 2026); para las corrientes superficiales, el producto AVISO de CNES también a 25km de promedios diarios(https://doi.org/10.24400/527896/a01_2020.001, (Veillard *et al*., 2024)), y para la profundidad de la capa de mezcla el producto de CORA de 0,5º (Szekely *et al*., 2025).

Los flujos con la aproximación termodinámica se han calculado a partir de datos del modelo FESOM2 (https://fesom2.readthedocs.io/en/latest/).

4. COMPARATIVA CON MODELOS

Debido a limitaciones de espacio, únicamente se muestran aquí los flujos de densidad, aunque durante la conferencia se presentarán resultados más detallados. Las Figuras 1 y 2 muestran la concordancia de los patrones a gran escala entre ambas aproximaciones tras realizar promedios mensuales y aplicar el filtrado paso bajo.

Se pueden observar diferencias, especialmente notables en los flujos con resolución diaria. Estas diferencias son debidas al diferente método de cálculo, pero también al hecho de que la aproximación cinemática puede mostrar los efectos de las capas profundas y no solo las interacciones océano-atmósfera. Además, estas interacciones cobran mayor importancia cuando la MLD disminuye, ya que el término de arrastre (*entrainment*) aumenta.

Además, los flujos obtenidos con la aproximación cinemática presentan mayor variabilidad espacial que los datos de modelo debido a la influencia de viento, tal como se observa en la comparación interanual de la figura 2.

Cabe mencionar que los resultados de la aproximación cinemática dependen en gran medida de la definición de MLD (aquí definida como la profundidad en la que la densidad potencial aumenta 0.03 Kg/m^3 respecto a la densidad potencial a los 10 m, que es un umbral un tanto arbitrario; y también se podría definir con un umbral de temperatura en lugar de densidad) y de los datos de salinidad y temperatura seleccionados de las capas profundas, además de los errores existentes todavía en los datos de teledetección.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha demostrado la viabilidad de estimar flujos a través de la superficie oceánica empleando exclusivamente datos de observación, mayoritariamente procedentes de teledetección marina, y prescindiendo de datos atmosféricos.

Los resultados obtenidos confirman que las variables físicas superficiales derivadas de satélite proporcionan información suficiente para reconstruir procesos oceánicos clave. Si bien el error instrumental en los datos de partida constituye la principal limitación actual, la mejora que esta metodología aporta al conocimiento existente es sustancial, tanto en resolución espacio-temporal como en la precisión de la descripción de los procesos físicos.

Asimismo, este estudio evidencia el gran potencial de la Oceanografía Analítica por Satélite. Esta disciplina emergente aplica directamente las ecuaciones de la física oceánica a los datos de teledetección para estimar variables críticas, como los flujos de calor y agua dulce, o las tasas de transformación de masas de agua. Este enfoque permite trascender el paradigma basado en la modelización numérica, habilitando una explotación cuantitativa del registro histórico de datos satelitales acumulado, cuyo uso previo había sido eminentemente cualitativo.

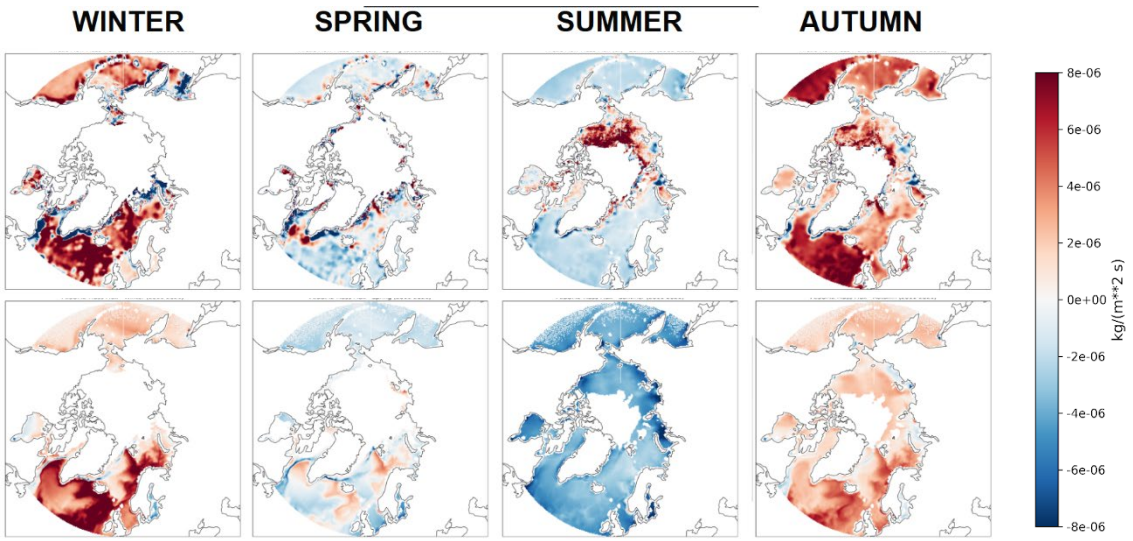


Figura 1. Flujos de densidad promediados por estaciones calculados a partir de la aproximación cinemática y usando el método Euler para la integración numérica (arriba); y flujos de densidad a partir de la aproximación termodinámica del modelo FESOM2 (abajo). Los flujos tienen unidades de kg/(m^{2}s).

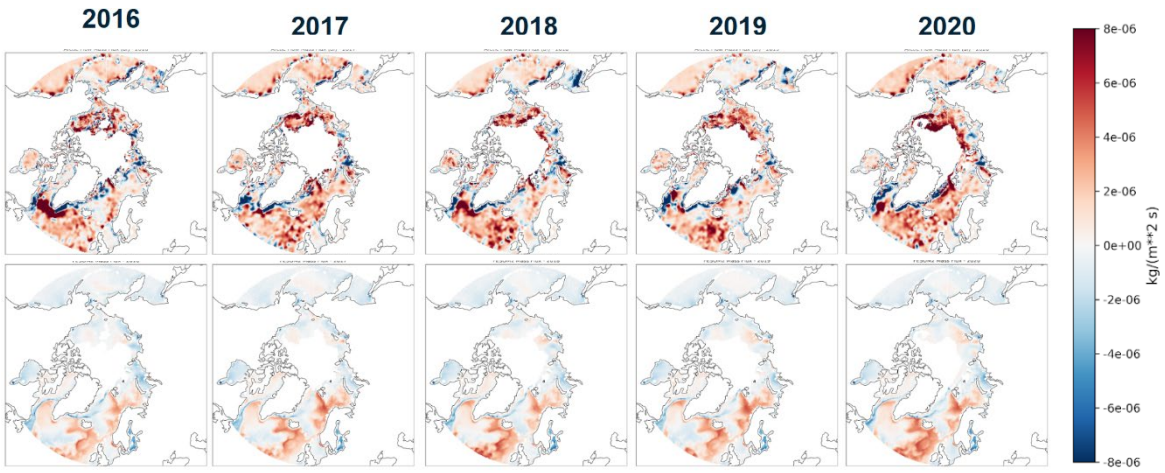


Figura 2. Flujos de densidad promediados en los años comprendidos entre 2016 y 2020 calculados a partir de la aproximación cinemática y usando el método Euler para la integración numérica (arriba); y flujos de densidad a partir de la aproximación termodinámica del modelo FESOM2 (abajo). Los flujos tienen unidades de kg/(m^{2}s).

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto EO4TIP de la Agencia Estatal de Investigación (PID2023-149659OB-C21) y por los contratos ARCTIC FLOW y CCI OSHF de la Agencia Espacial Europea. Los autores forman parte del Instituto de Ciencias del Mar, acreditado como Centro de Excelencia "Severo Ochoa" CEX-2024-001494-S por la Agencia Estatal de Investigación.

REFERENCIAS

Donlon, C. J., Martin, M., Stark, J., Roberts-Jones, J., Fiedler, E., & Wimmer, W. (2012). The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment, 116*, 140–158.

Feistel, R. (2008). A Gibbs function for seawater thermodynamics for 6 to 80°C and salinity up to 120 g kg^{-1}. *Deep-Sea Research Part I, 55*, 1639–1671. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2008.07.004

Garcia-Espriu, A., *et al*. (2026). ESA Arctic+ salinity product v4: Enhanced retrievals near the ice edge. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 19*, 5357–5371. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2026.3653416

Szekely, T., Gourrion, J., Pouliquen, S., & Reverdin, G. (2025). CORA, Coriolis Ocean Dataset for Reanalysis. SEANOE. https://doi.org/10.17882/46219

Veillard, P., Prandi, P., Pujol, M. I., Daguzé, J. A., Piras, F., Dibarboure, G., & Faugère, Y. (2024). Arctic and Southern Ocean polar sea level maps and along-tracks from multi-mission satellite altimetry from 2011 to 2021. *Frontiers in Marine Science, 11*, 1419132. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1419132

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.202

Caracterización de los sistemas duranes costeros del Atlántico SW de España mediante un método semi-supervisado a partir de compuestos de Sentinel-2

Lopez-Nieta, Diego [1] **Rodriguez-Galiano, Victor** [1] **Guisado-Pintado, Emilia** [1]

[1] Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Sevilla

ORCID: Lopez-Nieta 0000-0002-6408-2637 Rodriguez-Galiano 0000-0002-5422-8305 Guisado-Pintado 0000-0003-1115-4059

Correspondencia: dlopezdelanieta@us.es vrgaliano@us.es eguisado@us.es

RESUMEN

Se presenta una metodología orientada al estudio y la monitorización de dunas costeras mediante el uso de imágenes de alta resolución de Sentinel-2 y algoritmos de machine learning. Se ha desarrollado una metodología de clasificación orientada a objetos semi-supervisada (en lugar del enfoque tradicional basado en píxeles) que integra el contexto espacial de la vegetación y sus relaciones al agrupar píxeles homogéneos. El uso de un algoritmo optimizado de Multiresolution Segmentation (MRS), junto con variables de textura e índices de vegetación estacionales (NDVI), permitió una representación más fiel de la estructura del ecosistema. El flujo de trabajo combina el etiquetado automático mediante K-means junto con la optimización del entrenamiento del algoritmo Random Forest a partir de diferentes subconjuntos de datos, mejorando la representatividad de las muestras y la replicabilidad del proceso. Aplicado a las dunas costeras de la costa atlántica andaluza, el modelo mostró una alta capacidad para discriminar las distintas clases de vegetación, consolidándose como una herramienta eficaz para el monitoreo ambiental y la toma de decisiones en entornos costeros dinámicos.

Palabras clave: *Sentinel-2, NDVI, segmentación, Random Forest*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Caracterización de los sistemas duranes costeros del Atlántico SW de España mediante un método semi-supervisado a partir de compuestos de Sentinel-2

Lopez-Nieta, Diego [(1)], Rodriguez-Galiano, Victor [(1)], Guisado-Pintado, Emilia [(1)]

[(1)] Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Sevilla.

0000-0002-6408-2637, dlopezdelanieta@us.es ; 0000-0002-5422-8305, vrgaliano@us.es

0000-0003-1115-4059, eguisado@us.es

Resumen: Se presenta una metodología orientada al estudio y la monitorización de dunas costeras mediante el uso de imágenes de alta resolución de Sentinel-2 y algoritmos de *machine learning*. Se ha desarrollado una metodología de clasificación orientada a objetos semi-supervisada (en lugar del enfoque tradicional basado en píxeles) que integra el contexto espacial de la vegetación y sus relaciones al agrupar píxeles homogéneos. El uso de un algoritmo optimizado de *Multiresolution Segmentation* (MRS), junto con variables de textura e índices de vegetación estacionales (NDVI), permitió una representación más fiel de la estructura del ecosistema. El flujo de trabajo combina el etiquetado automático mediante *K-means* junto con la optimización del entrenamiento del algoritmo *Random Forest* a partir de diferentes subconjuntos de datos, mejorando la representatividad de las muestras y la replicabilidad del proceso. Aplicado a las dunas costeras de la costa atlántica andaluza, el modelo mostró una alta capacidad para discriminar las distintas clases de vegetación, consolidándose como una herramienta eficaz para el monitoreo ambiental y la toma de decisiones en entornos costeros dinámicos.

Palabras clave: Sentinel-2, NDVI, segmentación, Random Forest

Semi-supervised approach for coastal dune vegetation classification

Abstract: *We introduce a methodology oriented to study and monitoring coastal dunes using high-resolution Sentinel-2 imagery and machine learning algorithms. Unlike traditional pixel-based approaches, the study applies an object-oriented classification that incorporates spatial context by grouping homogeneous pixels. To this end, an optimised Multiresolution Segmentation (MRS) algorithm is employed, together with texture variables and seasonal vegetation indices (NDVI), enabling a more faithful representation of ecosystem structure. The workflow combines automatic labelling using K-means with the optimisation of training data through Random Forest, thereby improving sample representativeness and process reproducibility. When applied to the coastal dune systems of the Andalusian Atlantic coast, the model demonstrated high capacity to discriminate among different vegetation classes, establishing itself as an effective tool for environmental monitoring and decision-making in dynamic coastal environments.*

Keywords*: Sentinel-2, NDVI, segmentation, Random Forest*

1. INTRODUCCIÓN

Las dunas costeras son ecosistemas dinámicos y complejos, formados por la interacción entre el viento, el oleaje y la vegetación (Hesp, 2002). Su importancia no radica únicamente en la elevada biodiversidad que albergan, sino también en su papel fundamental como barreras naturales frente al cambio climático, el aumento del nivel del mar y la erosión asociada a eventos extremos (Jackson *et al*., 2019). Además, estos sistemas se encuentran seriamente amenazados por la presión antrópica (cambios en el uso del suelo, el turismo de masas, etc.), lo que hace imprescindible el desarrollo de herramientas más precisas para su gestión sostenible (García-Romero *et al*., 2019).

En las últimas décadas, la teledetección, combinada con algoritmos de *machine learning*, ha revolucionado el mapeo y análisis de estos entornos (Agrillo *et al*., 2023; Gupta *et al*., 2024). El uso de imágenes de muy alta resolución espacial, obtenidas mediante drones o satélites (por ejemplo, WorldView), es costoso y de acceso limitado, dificultando el seguimiento continuo que requieren estos ecosistemas tan dinámicos (Gupta *et al*., 2024). En este contexto, la misión Sentinel-2 se presenta como una alternativa potencialmente valiosa, gracias a su acceso gratuito y su alta frecuencia de revisita, aproximadamente cinco días. Sin embargo, su resolución espacial de 10 m plantea un reto metodológico debido a la marcada heterogeneidad del paisaje costero dunar. Para abordar esta limitación, se propone un enfoque basado en objetos (*Object-Based*

Image Analysis, OBIA), que permite agrupar píxeles en unidades con significado ecológico, integrando información espectral, espacial y de textura, y ofreciendo así una representación más fiel de la realidad del terreno (Guisan & Zimmermann, 2000).

Este estudio presenta una metodología innovadora basada en etiquetado híbrido y aprendizaje semi-supervisado para clasificar la vegetación en sistemas dunares. El objetivo principal es reducir la dependencia del trabajo de campo intensivo y de la fotointerpretación experta, procesos que suelen ser costosos, lentos y subjetivos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se centra en los sistemas dunares de la costa atlántica de Andalucía (Fig. 1), donde la suave pendiente de la plataforma continental y la influencia de grandes ríos como el Guadiana y el Guadalquivir (Guisado-Pintado & Málvarez-García, 2015) favorecen la formación de extensos sistemas dunares. Se seleccionaron los sistemas que presentan continuidad espacial, condiciones naturales o seminaturales, disponibilidad de espacio de acomodación y presencia de vegetación semipermanente.

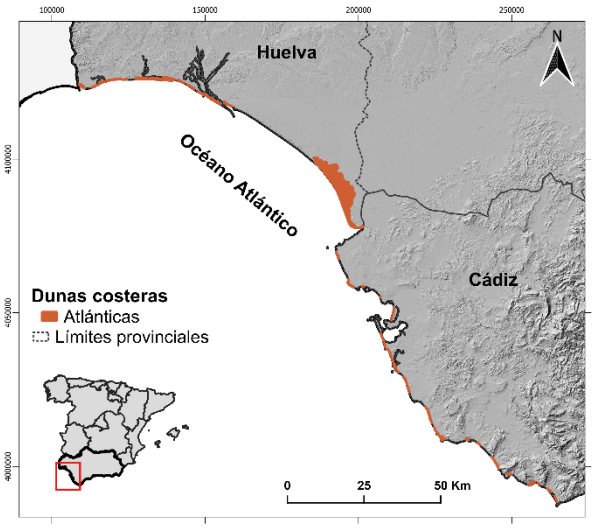


Figura 1. Área de estudio. En naranja se muestran los sistemas dunares costeros estudiados.

Desde el punto de vista ecológico, la vegetación de estos sistemas dunares atlánticos presenta una marcada zonificación. Esta se inicia en las zonas más expuestas, dominadas por comunidades pioneras de *Ammophila arenaria*, y evoluciona hacia áreas interiores progresivamente más estables. En estas zonas se desarrollan formaciones arbustivas compuestas por especies como el enebro o la retama, culminando en las áreas más protegidas del sistema con masas forestales de *Pinus pinea* (Muñoz Vallés *et al*., 2015).

2.2. Adquisición y preprocesamiento de los datos

El área de estudio se delimitó digitalizando manualmente los sistemas dunares a partir de ortofotos de muy alta resolución (0,25 m). El procesamiento de los datos satelitales se realizó en *Google Earth Engine* (GEE), utilizando la colección armonizada de imágenes Sentinel-2 Nivel 2. Se aplicó una máscara de nubes, cirros y sombras. El conjunto de datos incluyó bandas multiespectrales del espectro visible (VIS), infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR1 y SWIR2), así como el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y las variables de textura GLCM de Haralick (Haralick *et al*., 1973). Con el fin de capturar la variabilidad temporal del ecosistema, se generaron compuestos anuales y estacionales (trimestrales) correspondientes al año 2017, utilizando la mediana para reducir la influencia de valores atípicos. Finalmente, las bandas SWIR1 y SWIR2, originalmente a 20 m, se remuestrearon a 10 m.

2.3. Clasificación orientada a objetos

La generación de los objetos se llevó a cabo mediante el algoritmo de Segmentación Multirresolución (*Multiresolution Segmentation*, MRS; Baatz, 2000) en el software eCognition 10.3, otorgando mayor peso a la información espectral frente a la forma con el fin de representar adecuadamente la vegetación. El tamaño óptimo de los objetos se determinó automáticamente utilizando la herramienta ESP2 (*Estimation Scale Parameter* 2; Drăguţ *et al*., 2014). Una vez segmentada la imagen, los objetos se dividieron en dos subconjuntos: el 80 % se destinó al entrenamiento del modelo y fue clasificado automáticamente mediante el algoritmo *K-means* (Hartigan & Wong, 1979); el 20 % restante se usó como validación independiente y fue etiquetado manualmente siguiendo la clasificación ecológica EUNIS (Chytrý *et al*., 2020).

Para definir el número óptimo de clases, se aplicó el método *Elbow* (Thorndike 1973), obteniendo cuatro clases. Con el objetivo de reducir errores de clasificación y eliminar ruido en los datos de entrenamiento, se calculó la distancia espectral de cada objeto al centro de su clase (Chen & Xia, 2009). Posteriormente se agruparon los objetos en diferentes subconjuntos de entrenamiento en función del percentil de distancia (P10, P20, etc.). Estos se evaluaron para cada clase utilizando el algoritmo de clasificación supervisada *Random Forest* (RF; Breiman, 2001). La mejor combinación de subconjuntos sirvió como entrenamiento para la clasificación final. Este enfoque semisupervisado permitió depurar de forma automatizada las muestras de entrenamiento antes de la fase final de clasificación. La clasificación final se realizó también mediante el algoritmo RF, incorporando variables como el NDVI estacional, NIR, SWIR1 y SWIR2, y texturas GLCM de Haralick. Para determinar los valores óptimos de los hiperparámetros de RF (ntree: 500, 1000, 5000; mtry: 1–13; número de variables aleatorias) y seleccionar las características más importantes, se utilizó una validación cruzada de 10 pliegues (Rodríguez-Galiano *et al*., 2012). Para evaluar la exactitud cartográfica se consideraron las siguientes métricas: exactitud global, errores de omisión y comisión y coeficiente Kappa.

3. RESULTADOS

Los resultados de la segmentación dieron lugar a un total de 21.789 objetos. Su amplia extensión y la complejidad interna de los sistemas dunares costeros atlánticos se reflejan en los valores del parámetro de escala identificados por el algoritmo ESP2, que oscilaron entre 25 y 38. Esta variabilidad pone de manifiesto un litoral altamente heterogéneo, con una marcada diversidad en el tamaño, la morfología y la composición de las dunas.

Desde el punto de vista de la cobertura vegetal, se distinguieron cuatro categorías principales que siguen el gradiente natural de sucesión ecológica. La vegetación escasa (VE), que se asocia principalmente a dunas embrionarias y móviles, con una presencia destacada en áreas como Doñana y Valdevaqueros (Fig. 2). La vegetación herbácea (VH), que se encuentra fundamentalmente asociada a las dunas móviles. La vegetación mixta (VM), la cual representa una etapa de transición hacia condiciones de mayor estabilidad. Finalmente, la vegetación leñosa (VA) corresponde a la fase más madura del sistema, formaciones forestales como los pinares de *P. pinea*.

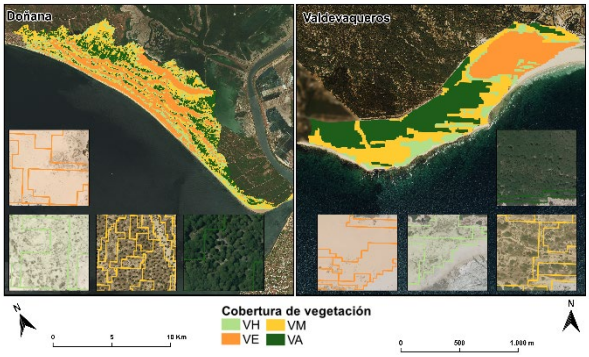


Figura 2. Mapa final de la clasificación RF de las dunas costeras de la región atlántica. La izq. se corresponde al P.N. de Doñana (Huelva) y la der. a las dunas de Valdevaqueros (Cádiz). Los recuadros de detalle muestran la ortofotografía original utilizada para la validación visual y el resultado de la segmentación de objetos.

Tabla 1. Resumen de la exactitud de la clasificación de RF.

Clase	Err. Omisión	Err. Comisión
VE	0,08	0,18
VH	0,29	0,17
VM	0,18	0,16
VA	0,04	0,25
Exact. global	0,82	
Kappa	0,75	

En cuanto a la optimización del entrenamiento mediante la selección de subconjuntos, esta región mostró un comportamiento donde la mayor capacidad de generalización se alcanzó en los percentiles bajos (20 y 30) para casi todas las categorías. La única excepción fue la clase de VM, que necesitó alcanzar el percentil 70 para mostrar su mejor desempeño. Bajo esta configuración óptima, las clases de VE y VA demostraron una exactitud excepcional al presentar errores de omisión inferiores al 10%, lo que indica que apenas son subestimadas por el modelo. Sin embargo, las clases más complejas, como VH y VM, lograron errores de omisión del 25% y 30%, respectivamente. Estos valores reflejan una mayor dificultad de detección, lo que resulta en una subestimación moderada de estas categorías por parte del modelo. El mapa de clasificación basado en RF (Fig. 2) mostró un rendimiento robusto en ambos sistemas, alcanzando una exactitud global de 0,82 y un índice Kappa de 0,75 (Tabla 1). Las clases situadas en los extremos del gradiente sucesional presentaron los mejores resultados, con errores de omisión reducidos (0,08 para VE y 0,04 para VA) y una alta concordancia entre los datos observados y los predichos. En contraste, en las zonas de transición se obtuvieron errores de omisión más elevados, especialmente en VH (29%) y VM (18%), lo que refleja una mayor dificultad del modelo para delimitar estas etapas intermedias.

4. DISCUSIÓN

La región atlántica destaca por albergar los sistemas dunares costeros más extensos y desarrollados del litoral andaluz. Su complejidad geomorfológica y climática se traduce en una gran diversidad de especies vegetales (Guisado-Pintado & Málvarez-García, 2015). A diferencia de otras zonas más fragmentadas, el litoral atlántico permite observar una sucesión ecológica completa y bien estructurada (Muñoz Vallés *et al*., 2015). El uso de datos de Sentinel-2 permitió la identificación de las distintas etapas de presencia de vegetación en estos sistemas dunares costeros, desde las dunas embrionarias hasta las dunas fijas.

El análisis subraya que la vegetación de los extremos de la duna es la más fácil de catalogar debido a su homogeneidad. Por un lado, las zonas de vegetación escasa en el frente costero tienen una firma visual muy clara sobre la arena blanca; por otro, los bosques de las dunas fijas interiores presentan una alta actividad fotosintética que el sensor detecta sin dificultad. Para optimizar la clasificación de la vegetación de esta región, se comprobó que basta con seleccionar una muestra más pequeña de observaciones más fiables (percentiles bajos), lo que demuestra la robustez de las categorías vegetales en estos ecosistemas de gran escala. Sin embargo, el principal desafío se encontró en las denominadas dunas grises o de transición. En lugares con una dinámica muy activa, como el Parque Nacional de Doñana, los límites entre la vegetación herbácea y los arbustos son difusos, creando un mosaico donde las especies se mezclan (Muñoz Vallés *et al*., 2015). Esta heterogeneidad estructural genera ambigüedad, ya que el modelo a veces confunde áreas donde conviven pastizales con individuos leñosos dispersos (Hesp, 2002). A pesar de estas dificultades en las zonas intermedias, el método permitió una alta identificación, lo cual podría ser fundamental para estudios continuos que apoyen la gestión de estos entornos frente a la presión humana y el cambio climático.

5. CONCLUSIONES

El estudio propone una metodología avanzada que combina teledetección y aprendizaje automático para la clasificación de la vegetación en sistemas dunares costeros, caracterizados por su alta complejidad y dinamismo. Mediante imágenes Sentinel-2, se emplea

una clasificación orientada a objetos que permite el monitoreo de estos ecosistemas con una frecuencia de cinco días. El modelo muestra una buena exactitud en la identificación de áreas con vegetación escasa y formaciones forestales densas, gracias a firmas espectrales claras y niveles de biomasa estables, aunque presenta limitaciones en zonas de vegetación herbácea o mixta debido a su heterogeneidad. En un futuro, la integración de datos multitemporales y modelos digitales del terreno supondría una mejora. No obstante, se plantea como una herramienta eficiente, replicable y de bajo coste, con potencial aplicación en ecosistemas similares a escala global.

6. AGRADECIMIENTOS

El primer autor es beneficiario de una ayuda FPU financiada por el Ministerio de Universidades (Referencia FPU21/01033). Esta actividad ha sido financiada por la Unión Europea–NextGeneration EU y la Consejería de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía, a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) y del Plan Complementario de «Ciencias Marinas», subproyecto C17.I01.P01.S22, Proyecto (PCM_00009), mediante subvención pública. Componente 17 «Reforma institucional y fortalecimiento de las capacidades del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación», Inversión I1 «Planes Complementarios con las Comunidades Autónomas». Este trabajo constituye una contribución al IGCP 725 «Forecasting Coastal Change».

7. REFERENCIAS

Agrillo, E. *et al*. (2023). Modeling approach for coastal dune habitat detection on coastal ecosystems combining very high-resolution UAV imagery and field survey. *Remote Sens. Ecol. Conserv.*, 9(2), 251-267. https://doi.org/10.1002/rse2.308

Baatz, M., & Schäpe, A. (2000). Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: Strobl, J. *et al*. (eds.): *Angew. Geogr. Inf. XII*. Wichmann, Heidelberg, pp. 12-23.

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Mach. Learn*, 45(1), 5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Chytrý, M. *et al*. (2020). EUNIS Habitat Classification: Expert system, characteristic species combinations and distribution maps of European habitats. *Appl. Veg. Sci.*, 23(4), 648–675. https://doi.org/10.1111/avsc.12519

Chen, Z. & Xia, S. (2009). K-means Clustering Algorithm with Improved Initial Center. *2nd Int. Workshop Knowl. Discov. Data Min*.

Drăguţ, L. *et al*. (2014). Automated parameterisation for multi-scale image segmentation on multiple layers. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 88, 119-127. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.11.018

Gracia-Romero, L. *et al*. (2019). Biogeomorphological processes in an arid transgressive dunefield as indicators of human impact by urbanization. *Sci. Total Environ*., 650, 73-86. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.429

Guisado-Pintado, E., & Malvárez García, G. C. (2015). El estado morfodinámico de las playas a través de modelización numérica de propagación y asomeramiento del oleaje: el frente litoral de Doñana. *GeoFocus*, 0(15), 163-180. https://geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/411

Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol Modell*., 135(2), 147-186. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9

Gupta, S. *et al*. (2024). Unveiling the Invasion: Advancing Ecological Mapping of Heterotheca Subaxillaris Through Integrated Remote Sensing Techniques with Drones and Satellites. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens*., 17, 7193-7211. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3374232

Haralick, R. M. *et al*. (1973). Textural Features for Image Classification. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*., SMC-3(6), 610-621. https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314

Hartigan, J. A., & Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *J. R. Stat. Soc. Ser. C (Appl. Stat.)*, 28(1), 100-108. https://doi.org/10.2307/2346830

Hesp, P. (2002). Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48(1), 245-268. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00184-8

Jackson, D. W. T. *et al*. (2019). A global 'greening' of coastal dunes: An integrated consequence of climate change? *Glob. Planet. Change*, 182. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103026

Muñoz Vallés, S. *et al*. (2015). Effect of soil characteristics on plant distribution in coastal ecosystems of SW Iberian Peninsula sand spits. *Plant Ecol*, *216*(11), 1551-1570. https://doi.org/10.1007/s11258-015-0537-x

Rodriguez-Galiano, V. F. *et al*. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 67, 93-104. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002

Thorndike, R. L. (1953). Who belongs in the family? *Psychometrika*, 18(4), 267-276. https://doi.org/10.1007/BF02289263

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.215

Zonificación del Mar Menor mediante aprendizaje no supervisado sobre la serie histórica de Sentinel-2.

Barba Ceballos, Paola [1] **Heredia, Sergio** [1] **Navarro, Gabriel** [1] **Rosado, Belén** [2] **Roca Mora, Mar** [1] **Caballero, Isabel** [1]

[1] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN), España

[2] Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía, Universidad de Cádiz

ORCID: Barba Ceballos 0000-0001-7726-6147 Heredia 0009-0003-9495-9625 Navarro 0000-0002-8919-0060 Rosado 0000-0003-1677-904X Roca Mora 0000-0001-7311-2618 Caballero 0000-0001-7485-0989

Correspondencia: paola.barba@csic.es sergio.h.c@csic.es gabriel.navarro@csic.es belen.rosado@uca.es mar.roca@csic.es isabel.caballero@csic.es

RESUMEN

La inteligencia artificial (IA) está transformando el monitoreo ambiental al permitir el análisis automatizado de conjuntos de datos complejos y de alta dimensionalidad. En este estudio, se presenta un marco metodológico basado en IA, combinado con la descomposición estacional y de tendencia mediante Loess (STL), para caracterizar los patrones de calidad del agua y sus dinámicas temporales en el Mar Menor, identificar las áreas más afectadas por la degradación ecológica y analizar su dinámica espacio-temporal mediante imágenes satelitales multiespectrales. La serie histórica de Sentinel-2, desde julio de 2015 hasta junio de 2024, se procesó mediante la corrección atmosférica ACOLITE. Se han separado la tendencia a largo plazo, la variabilidad estacional y las anomalías residuales de la clorofila-a (Chl-a) y la turbidez, vinculando los eventos extremos ocurridos en la laguna con anomalías significativas observadas en los datos históricos de teledetección. Este enfoque híbrido permitió diferenciar regiones con comportamiento similar en cuatro zonas bien definidas. La integración de técnicas de clustering no supervisado basadas en IA y de descomposición estadística de series temporales ofrece una metodología potente, escalable y transferible para el monitoreo automatizado de regiones costeras dinámicas. Estos resultados proporcionan información útil y ofrecen una base analítica robusta para futuras estrategias de prevención y restauración.

Palabras clave: *k-means, descomposición STL, zonificación, degradación.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Zonificación del Mar Menor mediante aprendizaje no supervisado sobre la serie histórica de Sentinel-2.

Barba Ceballos, Paola [(1)], Heredia, Sergio [(1)], Navarro, Gabriel [(1)], Rosado, Belén [(2)], Roca Mora, Mar [(1)], Caballero, Isabel [(1)]

[(1)] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN), España.

0000-0001-7726-6147, paola.barba@csic.es ; 0009-0003-9495-9625, sergio.h.c@csic.es

0000-0002-8919-0060, gabriel.navarro@csic.es ; 0000-0001-7311-2618, mar.roca@csic.es

0000-0001-7485-0989, isabel.caballero@csic.es

[(2)] Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía, Universidad de Cádiz.

0000-0003-1677-904X, belen.rosado@uca.es

Resumen: La inteligencia artificial (IA) está transformando el monitoreo ambiental al permitir el análisis automatizado de conjuntos de datos complejos y de alta dimensionalidad. En este estudio, se presenta un marco metodológico basado en IA, combinado con la descomposición estacional y de tendencia mediante Loess (STL), para caracterizar los patrones de calidad del agua y sus dinámicas temporales en el Mar Menor, identificar las áreas más afectadas por la degradación ecológica y analizar su dinámica espacio-temporal mediante imágenes satelitales multiespectrales. La serie histórica de Sentinel-2, desde julio de 2015 hasta junio de 2024, se procesó mediante la corrección atmosférica ACOLITE. Se han separado la tendencia a largo plazo, la variabilidad estacional y las anomalías residuales de la clorofila-a (Chl-a) y la turbidez, vinculando los eventos extremos ocurridos en la laguna con anomalías significativas observadas en los datos históricos de teledetección. Este enfoque híbrido permitió diferenciar regiones con comportamiento similar en cuatro zonas bien definidas. La integración de técnicas de clustering no supervisado basadas en IA y de descomposición estadística de series temporales ofrece una metodología potente, escalable y transferible para el monitoreo automatizado de regiones costeras dinámicas. Estos resultados proporcionan información útil y ofrecen una base analítica robusta para futuras estrategias de prevención y restauración.

Palabras clave: k-means, descomposición STL, zonificación, degradación.

Zoning of the Mar Menor using unsupervised learning on the Sentinel-2 historical series.

***Abstract**: Artificial intelligence (AI) is transforming environmental monitoring by enabling automated analysis based on complex, high-dimensional datasets. This study presents a methodological framework that combines AI with Seasonal and Trend decomposition using Loess (STL) to characterize water quality patterns and their temporal dynamics in the Mar Menor coastal lagoon, identify the areas most affected by ecological degradation, and analyze their spatio-temporal dynamics using multispectral satellite imagery. The Sentinel-2 time series, spanning from July 2015 to June 2024, was processed using ACOLITE atmospheric correction. The study clearly separated long-term trends, seasonal variability, and residual anomalies in chlorophyll-a (Chl-a) and turbidity, linking extreme events in the lagoon to significant anomalies observed in historical remote sensing data. This hybrid approach enabled the identification of four well-defined zones with similar behavior. The integration of unsupervised AI-based clustering techniques and statistical time-series decomposition provides a powerful, scalable, and transferable methodology for the automated monitoring of coastal and dynamic regions. These results provide useful information and offer a robust analytical basis for future prevention and restoration strategies.*

***Keywords**: k-means, STL decomposition, zoning, degradation*

1. INTRODUCCIÓN

La integración de técnicas de inteligencia artificial (IA), aprendizaje automático (Machine Learning, ML) y análisis de series temporales ha transformado las ciencias ambientales, permitiendo una gestión eficiente de grandes volúmenes de datos satelitales y mejorando la capacidad de monitorización, predicción y evaluación de los ecosistemas acuáticos (White *et al*., 2025). Estas metodologías facilitan la identificación de patrones complejos y relaciones no lineales, proporcionando una

comprensión más profunda de la dinámica espacio-temporal y apoyando el desarrollo de estrategias de gestión y conservación ambiental (Frincu, 2025). En este contexto, las lagunas costeras constituyen un entorno idóneo para su aplicación debido a su elevada heterogeneidad, compleja dinámica y alta vulnerabilidad frente a las presiones antrópicas (Pérez-Ruzafa *et al*., 2019).

El Mar Menor, la mayor laguna hipersalina de Europa, ha sufrido una grave degradación ecológica desde 2015 causada principalmente por aportes masivos de nutrientes y sedimentos, lo que ha provocado procesos de eutrofización, incrementando los niveles de clorofila-a (Chl-a) y turbidez, deteriorando así la calidad del agua (Pérez-Ruzafa *et al*., 2019). Estos procesos se intensifican durante episodios extremos de precipitación, favoreciendo la proliferación de algas, reduciendo la penetración de la luz, afectando negativamente a la vegetación sumergida y provocando episodios de anoxia con eventos de mortalidad masiva de fauna marina (Caballero *et al*., 2022; Medina-López *et al*., 2023). Por su importancia, el Mar Menor ha sido monitoreado mediante campañas de datos in situ y datos satelitales de Sentinel-3, pero las limitaciones espaciales, temporales y de resolución dificultan un análisis de la zona por su alta heterogeneidad (Giménez *et al*., 2024; Salls *et al*., 2024).

Para superar estas limitaciones, se propone un marco metodológico asistido por IA basado en imágenes Sentinel-2A/B de alta resolución espacial, aplicando técnicas de agrupamiento no supervisado (*k-means*) y descomposición STL de series temporales (Cleveland *et al*., 1990; Medina-López *et al*., 2023). Esto ha permitido definir zonas homogéneas y analizar la evolución temporal de Chl-a y turbidez, identificando tendencias, estacionalidades y anomalías asociadas a eventos extremos, proporcionando así una herramienta robusta y escalable para evaluar procesos de eutrofización y dinámicas en lagunas costeras.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El Mar Menor es una laguna costera situada en Murcia, al SE de España. Su profundidad media es de 4 metros, siendo su máximo 7 metros. Tiene una extensión de 135 km^2 y está separado del Mar Mediterráneo mediante una barra de arena; cuenta con tres canales que comunican el Mar Menor y Mediterráneo entre sí, permitiendo la renovación del agua contenida en la laguna costera (Pérez-Ruzafa *et al*., 2019). El Mar Menor se encuentra rodeado mayormente por cultivos agrícolas y cuenta con numerosas ramblas que desembocan en él, vertiendo sedimentos, productos químicos y otros contaminantes que afectan negativamente a la calidad del agua.

2.2. Descripción de los datos

Las imágenes de los satélites gemelos Sentinel-2A/B, desde julio de 2015 hasta junio de 2024, se usaron para evaluar la calidad del agua de la laguna. Estas imágenes contienen datos de 13 bandas espectrales de reflectancia, con resolución desde 60 metros hasta 10 metros, dependiendo de la banda, y un periodo de revisita de 10 días de cada satélite; se tienen datos cada 5 días. Se procesaron las imágenes con el software ACOLITE, diseñado específicamente para zonas costeras, realizando correcciones atmosféricas y enmascarando nubes sobre los datos de reflectancia obtenidos (Vanhellemont y Ruddick, 2016). Se aplicó el software a un total de 596 imágenes y se calcularon sus índices de calidad del agua mediante combinación de bandas de reflectancia, Chl-a OC3 (O'Reilly y Werdell, 2019) y turbidez basada en la banda roja (665 nm) (Dogliotti *et al*., 2015). Estos índices obtenidos mediante datos satelitales fueron validados con datos in situ (Caballero *et al*., 2022).

2.3. Metodología

Para garantizar la representación temporal homogénea de los datos y evitar sesgos por el número desigual de imágenes mensuales, se promediaron los datos después del filtrado. Primero, se calculan las medias mensuales de cada mes y año del periodo de estudio. Posteriormente, se promediaron los meses durante los diferentes años, obteniendo 12 imágenes, una para cada mes del año, proporcionando información representativa sobre el comportamiento de cada mes. Por último, las 12 imágenes mensuales se promediaron entre sí para obtener una única imagen media, que representará el comportamiento de la laguna durante todo el periodo de estudio (2015-2024).

2.3.1. Filtrado k-sigma

Este filtrado se usa para la detección de valores atípicos, es simple y eficiente computacionalmente. Los valores que se desvían de la media en más de *k* veces la desviación estándar se consideraron valores atípicos (Rousseeuw y Hubert, 2011). En nuestro caso se usa *k*=2.

$$\boldsymbol{\mu - k\sigma \leq X \leq \mu + k\sigma} \qquad (1)$$

Donde X es el conjunto de datos no atípicos, μ es el valor medio y σ es la desviación típica del conjunto de datos inicial. Además, se añadió un umbral de valor 200 a ambos índices, para así descartar errores sistemáticos.

2.3.2. Análisis cluster: *k*-means

El análisis cluster, en concreto *k*-means¸ es una técnica de aprendizaje no supervisado usada para agrupar datos con valores similares, minimizando la suma de las distancias cuadráticas entre cada punto y el centroide de su grupo.

$$\sum_{i=1}^{K} \sum_{x_j \in C_i} || x_j - c_i||^2 \qquad (2)$$

Donde *K* es el número de clústeres, $x_j \in C_i$ representa a los elementos que pertenecen al clúster C_i y c_i es el centroide del clúster i.

Se eligió este método por su alta eficacia y escalabilidad en grandes volúmenes de datos. El valor *k* se define mediante el método de Elbow (Everitt *et al*., 2011).

2.3.3. Descomposición STL

STL es el acrónimo de "Seasonal and Trend decomposition using Loess"; esta descomposición separa la serie temporal de forma aditiva en sus componentes de estacionalidad, tendencia y residual.

$$Y_v = S_v + T_v + R_v \quad (3)$$

Siendo Y_v la serie temporal, S_v la componente estacional, T_v la componente tendencia y R_v la componente residual.

Los valores faltantes no influyen negativamente a la descomposición, estos se estiman durante el cálculo de las componentes tendencia y estacionalidad mediante la regresión loess. La componente residual se calcula como la diferencia de la serie y las componentes tendencia y estacionalidad (Cleveland *et al*., 1990).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Aplicación del análisis cluster

Mediante el método de Elbow se consigue obtener el valor óptimo de grupos, *k=4,* que deben formarse en el Mar Menor. El análisis de clúster (C*), *k*-means, identifica los grupos homogéneos en función de las variables de Chl-a y turbidez (Fig. 1).

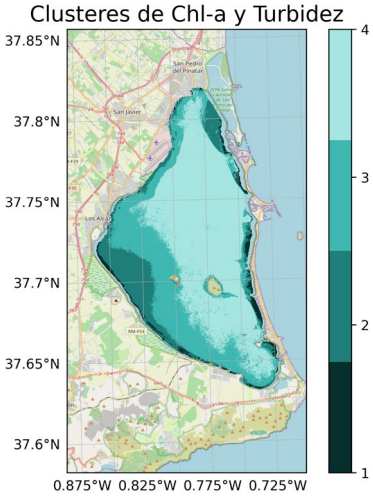


Figura 1. Resultado de k-means (k=4) para las variables de Chl-a y turbidez, identificando 4 grupos en el Mar Menor.

La degradación va disminuyendo del C1 al C4. Además, se analizó la compactación de cada cluster (C*) y la separación entre los clústeres mediante la intravarianza y la distancia entre el centroide de cada clúster y el centroide global (Tabla 1). También se calculó el intervalo percentílico (5-95), C1 se encontraba completamente fuera (Tabla 2), decidiendo así eliminar C1 por su alta heterogeneidad, el cual se tomó como un clúster de valores atípicos.

Tabla 1. Intravarianza y distancia de los centroides de cada clúster y el centroide global, para las variables de Chl-a y turbidez. La intravarianza muestra una alta dispersión en C1, es decir, sus elementos son heterogéneos entre sí. Alta distancia entre C1 y el centroide global, los datos de C1 son los más alejados.

Cluster	Intravarianza	Distancia $\left\|\left\|c_i - c_{global}\right\|\right\|^2$
1	4.49	18.27
2	0.94	3.92
3	0.24	0.14
4	0.18	0.72

Tabla 2. Número de elementos por cada clúster. Se calculó el intervalo percentílico (IP) (5-95), indicando los puntos de cada clúster que se encuentran dentro y fuera de IP.

Cluster	Total de puntos	Dentro IP	Fuera IP	Porcentaje de puntos fuera
1	42474	0	42474	100.00 %
2	187608	125981	61627	32.85 %
3	390355	387366	2989	0.77 %
4	716613	592453	124160	17.33%

3.2. Descomposición STL de las series temporales

Se construyeron series temporales de Chl-a y turbidez por separado, definidas por datos mensuales de cada variable en cada una de las zonas obtenidas mediante *k*-means, para luego aplicarse la descomposición STL de la variable Chl-a (Fig. 2). La componente tendencia muestra trayectorias similares entre zonas, con valores decrecientes de C2 a C4. La componente estacional revela dos ciclos diferenciados (2015-2020 y 2020-2024), con mayor estacionalidad en C2 durante el primer periodo y convergencia hacia C3 y C4 en el segundo. La componente residual destaca valores anómalos, principalmente en C2, asociados a eventos extremos que afectaron al Mar Menor, como eventos de “sopa verde”, anoxia, DANAs, etc.

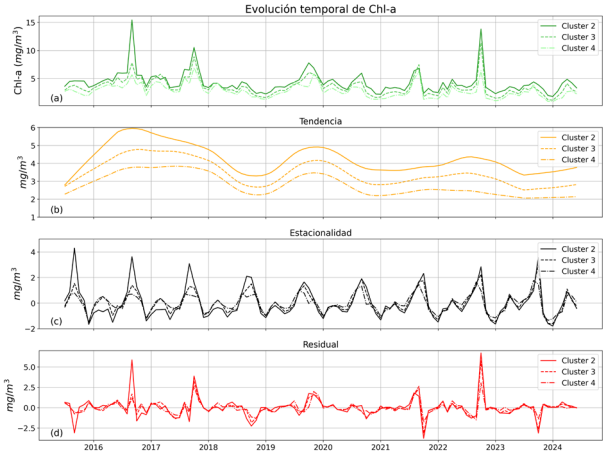


Figura 2. Descomposición STL de la serie temporal de Chl-a en (a) serie original, (b) tendencia, (c) componente estacional y (d) residual para C2, C3 y C4.

La aplicación de STL sobre la serie temporal de la variable turbidez (Fig. 3) muestra cómo la componente tendencia presenta tres ciclos principales (2016-2019, 2019-2021 y 2021-2022), con trayectorias similares en C3 y C4, mientras que C2 presenta un comportamiento diferenciado, con menores incrementos en el segundo ciclo y una tendencia decreciente desde el verano de

2021. La componente estacional presenta patrones anuales consistentes, con máximos entre primavera y mediados de verano. La componente residual identifica anomalías extremas asociadas a episodios de tormentas intensas (DANA), especialmente a finales de 2019 y en octubre de 2021, responsables de condiciones eutróficas e hipóxicas en la laguna.

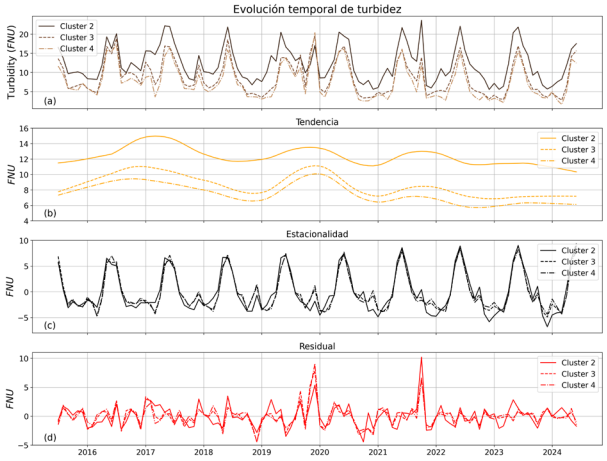


Figura 3. Descomposición STL de la serie temporal de turbidez en (a) serie original, (b) tendencia, (c) componente estacional y (d) residual para C2, C3 y C4.

La descomposición STL proporciona matemáticamente las componentes tendencia, estacionalidad y residual de las series temporales, ofreciendo información relevante sobre el comportamiento de Chl-a y turbidez en la laguna costera y relacionando valores significativos de las variables con eventos extremos o estacionales.

4. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto CNS2023-143630, concedido por el MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea Next Generation EU/PRTR. Paola Barba Ceballos ha contado con el apoyo de la beca JAEPR23062, financiada por el programa JAEPRE del CSIC. Los autores agradecen al proyecto GOYAS, financiado por el proyecto OSCARS, que ha recibido financiación del programa de investigación e innovación «Horizonte Europa» de la Comisión Europea en virtud del acuerdo de subvención n.º 101129751.

5. REFERENCIAS

Caballero, I., Roca, M., Santos-Echeandía, J., Bernárdez, P., & Navarro, G. (2022). Use of the Sentinel-2 and Landsat-8 Satellites for Water Quality Monitoring: An Early Warning Tool in the Mar Menor Coastal Lagoon. *Remote Sensing, 14*(12), 2744. https://doi.org/10.3390/rs14122744

Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., & Terpenning, I. J. (1990). STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on Loess. *Journal of Official Statistics, 597* 6(1), 3–73. https://www.math.unm.edu/~lil/Stat581/STL.pdf

Dogliotti, A. I., Ruddick, K. G., Nechad, B., Doxaran, D., & Knaeps, E. (2015). A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment, 156*, 157–168. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020

Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). Cluster analysis (5th ed.). Wiley. https://cicerocq.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/05/cluster-analysis_5ed_everitt.pdf

Frincu, R. M. (2025). Artificial intelligence in water quality monitoring: A review of water quality assessment applications. *Water Quality Research Journal, 60*(1), 164-176. https://doi.org/10.2166/wqrj.2024.049

Giménez, J. G., Granero, A., Senent-Aparicio, J., Gómez-Jakobsen, F., Mercado, J. M., Blanco-Gómez, P., Ruiz, J. M., & Cecilia, J. M. (2024). Assessment of oceanographic services for the monitoring of highly anthropised coastal lagoons: The Mar Menor case study. *Ecological Informatics, 81*, 102554. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102554

Medina-López, E., Navarro, G., Santos-Echeandía, J., Bernárdez, P., Caballero, I. (2023). Machine Learning for Detection of Macroalgal Blooms in the Mar Menor Coastal Lagoon Using Sentinel-2. *Remote Sens. 2023, 15*, 1208. https://doi.org/10.3390/rs15051208

O'Reilly, J. E., & Werdell, P. J. (2019). Chlorophyll algorithms for ocean color sensors - OC4, OC5 & OC6. *Remote Sensing of Environment, 229*, 32–47. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.021

Pérez-Ruzafa, A., Campillo, S., Fernández-Palacios, J. M., García-Lacunza, A., García Oliva, M., Ibañez, H., Navarro-Martínez, P. C., Pérez-Marcos, M., Pérez-Ruzafa, I. M., Quispe-Becerra, J. I., Sala-Mirete, A., Sánchez, O., & Marcos, C. (2019). Long-term dynamic in nutrients, chlorophyll a, and water quality parameters in a coastal lagoon during a process of eutrophication for decades, a sudden break and a relatively rapid recovery. *Frontiers in Marine Science, 6*, 26. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00026

Rousseeuw, P. J., & Hubert, M. (2011). Robust statistics for outlier detection. Wiley interdisciplinary reviews: *Data mining and knowledge discovery, 1*(1), 73-79.

Salls, W. B., Schaeffer, B. A., Pahlevan, N., Coffer, M. M., Seegers, B. N., Werdell, P. J., Ferriby, H., Stumpf, R. P., Binding, C. E., & Keith, D. J. (2024). Expanding the application of Sentinel-2 chlorophyll monitoring across United States lakes. *Remote Sensing, 16*(11), 1977. https://doi.org/10.3390/rs16111977

Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2016). ACOLITE for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery. In Proceedings of the 2016 ESA Living Planet Symposium (ESA Special Publication SP-740). Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016.

White, S., Medina-Lopez, E., Silva, T., Spyrakos, E., Amoudry, L., & Martin, A. (2025). Classification-informed estimation: the role of water-type clustering to improve neural network generalization for salinity and temperature estimation in coastal waters. *Environmental Data Science, 4*, e32. https://doi.org/10.1017/eds.2025.10005

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.230

Arribazones de macrófitos marinos: seguimiento mediante datos de teledetección hiper- y multiespectral

Roca Mora, Mar [1] **Davies, Bede Ffinian Rowe** [2,3] **Gernez, Pierre** [2] **Zoffoli, Maria Laura** [4] **Barillé, Laurent** [2]

[1] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Departamento de Ecología y Gestión Costera, Cádiz, España

[2] Institut des Substances et Organismes de la Mer (ISOMer), Nantes Université, Nantes, Francia

[3] MARBEC, Université de Montpellier, CNRS, Ifremer, IRD, Montpellier, Francia

[4] Institute of Marine Sciences (ISMAR), Italian National Research Council (CNR), Trieste, Italia

ORCID: Roca Mora 0000-0001-7311-2618 Davies 0000-0001-6462-4347 Gernez 0000-0003-2055-410X Zoffoli 0000-0003-1892-0051 Barillé 0000-0001-5138-2684

Correspondencia: mar.roca@csic.es bede.ffinian.davies@ifremer.fr pierre.gernez@univ-nantes.fr marialaura.zoffoli@cnr.it laurent.barille@univ-nantes.fr

RESUMEN

Las zonas costeras han sufrido importantes alteraciones antropogénicas, lo que ha facilitado la propagación de especies exóticas invasoras, como Rugulopteryx okamurae en el estrecho de Gibraltar, que coloniza los fondos rocosos y crea acumulaciones masivas de biomasa a lo largo de la costa. Los macrófitos marinos, macroalgas y fanerógamas marinas, pueden crear acumulaciones de biomasa en la playa como parte de su ciclo vital natural. Sin embargo, el aumento en frecuencia y abundancia de arribazones masivos de R. okamurae en el sur peninsular y norte africano está provocando graves impactos ecológicos y económicos desde el inicio de la invasión en 2015. Sin embargo, actualmente no existe ningún programa de seguimiento de arribazones a nivel regional utilizando datos de teledetección. Este estudio se centra en la caracterización radiométrica de arribazones de Zostera noltii y R. okamurae para evaluar su diferenciación espectral en las distintas etapas de degradación de biomasa, relacionadas con el contenido de agua y la fotooxidación de sus pigmentos. Además, se utilizaron imágenes de satélite multiespectrales de Sentinel-2 y PlanetScope SuperDove para evaluar la capacidad espacial y espectral de monitorizar ambos tipos de arribazón, destacando la utilidad de las tres bandas red-edge, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) de Sentinel-2. Los resultados mostraron diferencias radiométricas significativas en los estadios de degradación de arribazones de ambas especies, mostrando R. okamurae una mayor retención de agua, pero una degradación más rápida de los pigmentos en comparación con la fanerógama marina Z. noltii. Esta caracterización previa es crucial para escalar un algoritmo de monitorización de arribazones de macrófitos marinos a nivel regional con el fin de mejorar la gestión operativa de esta especie marina invasora.

Palabras clave: *macroalga invasora, fanerógamas marinas, radiometría, Sentinel-2, PlanetScope*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Arribazones de macrófitos marinos: seguimiento mediante datos de teledetección hiper- y multiespectral

Roca Mora, Mar [1], Davies, Bede Ffinian Rowe [2,3], Gernez, Pierre [2], Zoffoli, Maria Laura [4], Barillé, Laurent [2]

[1] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Departamento de Ecología y Gestión Costera, España.
0000-0001-7311-2618, mar.roca@csic.es

[2] Institut des Substances et Organismes de la Mer (ISOMer), Nantes Université, Nantes, Francia.
0000-0003-2055-410X, pierre.gernez@univ-nantes.fr ; 0000-0001-5138-2684, laurent.barille@univ-nantes.fr

[3] MARBEC, Université de Montpellier, CNRS, Ifremer, IRD, Francia.
0000-0001-6462-4347, bede.ffinian.davies@ifremer.fr

[4] Institute of Marine Sciences (ISMAR), Italian National Research Council (CNR), Trieste, Italia.
0000-0003-1892-0051, marialaura.zoffoli@cnr.it

Resumen: Las zonas costeras han sufrido importantes alteraciones antropogénicas, lo que ha facilitado la propagación de especies exóticas invasoras, como *Rugulopteryx okamurae* en el estrecho de Gibraltar, que coloniza los fondos rocosos y crea acumulaciones masivas de biomasa a lo largo de la costa. Los macrófitos marinos, macroalgas y fanerógamas marinas, pueden crear acumulaciones de biomasa en la playa como parte de su ciclo vital natural. Sin embargo, el aumento en frecuencia y abundancia de arribazones masivos de *R. okamurae* en el sur peninsular y norte africano está provocando graves impactos ecológicos y económicos desde el inicio de la invasión en 2015. Sin embargo, actualmente no existe ningún programa de seguimiento de arribazones a nivel regional utilizando datos de teledetección. Este estudio se centra en la caracterización radiométrica de arribazones de *Zostera noltii* y *R. okamurae* para evaluar su diferenciación espectral en las distintas etapas de degradación de biomasa, relacionadas con el contenido de agua y la fotooxidación de sus pigmentos. Además, se utilizaron imágenes de satélite multiespectrales de Sentinel-2 y PlanetScope SuperDove para evaluar la capacidad espacial y espectral de monitorizar ambos tipos de arribazón, destacando la utilidad de las tres bandas *red-edge,* infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) de Sentinel-2. Los resultados mostraron diferencias radiométricas significativas en los estadios de degradación de arribazones de ambas especies, mostrando *R. okamurae* una mayor retención de agua, pero una degradación más rápida de los pigmentos en comparación con la fanerógama marina *Z. noltii*. Esta caracterización previa es crucial para escalar un algoritmo de monitorización de arribazones de macrófitos marinos a nivel regional con el fin de mejorar la gestión operativa de esta especie marina invasora.

Palabras clave: macroalga invasora, fanerógamas marinas, radiometría, Sentinel-2, PlanetScope

Marine macrophyte beachcasts: monitoring through multispectral and hyperspectral remote sensing data

***Abstract**: Coastal areas have undergone significant anthropogenic alterations, facilitating the spread of invasive alien species such as Rugulopteryx okamurae in the Strait of Gibraltar, which colonizes rocky bottoms and creates massive accumulations of biomass along the coast. Marine macrophytes, macroalgae, and seagrasses can create biomass accumulations on beaches as part of their natural life cycle. However, the increase in frequency and abundance of massive strandings of R. okamurae in southern Spain and North Africa has been causing serious ecological and economic impacts since the invasion began in 2015. However, there is currently no regional stranding monitoring program using remote sensing data. This study focuses on the radiometric characterization of Zostera noltii and R. okamurae strandings to evaluate their spectral differentiation at different stages of biomass degradation, related to water content and photooxidation of their pigments. In addition, multispectral satellite images from Sentinel-2 and PlanetScope SuperDove were used to evaluate the spatial and spectral capacity to monitor both*

types of strandings, highlighting the usefulness of the three red-edge, near-infrared (NIR), and short-wave infrared (SWIR) bands of Sentinel-2. The results showed significant radiometric differences in the stages of degradation of the debris of both species, with R. okamurae showing greater water retention but faster pigment degradation compared to the marine phanerogam Z. noltii. This preliminary characterization is crucial for scaling up a marine macrophyte debris monitoring algorithm at the regional level in order to improve the operational management of this invasive marine species.

***Keywords**: invasive macroalgae, seagrass, radiometry, Sentinel-2, PlanetScope*

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, la costa ha sufrido numerosas alteraciones debido a las actividades antropogénicas. En especial, el tráfico marítimo global ha derivado en la introducción de especies exóticas invasoras en el medio marino, generando graves pérdidas de biodiversidad e impactos económicos en la pesca, la acuicultura y el turismo (Katsanevakis *et al*., 2024). Este es el caso de *Rugulopteryx okamurae*, una macroalga exótica invasora detectada por primera vez en Ceuta en 2015, la cual se ha expandido rápidamente desde el Estrecho de Gibraltar hacia el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo, situándola como la invasión más agresiva de la historia europea.

Los macrófitos marinos, incluyendo macroalgas y fanerógamas marinas, pueden generar arribazones en playas circundantes como parte de su ciclo vital natural. Sin embargo, *R. okamurae* genera arribazones de grandes dimensiones sin precedentes en las costas del sur peninsular, cuyas características espectrales pueden generar confusión con otros arribazones de especies autóctonas como la *Posidonia oceanica* o la *Zostera noltii*. Además, la degradación de esta biomasa varada en la playa por la exposición a agentes atmosféricos puede cambiar sus características espectrales, siendo un ámbito muy poco estudiado a través de la teledetección, donde la caracterización hiper- y multiespectral es de gran utilidad (Davies *et al*., 2023).

Este trabajo caracteriza la respuesta hiper- y multiespectral de dos arribazones de *R. okamurae* y *Z. noltii* en la provincia de Cádiz (España) y el efecto de la degradación, proporcionando información clave para desarrollar métodos escalables de monitorización basados en teledetección óptica.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio y especies

El estudio se realizó en la provincia de Cádiz (España), incluyendo un arribazón de la fanerógama marina *Z. noltii* (San Fernando) y otro de la macroalga invasora *R. okamurae* (Bolonia, Tarifa).

2.2. Datos hiperespectrales

2.2.1. Transectos *in situ*

Para caracterizar espectralmente ambos arribazones en la playa, se realizaron medidas hiperespectrales mediante un radiómetro ©ASD HandHeld2 de transectos transversales a la costa (**Figura 1**), midiendo el comportamiento *in situ* de la exposición atmosférica en ambas especies. En dichos arribazones, se recogieron muestras de biomasa fresca no degradada.

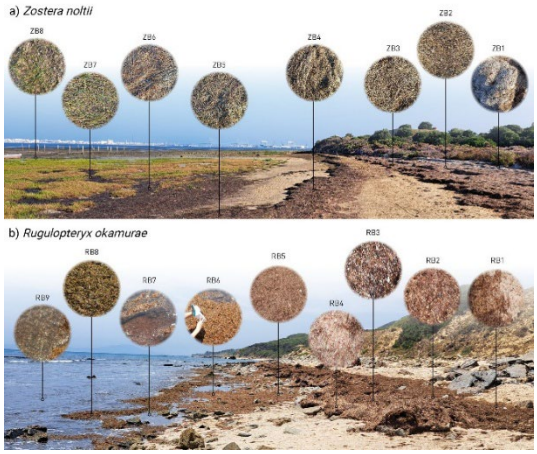


Figura 1. Transectos hiperespectrales in situ de los arribazones de macrófitos marinos.

2.2.2. Experimento de laboratorio

Con la biomasa fresca, se analizó el efecto del contenido de agua en la variabilidad radiométrica de ambos arribazones con muestras por triplicado. Las medidas radiométricas se realizaron con luz solar natural tras haber sido calibradas con un panel de calibración, y las muestras eran pesadas e introducidas en la estufa a 60 ºC en intervalos de una hora las 8 primeras horas, y tras 21 y 32 horas (**Figura 2**).

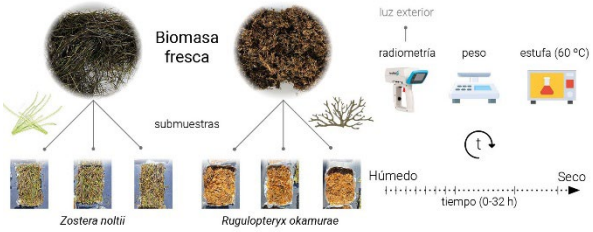


Figura 2. Esquema del experimento de laboratorio realizado con radiometría in situ.

2.2.3. Análisis estadístico

Con los datos hiperespectrales, se desarrollaron modelos aditivos generalizados (GAMs, del inglés) para evaluar diferencias radiométricas significativas *in situ* y en laboratorio. Para esta última, se calculó la diferencia

de reflectancia modelada ($\Delta R_{\gamma t}$) en diferentes intervalos ($R_{\gamma t}$) en comparación con el estado inicial ($R_{\gamma 0}$), donde γ representa la longitud de onda y t el intervalo de tiempo transcurrido (Eq. 1).

$$\Delta R_{\gamma t} = R_{\gamma 0} - R_{\gamma t} \quad (1)$$

2.3. Datos multiespectrales

2.3.1. Sentinel-2 y PlanetScope SuperDove

Para evaluar la capacidad espacial y espectral de la teledetección óptica en la discriminación de estados de degradación de arribazones de macrófitos marinos, se utilizaron imágenes de Sentinel-2 (S2) y PlanetScope SuperDove (PSB.SD) lo más cercanas al día de muestreo (**Tabla 1**), con 10-20-60 y 3 metros de resolución espacial, respectivamente.

Tabla 1. Imágenes de satélite procesadas por cada arribazón y sensor cercanas al día de muestreo.

Especie/ Sensor	Sentinel-2	PlanetScope SuperDove
Zostera noltii	11/06/2025	12/06/2025
Rugulopteryx okamurae	14/06/2025	13/06/2025

2.3.2. Análisis espectral

Se desarrollaron cuatro GAMs para evaluar la capacidad teórica espectral de ambos sensores acorde al ancho de banda, y se extrajeron los datos de cada imagen acorde a cada transecto *in situ*.

3. RESULTADOS

Los GAMs con información hiperespectral de los transectos *in situ* muestran diferencias significativas entre estadios de degradación de arribazones de *R. okamurae* y *Z. noltii*, identificando la absorción de pigmentos de clorofila y fucoxantinas, así como la absorción de la señal en algas flotantes (**Figura 3a**).

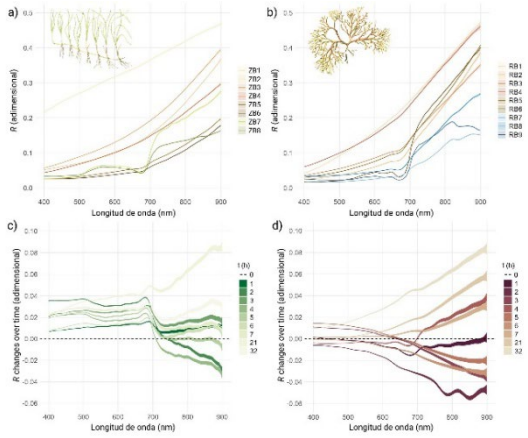


Figura 3. GAMs de transectos in situ y experimento de laboratorio para arribazones de R. okamurae y Z. noltii.

Además, los GAMs derivados del experimento de laboratorio muestran la variabilidad espectral en un intervalo de 32 horas respecto al tiempo cero, observándose una mayor variabilidad en *R. okamurae* que en *Z. noltii* debido a la gran capacidad de retención de agua de dicha macroalga (**Figura 3b**).

Respecto a la capacidad teórica de las imágenes de satélite, los GAMs de S2 muestran ventajas en la capacidad de detección de cambios en la degradación de arribazones con las tres bandas del *red-edge* y el NIR estrecho, zona donde existe mayor variabilidad espectral, mientras que PSB.SD muestra mayores ventajas en el espectro del verde y el amarillo (**Figura 4**).

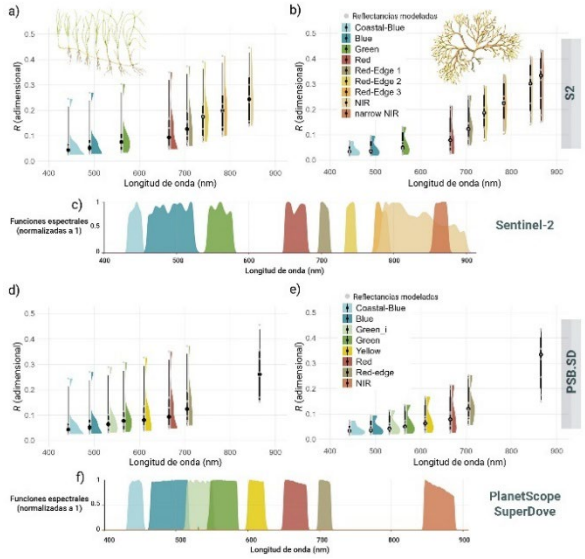


Figura 4. Variabilidad espectral de radiometría de campo agrupada en las bandas de S2 y PSB.SD.

En cuanto a la capacidad espacial, PSB.SD permite una mayor precisión en la detección de estadios degradados de biomasa respecto a S2 por sus 3 metros de resolución espacial. Sin embargo, S2 es capaz de distinguir hasta cuatro estadios de degradación, fuertemente influenciados por la distancia a la orilla del mar y a la degradación de pigmentos (**Figura 5**). Además, S2 ofrece las bandas del infrarrojo corto (SWIR) a 20 metros de resolución espacial, pudiendo obtener información sobre el contenido de agua de forma más precisa a correlacionar con la pérdida observada en laboratorio.

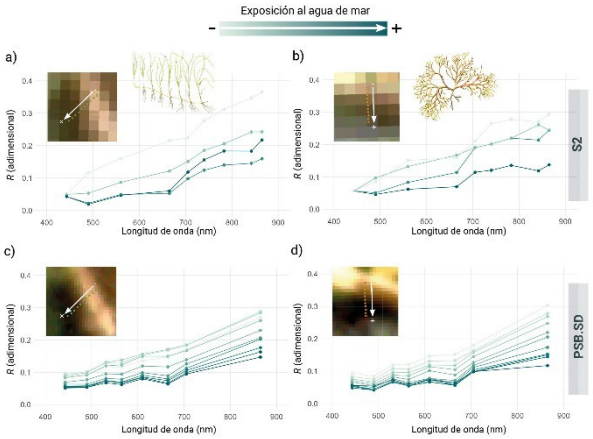


Figura 5. Reflectancia (adiomensional) de S2 y PSB.SD en los transectos de arribazones muestreados.

4. DISCUSIÓN

La caracterización radiométrica proximal de especies de macrófitos marinos es de crucial importancia para entender su comportamiento espectral en la playa y en la biomasa flotante, altamente condicionada por el contenido de agua y la fotooxidación de pigmentos. Generalmente, cuando hay una pérdida de contenido de agua, la degradación de pigmentos se intensifica, provocando una pérdida de absorción espectral en el rango del visible, *red-edge* y NIR debido a la degradación de la estructura celular (Du *et al*., 2022). Sin embargo, *R. okamurae* mostró una rápida pérdida de pigmentos, aunque retuvo mejor el contenido de agua en comparación con la fanerógama marina *Z. noltii*. Además, el experimento de laboratorio mostró un incremento de 0.09 de reflectancia en el NIR de biomasa húmeda a seca, mientras que las imágenes de satélite mostraron una variación del 0.2, sugiriendo la acción de efectos añadidos como la fotooxidación de pigmentos y la exposición atmosférica (Pan y Holmer, 2025). Este experimento, junto con las respuestas espectrales distintivas de las dos especies *in situ*, sugiere que el seguimiento de los arribazones a lo largo del tiempo puede proporcionar información valiosa para identificar el tiempo que llevan varados en la costa.

En cuanto al uso de imágenes de satélite para escalar la monitorización de arribazones, tanto S2 como PSB.SD mostraron capacidades relevantes para detectar los diferentes estados de degradación de la biomasa marina. Mientras otros estudios han demostrado una mayor precisión en la detección de macrófitos marinos sumergidos combinando ambas fuentes (Roca-Mora *et al*., 2026), el uso aislado de S2 muestra capacidades suficientes para desarrollar un sistema de monitorización regional con estimaciones de estado de biomasa y cobertura. Además, el uso de la banda 11 (SWIR) sugiere el potencial uso del índice normalizado de humedad (NDMI) para informar acerca de la cantidad de agua en el arribazón.

Investigaciones futuras, dentro del proyecto RugOBSS financiado por OYSTER EuroMarine y Blue-Cloud Hackathon 2025, se centrarán en la monitorización multitemporal a gran escala de las zonas invadidas para cuantificar los impactos de *R. okamurae* y las tendencias de invasión mediante el uso de computación en la nube, así como en la creación de la primera base de datos de ocurrencia y una biblioteca hiperespectral de arribazones de *R. okamurae*. Esta información será clave para cuantificar los impactos acumulados en las playas, lo que respaldará las compensaciones económicas municipales, la retirada operacional por parte de empresas de retirada de algas y la potencial valorización de esta biomasa.

5. CONCLUSIONES

Este estudio caracteriza dos arribazones de *Zostera noltii* y *Rugulopteryx okamurae* mediante radiometría de campo hiperespectral, evaluando la capacidad de distinguir diferentes estadios de degradación de la biomasa de ambas especies mediante imágenes de satélite multiespectrales. Los resultados muestran una degradación más rápida de los pigmentos y una mayor retención de agua de *R. okamurae* respecto a los arribazones de *Z. noltii*. Aunque PSB.SD proporciona una mayor resolución espacial, la mayor variabilidad espectral en estadios de degradación en el *red-edge* y NIR sitúan al satélite S2 como más adecuado para definir el estado de la biomasa varada en las playas. Sin embargo, la complejidad de la degradación y la posible mezcla espectral con otros macrófitos marinos ponen de relieve la importancia de crear una biblioteca espectral de *R. okamurae*, no pudiendo sostener su diferenciación mediante índices espectrales independientes, requiriendo de algoritmos más complejos de aprendizaje automático. Estos resultados son pioneros en la caracterización espectral de arribazones, proporcionando información útil para el desarrollo de un sistema de monitorización por satélite a escala regional.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha estado financiada por el contrato FPU020/1294 del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, la Agencia Espacial Francesa a través del proyecto INVASEA y el Blue-Cloud Hackathon 2025 a través del proyecto RugOBSS.

7. REFERENCIAS

Davies, B.F.R., Gernez, P., Geraud, A., Oiry, S., Rosa, P., Zoffoli, M.L., *et al*. (2023). Multi- and hyperspectral classification of soft-bottom intertidal vegetation using a spectral library for coastal biodiversity remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 290, 113554. doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113554

Du, G., Li, X., Wang, J., Che, S., Zhong, X., and Mao, Y. (2022). Discrepancy in photosynthetic responses of the red alga Pyropia yezoensis to dehydration stresses under exposure to desiccation, high salinity, and high mannitol concentration. *Marine Life Science & Technology* 4(1), 10-17. doi: https://doi.org/10.1007/s42995-021-00115-w

Katsanevakis, S., Zaiko, A., Olenin, S., Costello, M.J., Gallardo, B., Tricarico, E., *et al*. (2024). GuardIAS–Guarding European waters from invasive alien species. *Management of Biological Invasions* 15, 701-730. doi: https://doi.org/10.3391/mbi.2024.15.4.14

Pan, Y., and Holmer, M. (2025). Seagrass and macroalgae on shores: unraveling the decomposition of beach wrack on Danish coasts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 324, 109473. doi: https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109473

Roca-Mora, M., Peixoto-Dias, C.E., Vivanco-Bercovich, M., Lee, C.B., Fonseca, A.L., Caballero, I., Navarro, G., Horta, P. (2026). Blending PlanetScope and Sentinel-2 imagery to assess subtidal seagrass changes in turbid waters. *Marine Pollution Bulletin* 225, 119228. doi: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119228

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.282

Morfodinámica en la desembocadura del río Mataquito, Chile: un estudio de caso basado en imágenes satelitales y eventos extremos

Briceño-de-Urbaneja, Idania [1,2] **Pérez-Martínez, Waldo** [1,2] **Valenzuela-Jara, Joaquin** [1] **Diaz-Qujada, Isidora** [1]

[1] Universidad Mayor, Chile

[2] Universitat Politècnica de València, España

ORCID: Briceño-de-Urbaneja 0000-0002-1722-636X Pérez-Martínez 0000-0002-3670-6190

Correspondencia: idania.briceno@umayor.cl waldo.perez@umayor.cl Joaquin.Valenzuela@umayor.cl isidora.Diazq@mayor.cl

RESUMEN

En la desembocadura del río Mataquito se ha desarrollado una barra costera asociada a la alta disponibilidad de sedimentos producto de la interacción entre el océano y la cuenca hidrográfica. La evolución de esta barra ha estado condicionada por eventos tectónicos e hidrometeorológicos extremos, como el terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010, sistemas frontales y eventos ENSO de alta intensidad. Aunque la barra presenta ciclos naturales de erosión y reconstrucción, en la última década se ha visto afectada por un aumento de las marejadas y un déficit sedimentario vinculado a la megasequía que afecta a Chile central desde 2010. El objetivo de este estudio es cuantificar las transformaciones morfodinámicas en la desembocadura del río Mataquito entre 1985 y 2024 mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat (5 TM, 7 ETM+, 8 y 9 OLI) y Sentinel 2, junto con datos de oleaje provenientes de ERA5 y caudades del río Mataquito. Los resultados muestran un desplazamiento significativo de la barra asociado al terremoto Mw 8,8 de 2010, evento durante el cual esta desapareció temporalmente, evidenciando la capacidad del tsunami para superar la inercia fluvial y favorecer el desarrollo de un canal alargado de ancho variable hacia el norte. Los procesos fluviales, particularmente las avulsiones, explican la erosión costera observada, mientras que los sedimentos se concentran en la llanura de inundación.

Palabras clave: *Morfodinámica; desembocadura; río Mataquito; ENSO Niño Niña; terremoto-tsunami.*

Fecha de recepción: 22 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 22 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Morfodinámica en la desembocadura del río Mataquito, Chile: un estudio de caso basado en imágenes satelitales y eventos extremos

Briceño-de-Urbaneja, Idania [1,2], Pérez-Martínez, Waldo [1,2], Valenzuela-Jara, Joaquin [1], Diaz-Qujada, Isidora [1]

[1] Universidad Mayor, Chile.
[2] Universitat Politècnica de València, España.

0000-0002-1722-636X, idania.briceno@umayor.cl ; 0000-0002-3670-6190, waldo.perez@umayor.cl
joaquin.valenzuela@umayor.cl ; isidora.diazq@mayor.cl

Resumen: En la desembocadura del río Mataquito se ha desarrollado una barra costera asociada a la alta disponibilidad de sedimentos producto de la interacción entre el océano y la cuenca hidrográfica. La evolución de esta barra ha estado condicionada por eventos tectónicos e hidrometeorológicos extremos, como el terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010, sistemas frontales y eventos ENSO de alta intensidad. Aunque la barra presenta ciclos naturales de erosión y reconstrucción, en la última década se ha visto afectada por un aumento de las marejadas y un déficit sedimentario vinculado a la megasequía que afecta a Chile central desde 2010. El objetivo de este estudio es cuantificar las transformaciones morfodinámicas en la desembocadura del río Mataquito entre 1985 y 2024 mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat (5 TM, 7 ETM+, 8 y 9 OLI) y Sentinel-2, junto con datos de oleaje provenientes de ERA5 y caudades del río Mataquito. Los resultados muestran un desplazamiento significativo de la barra asociado al terremoto Mw 8,8 de 2010, evento durante el cual esta desapareció temporalmente, evidenciando la capacidad del tsunami para superar la inercia fluvial y favorecer el desarrollo de un canal alargado de ancho variable hacia el norte. Los procesos fluviales, particularmente las avulsiones, explican la erosión costera observada, mientras que los sedimentos se concentran en la llanura de inundación.

Palabras clave: Morfodinámica; desembocadura; río Mataquito; ENSO Niño-Niña; terremoto-tsunami.

Morphodynamics at the mouth of Mataquito River, Chile: a case study based on satellite imagery and extreme events

***Abstract**: The mouth of the Mataquito River, a coastal sandbar, has developed because of the high availability of sediments produced by the interaction between the ocean and the watershed. The evolution of this sandbar has been conditioned by extreme tectonic and hydrometeorological events, such as the earthquake and tsunami of February 27, 2010, frontal systems, and high-intensity ENSO events. Although the sandbar undergoes natural cycles of erosion and reconstruction, over the past decade it has been affected by increased storm surges and a sediment deficit linked to the megadrought affecting central Chile since 2010. The objective of this study is to quantify morphodynamic transformations at the Mataquito River mouth between 1985 and 2024 through the analysis of satellite imagery from Landsat (5 TM, 7 ETM+, 8 and 9 OLI) and Sentinel-2, together with wave data from ERA5 and discharge data from the Mataquito River. The results show a significant displacement of the sandbar associated with the 2010 Mw 8.8 earthquake, during which the sandbar temporarily disappeared, demonstrating the capacity of the tsunami to overcome fluvial inertia and promote the development of an elongated channel with variable width toward the north. Fluvial processes, particularly avulsions, account for the observed coastal erosion, while sediments are preferentially deposited on the floodplain*

***Keywords**: Morphodynamics; river mouth; Mataquito River; ENSO El Niño–La Niña; earthquake–tsunami.*

1. INTRODUCCIÓN

Las desembocaduras de ríos constituyen sistemas clave para analizar la interacción entre procesos fluviales y marinos, en los cuales el oleaje, las mareas y el forzamiento atmosférico controlan la redistribución sedimentaria y la estabilidad geomorfológica del sistema (Fagherazzi *et al*., 2015; Orchard *et al*., 2025). La morfodinámica de estos ambientes está dominada por procesos de acumulación y redistribución de sedimentos, que

influyen en la migración del canal, el desarrollo de barras arenosas y los procesos de avulsión fluvial (Edmonds *et al*., 2022). No obstante, esta dinámica puede verse abruptamente modificada por eventos extremos, como fases ENSO, tormentas y terremotos generadores de tsunamis, los cuales inducen cambios significativos en la configuración de las barras costeras (Vos & Harley, 2021).

En el caso de la desembocadura del río Mataquito, estudios previos han documentado alteraciones morfológicas relevantes asociadas a la persistencia de marejadas, a la variabilidad climática y, de forma particularmente significativa, al terremoto y tsunami de 2010, que provocó una subsidencia cosísmica cercana a −0,5 m y la movilización de grandes volúmenes de arena, conduciendo a la desaparición casi total de la barra arenosa (Cienfuegos *et al*., 2014; Lario *et al*., 2016). Asimismo, se ha demostrado que la influencia del ENSO incrementa la variabilidad de los caudales, amplificando los picos de crecida y favoreciendo procesos erosivos en las desembocaduras fluviales (Araya Ojeda & Isla, 2016), lo que resalta el rol de la variabilidad climática en la evolución morfodinámica de estos sistemas (Garreaud & Rutland, 2006).

A pesar de estos avances, persisten vacíos en la comprensión de cómo las barras responden espacial y temporalmente a la superposición de forzantes marinos, fluviales y eventos extremos, particularmente en escalas multidecadales.

El objetivo de este estudio es analizar la evolución morfológica de la barra arenosa del río Mataquito considerando el efecto de eventos perturbadores de distinta naturaleza, mediante un análisis multitemporal basado en imágenes satelitales ópticas Landsat 5 TM, 8 y 9 OLI y Sentinel-2.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la comuna de Licantén, en la Región del Maule, Chile. La cuenca del río Mataquito posee una superficie aproximada de 6.200 km² y se divide en dos subcuencas, correspondientes a los ríos Teno y Lontué, que confluyen para dar origen al río Mataquito. La desembocadura del río se orienta hacia el norte, desarrollándose a lo largo de un tramo de costa rectilíneo con dirección sur–norte (Figura 1). Al sur se encuentra enmarcada por los extensos campos de dunas La Trinchera y Putú, mientras que hacia el norte se emplaza el asentamiento de La Pesca (Cienfuegos *et al*., 2014).



Figura 1. Imagen izquierda, Ubicación del área de estudio; Imagen derecha, Ubicación relativa internacional.

El clima de la cuenca se caracteriza como templado mediterráneo, con veranos cálidos y secos, y precipitaciones concentradas principalmente durante el invierno. La temperatura media anual es de 19 °C; las temperaturas máximas estivales alcanzan los 30 °C, mientras que las mínimas invernales se sitúan en torno a los 7 °C. La precipitación anual varía entre 800 y 1.000 mm, dependiendo de la localización dentro de la cuenca, lo que influye directamente en los recursos hídricos regionales y en el entorno ecológico local (DGA, 2020).

2.2. Metodología

2.2.1 Adquisición de datos

Se utilizaron un total de 120 imágenes satelitales obtenidas de Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI, Landsat 9 y Sentinel-2, corregidas en reflectancia de superficie L2 para la constelación Landsat y L2A (BOA) para las imágenes Sentinel-2. El análisis examina las variaciones de la barra antes y después de eventos extremos, tales como episodios ENSO (fases fuertes de El Niño y La Niña), terremotos seguidos de tsunamis y sistemas frontales, empleando el Índice de Diferencia Normalizada Modificado del Agua (MNDWI), el cual permite una separación más precisa de las superficies de agua (Ecuación 1). El procesamiento del índice se aplicó en la plataforma de Google Earth Engine (GEE).

$$MNDWI = \frac{\text{Green} - \text{Swir1}}{\text{Green} + \text{Swir1}} \qquad (1)$$

Donde: Green y Swir1 son las imágenes en reflectancia de superficie de las bandas verde e infrarrojo de onda corta 1.

2.2.2 Clima del oleaje y datos de caudales

Se utilizaron datos del conjunto de reanálisis climático global “ERA5” del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), disponible desde la década de 1980 (Hersbach *et*

al., 2020). Se emplearon variables de media mensual de altura significativa de ola, período de ola y dirección del oleaje, precipitación media mensual, debido a que no se dispone de mediciones instrumentales continuas y a que solo existe un acceso limitado a datos observacionales de libre disponibilidad. Los datos de caudales en m^3-segundo se descargaron de la estación fluviométrica Mataquito en Licantén, DGA 07123001; https://dga.mop.gob.cl, desde 1987 hasta 2025, disponibles en el área de estudio.

2.2.3 Morfodinámica de la barra

La caracterización morfodinámica se asocia tanto a condiciones hidrológicas persistentes como a eventos extremos. Asimismo, se examinan los procesos de transporte y redistribución de los sedimentos superficiales, considerando la influencia de las corrientes marinas y la direccionalidad predominante del oleaje desde el suroeste. Adicionalmente, se evalúa el efecto de la variabilidad climática, en particular del ENSO a través del índice ONI, sobre los cambios en el caudal fluvial y las modificaciones en la configuración de la desembocadura. Finalmente, se incorpora el rol de la tectónica mediante el análisis de la subsidencia cosísmica y la deformación del fondo marino asociadas a eventos sísmicos, y su impacto en la evolución morfodinámica del sistema

3. RESULTADOS

3.1 Evolución espacio temporal de la barra

A partir del índice MNDWI se caracterizó la evolución espacio-temporal de la barra arenosa en la desembocadura del río Mataquito durante un período de 40 años, evidenciando desplazamientos del canal que secciona la barra y una marcada variabilidad longitudinal. Los resultados muestran una dinámica sedimentaria diferenciada, con predominio de procesos erosivos en el sector proximal y acreción lateral en el sector distal. Asimismo, se reconocen fases de recuperación y zonas de acumulación vinculadas a fuentes y sumideros sedimentarios asociados a los campos dunares de La Trinchera y Putú, revelando la compleja interacción entre los procesos fluviales y marinos y la presencia de barras internas, coherentes con patrones observados en otros estuarios (Cienfuegos *et al*., 2014).

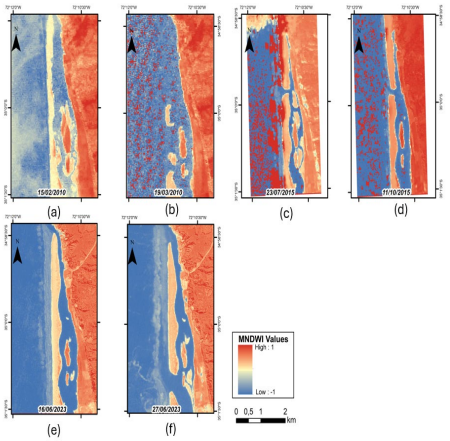


Figura 2. Ejemplo de cambios en la desembocadura del río antes y después de un evento extremo. (a) Antes del terremoto; (b) Después del terremoto; (c) Antes del evento meteorológico asociado al ENSO El Niño;(d) después del ENSO; (e) Antes del sistema frontal; (f) Después del sistema frontal.

3.2 Clima del oleaje y variaciones de caudal

Los cambios morfológicos cuantificados en la barra arenosa del río Mataquito pueden interpretarse a partir de la interacción entre los forzantes marinos y fluviales. El régimen de oleaje predominante desde el suroeste, con alturas significativas medias cercanas a 1,9 m y una potencia aproximada de 18,5 W/m, se asocia a procesos de remoción y redistribución lateral del sedimento, coherentes con el predominio de fases erosivas identificadas en el sector proximal de la barra. Estos procesos se intensifican durante intervalos caracterizados por oleaje más energético y persistente, en los que el forzante marino adquiere una mayor influencia sobre la morfodinámica del sistema, favoreciendo el desplazamiento del canal y reduciendo la estabilidad lateral de la barra, tal como se ha documentado en otros sistemas estuarinos dominados por oleaje (Aguirre *et al*., 2017).

En contraste, las fases de acreción lateral, principalmente en el sector distal de la barra, se presentan de manera coincidente con períodos de mayor descarga fluvial, asociados a una mayor disponibilidad de sedimentos en la zona de desembocadura. Sin embargo, la disminución sostenida de los caudales del río Mataquito en las últimas décadas sugiere una reducción progresiva del aporte sedimentario, lo que se traduce en una menor recurrencia de fases de reconstrucción de la barra y en una evolución del sistema hacia configuraciones morfodinámicas dominadas por procesos marinos, en concordancia con el aumento de las marejadas y el déficit sedimentario vinculado a la megasequía en Chile central (Figura 3).

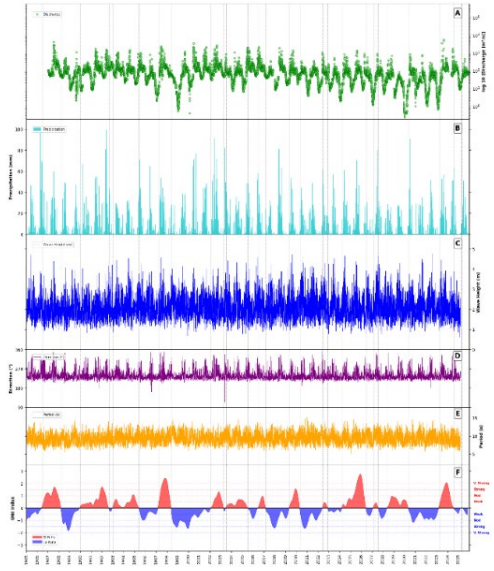


Figura 3. (a)Variación del caudal del Río Mataquito 1987-2025; (b) Precipitación promedio mensual; (c) Altura significativa de la ola; (d) dirección del oleaje en °; (e) periodo en segundos; (f) índice ONI

4. CONCLUSIÓN

El monitoreo multitemporal de la barra arenosa de la desembocadura del río Mataquito mediante técnicas de teledetección, y en particular a través del índice MNDWI, ha permitido evidenciar de manera robusta la respuesta morfodinámica espacialmente diferenciada del sistema frente a eventos extremos de diversa naturaleza. Los resultados muestran que los procesos erosivos y el desplazamiento del canal se intensifican principalmente en el sector proximal, mientras que el sector distal presenta una mayor capacidad de reconstrucción lateral. Esta dinámica se explica por la conectividad sedimentaria con los campos dunares adyacentes, que actúan como fuentes y sumideros dinámicos de sedimento, contribuyendo a la amortiguación de perturbaciones asociadas a marejadas, eventos ENSO y disturbios cosísmicos. En conjunto, estos hallazgos destacan la importancia del monitoreo sistemático de barras arenosas para comprender los mecanismos de resiliencia morfodinámica de las desembocaduras fluviales frente a escenarios de creciente variabilidad climática y a la superposición de forzantes extremos.

5. AGRADECIMIENTOS

Concurso de Investigación Tecnológica IDeA 2023 (ANID, Código Proyecto IT23I0069).

6. REFERENCIAS

Aguirre, C., Rutllant, J. A., & Falvey, M. (2017). Wind waves climatology of the Southeast Pacific Ocean. *International Journal of Climatology*, *37*(12), 4288–4301. https://doi.org/10.1002/joc.5084

Araya Ojeda, M., & Isla, F. I. (2016). Variabilidad hidrológica en la región del Biobío: los eventos El Niño en zonas templadas de Chile. In *Rev. Univ. geogr* (Vol. 25 no.1). ISSN 1852-4265

Cienfuegos, R., Villagran, M., Aguilera, J. C., Catalán, P., Castelle, B., & Almar, R. (2014). Video monitoring and field measurements of a rapidly evolving coastal system: The river mouth and sand spit of the Mataquito River in Chile. *Journal of Coastal Research*, *70*, 639–644. https://doi.org/10.2112/SI70-108.1

DGA. (2020). *Boletines hidrológicos y pronóstico anuales. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas.*

Edmonds, D. A., Chadwick, A. J., Lamb, M. P., Lorenzo-Trueba, J., Murray, A. B., Nardin, W., Salter, G., & Shaw, J. B. (2022). Morphodynamic Modeling of River-Dominated Deltas: A Review and Future Perspectives. In *Treatise on Geomorphology* (pp. 110–140). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00076-6

Fagherazzi, S., Edmonds, D. A., Nardin, W., Leonardi, N., Canestrelli, A., Falcini, F., Jerolmack, D. J., Mariotti, G., Rowland, J. C., & Slingerland, R. L. (2015). Dynamics of river mouth deposits. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 53, Number 3, pp. 642–672). Blackwell Publishing Ltd. https://doi.org/10.1002/2014RG000451

Garreaud, René; Rutland, J. (2006). Variabilidad atmosférica de alta frecuencia en el borde oriental del Anticiclón del Pacífico sureste. *Revista Ciencia y Tecnología del Mar*, 29(1), 5–13.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., & Schepers, D. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly *Journal of the Royal Meteorological Society, 146*(730), 1999–2049.

Lario, J., Zazo, C., & Goy, J. L. (2016). Tectonic and morphosedimentary features of the 2010 Chile earthquake and tsunami in the Arauco Gulf and Mataquito River (Central Chile). *Geomorphology*, *267*, 16–24. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.019

Vos, K., & Harley, M. (2021). *Large regional variability in coastal erosion caused by ENSO*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-666160/v1

SESIÓN 06

Agricultura Sostenible y Resiliente

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.111

Una metodología para estimar la intensidad de las heladas y el daño en plantaciones de naranjos utilizando datos de Meteosat en la Comunidad Valenciana

Gimeno, Sergio [1] **Crisafulli, Virginia** [1] **Sobrino-Gómez, Álvaro** [1] **Sobrino, José Antonio** [1]

[1] Unidad de Cambio Global, Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI) de la Universidad de Valencia. Parque Científico - Campus de Paterna C/ Catedrático José Beltrán nº 2, 46980 Paterna (Valencia)

ORCID: Gimeno 0009-0005-6534-3850 Crisafulli 0000-0003-3480-0594 Sobrino 0000-0003-3787-9373

Correspondencia: sergio.gimeno-crespo@uv.es virginia.crisafulli@uv.es alvaro.sobrino@uv.es jose.sobrino@uv.es

RESUMEN

Los cultivos de cítricos representan uno de los principales pilares económicos de la Comunidad Valenciana (España). Los eventos de heladas suponen una amenaza significativa para estas plantaciones, resultando en pérdidas económicas sustanciales. Este estudio tiene como objetivo evaluar la frecuencia e intensidad de las heladas en la región en un periodo de 20 años, desde 2004 hasta 2023, utilizando imágenes satelitales de Meteosat Second Generation (MSG). Los días de helada se definieron como aquellos en los que las temperaturas descendieron por debajo de -2,3°C, el umbral a partir del cual los frutos de naranja se vuelven susceptibles al daño. Se seleccionaron varios umbrales de temperatura para corresponder con diferentes niveles de daño potencial a los cultivos. El estudio también consideró la duración de estos eventos de helada, para desarrollar una clasificación de intensidad que estima el impacto en los cultivos de cítricos. Se realizaron comparaciones anuales para rastrear tendencias en la ocurrencia de heladas y eventuales anomalías térmicas. La validación se llevó a cabo utilizando datos in situ de la agencia meteorológica nacional española (AEMET). Los resultados revelan un descenso en la severidad de las heladas y en su frecuencia. En particular, se observa un descenso sustancial en las heladas clasificadas según este método como de "daño moderado" y una casi desaparición de aquellas de "daño intenso" o "daño permanente".

Palabras clave: *Cultivos de cítricos, Teledeteccción, daño por helada, Comunidad Valenciana*

Fecha de recepción: 3 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 3 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Una metodología para estimar la intensidad de las heladas y el daño en plantaciones de naranjos utilizando datos de Meteosat en la Comunidad Valenciana

Gimeno, Sergio [(1)], Crisafulli, Virginia [(1)], Sobrino-Gómez, Álvaro [(1)], Sobrino, José A. [(1)]
[(1)] Unidad de Cambio Global, Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI) de la Universidad de Valencia. Parque Científico - Paterna (Valencia)
0009-0005-6534-3850, sergio.gimeno-crespo@uv.es ; 0000-0003-3480-0594, virginia.crisafulli@uv.es. alvaro.sobrino@uv.es ; 0000-0003-3787-9373, sobrino@uv.es.

Resumen: Los cultivos de cítricos representan uno de los principales pilares económicos de la Comunidad Valenciana (España). Los eventos de heladas suponen una amenaza significativa para estas plantaciones, resultando en pérdidas económicas sustanciales. Este estudio tiene como objetivo evaluar la frecuencia e intensidad de las heladas en la región en un periodo de 20 años, desde 2004 hasta 2023, utilizando imágenes satelitales de Meteosat Second Generation (MSG). Los días de helada se definieron como aquellos en los que las temperaturas descendieron por debajo de -2,3°C, el umbral a partir del cual los frutos de naranja se vuelven susceptibles al daño. Se seleccionaron varios umbrales de temperatura para corresponder con diferentes niveles de daño potencial a los cultivos. El estudio también consideró la duración de estos eventos de helada, para desarrollar una clasificación de intensidad que estima el impacto en los cultivos de cítricos. Se realizaron comparaciones anuales para rastrear tendencias en la ocurrencia de heladas y eventuales anomalías térmicas. La validación se llevó a cabo utilizando datos *in situ* de la agencia meteorológica nacional española (AEMET). Los resultados revelan un descenso en la severidad de las heladas y en su frecuencia. En particular, se observa un descenso sustancial en las heladas clasificadas según este método como de "daño moderado" y una casi desaparición de aquellas de "daño intenso" o "daño permanente".

Palabras clave: Cultivos de cítricos, Teledetección, daño por helada, Comunidad Valenciana

A methodology for estimating frost intensity and damage in orange groves using meteosat data: a case study in the valencian community

***Abstract**: Citrus cultivations represent one of the major economic pillars of the Valencian Community (Spain). Frost events pose a significant threat to these plantations, resulting in substantial economic losses. This study aims to assess the frequency and intensity of frost occurrences in the region over a period of 20 years, from 2004 to 2023, utilizing Meteosat Second Generation (MSG) satellite imagery. Frost days were defined as those when temperatures fell below -2.3°C, the threshold at which orange fruits become susceptible to damage. Various temperature thresholds were selected to correspond with different levels of potential damage to the crops. The study also considered the duration of these frost events, to develop an intensity classification that estimates the impact on citrus crops. Annual comparisons were made to track trends in frost occurrence and eventual thermal anomalies. Validation was performed using in situ data from the Spanish national meteorological agency (AEMET). Results reveal a decline in the severity of frosts and in their frequency. In particular, we observe a substantial decline in frosts classified according to our method as "moderate damage" and an almost disappearance of those of "intense" or "permanent damage".*

***Keywords**: Citrus crops, Remote Sensing, frost damage, Valencian Community*

1. INTRODUCCIÓN

Estudios recientes (Balfagon *et al*., 2021; Wang *et al.*, 2022; Karamidehkordi *et al*., 2023) han demostrado que las variaciones climáticas, incluyendo cambios en la temperatura y la precipitación, afectan directamente a la calidad y el rendimiento de los frutos cítricos. Generalmente, los cítricos se adaptan bien a diversos climas, pero su crecimiento está limitado por las bajas temperaturas y las heladas, que pueden ser un factor limitante para la producción agrícola en climas áridos y semiáridos, como los de ciertas regiones mediterráneas (Maracchi *et al*., 2005; Alhader, 2021).

En el contexto de la agricultura de cítricos, las heladas se consideran impactantes cuando la Temperatura de Superficie Terrestre (LST) detectada por satélite desciende a -2,3°C o menos (Caselles & Sobrino, 1989).

En los últimos años, el uso de tecnologías de Teledetección para el monitoreo de heladas ha avanzado significativamente, convirtiéndose en una herramienta indispensable para la evaluación precisa y oportuna de las condiciones agrícolas durante y después de los eventos de heladas (Wang *et al.*, 2020; Li *et al*., 2021). Los satélites METEOSAT de segunda generación (MSG), operados por EUMETSAT, son particularmente efectivos para este propósito debido a su alta resolución temporal (15 minutos), que permite el monitoreo continuo de las condiciones terrestres.

Se decidió monitorear la frecuencia e intensidad de las heladas durante los últimos 20 años en la Comunidad Valenciana, una región donde el sector agrícola de cítricos está altamente desarrollado, representando más de la mitad del área total de cultivo de cítricos de España (Balfagon *et al*., 2021), y posicionando a España como el sexto mayor productor mundial de cítricos frescos (FAO, 2021). Para alcanzar este objetivo, se propone un método práctico de teledetección para cuantificar la magnitud del daño por heladas, utilizando la temperatura mínima alcanzada y la duración de la helada como indicadores clave.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio ha sido la Comunidad Valenciana debido a los diversos tipos de cultivos, particularmente los cítricos, siendo las naranjas los más destacados.

2.2. Conjunto de datos

Se han utilizado imágenes MSG recopiladas desde 2004 hasta 2023, teniendo así imágenes del área de estudio cada 15 minutos. Se procesaron 85208 imágenes en total, comprendiendo 24 imágenes para cada día (la primera imagen obtenida por hora) para los meses de enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre (los meses en los que es más probable la ocurrencia de heladas) a lo largo de todo el período de estudio. De estas imágenes, seleccionamos la banda MSG LST del producto MLST, que proporciona información sobre la LST con una resolución espacial de 3 km.

2.3. Metodología

En primer lugar, los datos de LST obtenidos del satélite se validaron con los registrados por la estación meteorológica 'Villafranca' de AEMET, ubicada en la región de Castellón, para verificar la representatividad de los datos satelitales, para el año 2023.

Se desarrolló una nueva metodología simplificada basada en la LST medida por satélite para detectar posibles daños por heladas. Para tener en cuenta los diferentes impactos en flores, frutos, troncos de árboles y tallos, se establecieron tres umbrales de temperatura críticos basados en la literatura existente (Whiteman, 1957; Conesa *et al*., 2015; Micheloud *et al*., 2017). Dado que la duración de la helada también juega un papel crucial en la determinación de la magnitud del daño a una plantación (Snyder & Melo-Abreu, 2005), se establecieron cuatro umbrales de duración consecutivos para evaluar el impacto potencial en las plantas. De esta forma, se desarrolló un sistema de clasificación para los niveles de intensidad de las heladas combinando arbitrariamente estos parámetros, estableciendo así cuatro categorías de daño (Tabla 1).

Tabla 1. Niveles de daño definidos. (Azul claro = Daño leve; Verde = Daño moderado; Naranja = Daño intenso; Rojo = Daño permanente).

	3 ≤ h < 6	6 ≤ h < 12	12 ≤ h < 24	h ≥ 24
-2,3°C				
-4,0°C				
-9,0°C				

Con esta clasificación, se generaron mapas de intensidad de daño. A cada categoría se le asignó un valor de 'peso' específico para reflejar la severidad del daño: 1 para leve, 2 para moderado, 3 para severo y 4 para daño permanente. El valor de cada categoría se multiplicó entonces por el número de eventos de heladas en cada nivel dentro del intervalo de tiempo seleccionado. La intensidad total para cada píxel se calculó sumando los valores de todas las categorías de heladas, resultando en una medida de intensidad global (OI) (Ec. 1).

$$OI = \sum_{i}^{n} nº\ de\ eventos\ de\ heladas\ \times\ peso \qquad (1)$$

Antes de aplicar la metodología a toda la comunidad, se realizó un análisis de temperatura en la Comunidad Valenciana en el periodo de estudio. Posteriormente, siguiendo la Ec. 1, se generaron mapas de intensidad de daño para cada mes y año. El Test de Mann-Kendall se aplicó entonces para analizar la tendencia individual de cada mes durante todo el período de 2003 a 2024. También se generaron mapas de intensidad de daño para cada año. En este caso, considerando la estacionalidad de los datos, se utilizó el Test de Kendall Estacional para analizar las tendencias.

Se compararon los resultados con el mapa de distribución de áreas agrícolas de cítricos proporcionado por el "Centro de Descargas" del Centro Nacional de Información Geográfica de España, actualizado a 2022. También se analizó la relación entre el daño por heladas y la altura, comparando el mapa de heladas con el Modelo Digital de Elevaciones de la Comunidad Valenciana, también proporcionado por el "Centro de Descargas".

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Validación de LST

Los datos de LST obtenidos del satélite MSG fueron validados comparándolos con los valores de temperatura del aire registrados por la estación 'Villafranca' de AEMET para el año 2023, resultando en un R^2 de 0,91 y un RMSE de 1,5 (Fig. 1) para los datos nocturnos (de 00:00 a 06:00). Este resultado confirma la precisión y fiabilidad de los datos satelitales.

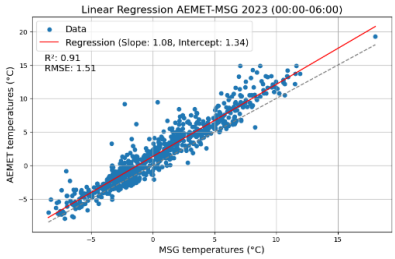


Figura 1. Correlación lineal entre los datos de LST y los datos de temperatura del aire de la estación meteorológica de Villafranca para las horas nocturnas.

3.2. Análisis de la LST en la Comunidad Valenciana

Una comparación de la LST mínima, media y máxima promedio entre las décadas 2004-2013 y 2014-2023 (Fig. 2) reveló que las temperaturas fueron consistentemente más altas en la última década en todos los casos. Este hallazgo es particularmente significativo en nuestro estudio, ya que el aumento de las temperaturas puede, en última instancia, conducir a una disminución de los eventos de heladas y a menores daños por heladas en la vegetación.

3.3. Aplicación de la metodología

Posteriormente, se generaron mapas de intensidad de daño para cada año y cada mes utilizando la metodología previamente descrita. Para identificar posibles tendencias, se realizó el test de Mann-Kendall en cada imagen mensual. Los meses que exhiben una tendencia descendente clara y consistente son marzo y diciembre. Enero, febrero y noviembre muestran una tendencia decreciente solo en ciertas áreas limitadas. No se observó tendencia en abril, lo cual concuerda con datos previos que indican la ausencia de daños significativos durante ese mes a lo largo del período de estudio.

El Test de Tendencia de Kendall Estacional se aplicó al conjunto completo de datos de intensidad de daños para observar la tendencia general a lo largo del tiempo (Fig. 3). Se reveló una tendencia general decreciente en los daños por heladas durante los últimos 20 años, con un descenso observado en el 36,21% de los casos con daños mínimos. En particular, se observa un descenso sustancial en las heladas clasificadas según este método como de "daño moderado" y una casi desaparición de aquellas de "daño intenso" o "daño permanente".

El mapa de intensidad de daño global (Fig. 4) muestra daños por heladas generalizados en la mayor parte de la región, excepto en la zona costera donde no se registraron daños durante el período de estudio. Notablemente, los niveles más altos de intensidad de daños se observaron en la parte noroeste del área de estudio. Al comparar este mapa con el mapa de áreas de cultivo de cítricos, se observó que las áreas de cítricos corresponden a áreas centrales y costeras donde no se detecta tendencia (Fig. 5).

Finalmente, para comprender mejor la relación entre la ocurrencia de heladas y su distribución espacial, se realizó una comparación entre el mapa de intensidad de daños global y la altitud. La regresión lineal obtenida revela una correlación significativa ($p<0,05$), con un valor R de 0,64, mostrando que las heladas más severas generalmente ocurren a mayores elevaciones.

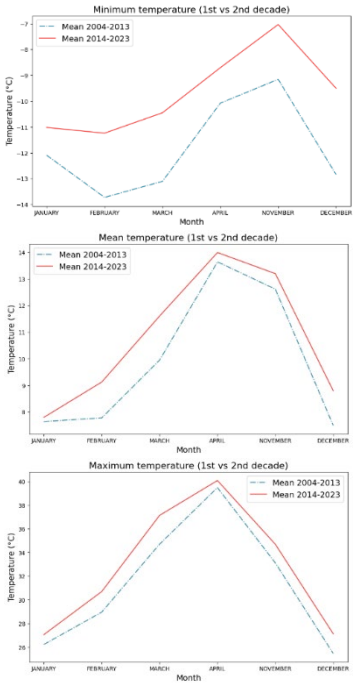


Figura 2. LST mínima, media y máxima promedio medida en la primera década (2004-2013) y las medidas en la segunda década (2014-2023) del período y área de estudio.

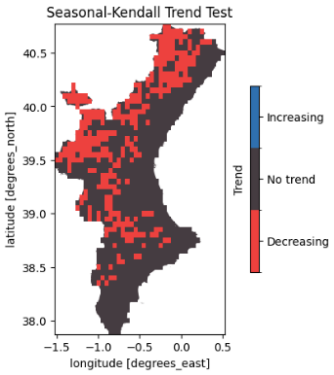


Figura 3. Mapa de resultados del Test de Tendencia de Kendall Estacional realizado sobre los datos de intensidad general de daños por heladas para el período de estudio.

4. CONCLUSIONES

Los datos de LST derivados de satélite, en este caso del MSG, demuestran ser una herramienta útil y fiable para el monitoreo de eventos de heladas.

En la Comunidad Valenciana, ha habido una disminución en la ocurrencia de heladas durante la última década, particularmente en lo que respecta a eventos de heladas intensas. Así, las áreas de cultivo de cítricos parecen estar cada vez menos expuestas al riesgo de heladas en el área de estudio, incluso en elevaciones más altas sobre el nivel del mar.

La metodología propuesta podría ser valiosa para futuros estudios en otras regiones, como en el desarrollo de mapas de riesgo, o para diferentes cultivos económicamente significativos propensos a daños por heladas, como las uvas de vino.

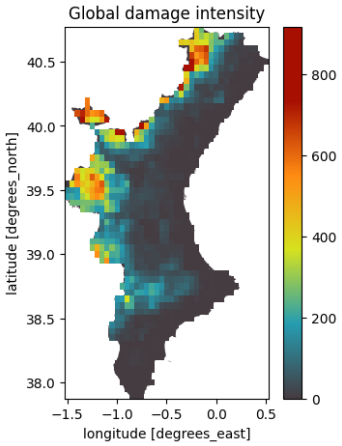


Figura 4. Distribución espacial de la intensidad de daño global en la Comunidad Valenciana para el periodo 2004-2023.

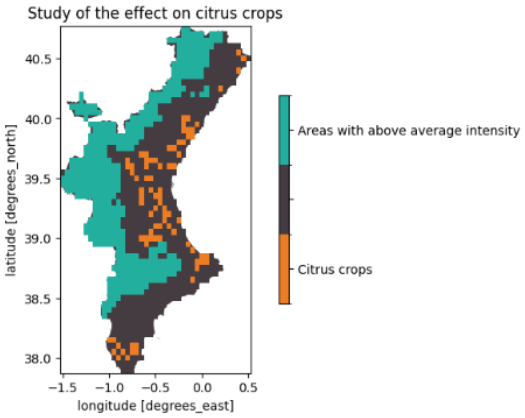


Figura 5. Mapa de superposición de áreas donde ocurren heladas de intensidad superior a la media y áreas cultivadas con cítricos en la Comunidad Valenciana.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Unión Europea y el Gobierno de la Comunidad Valenciana, que cofinanciaron el proyecto "Estimación de Indicadores Medioambientales en la Comunidad VALENciana usando datos de SATélite (VALENSAT)", bajo el plan de financiación INVESTIGO 2022 (INVEST/2022/411). El Gobierno de la Comunidad Valenciana también financió el proyecto "Indicadores medioambientales y fenómenos adversos en la Comunidad Valenciana usando datos de satélite", bajo el plan de financiación PROMETEO 2023 (CIPROM/2023/42). Además, recibió financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del proyecto PID2020-112494RBI00 IPL-LSTM.

6. REFERENCIAS

Balfagón, D., Arbona, V., & Gómez-Cadenas, A. (2021). El futuro de los cítricos: Impacto del cambio climático en la citricultura. *Mètode Revista De Difusió De La Investigació*, 12. https://doi.org/10.7203/metode.12.20319

Caselles, V., & Sobrino, J. (1989). Determination of frosts in orange groves from NOAA-9 AVHRR data. Remote *Sensing of Environment, 29*(2), 135–146. https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90022-9

Conesa, N. A., Nicolás, N. J. M., Manera, N. F. J., & Porras, N. I. (2015). Frost damage in lemon orchards in the province of Murcia. *Acta Horticulturae, 1065*, 1417–1422. https://doi.org/10.17660/actahortic.2015.1065.179

FAO. (2021). CITRUS FRUIT FRESH AND PROCESSED: Statistical Bulletin 2020. Citrus Fruit Statistical Compendium 2020. Rome. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/4760a5b5-f3b2-41c7-8713-ccdb1a5f8c08/content

Karamidehkordi, E., Sadati, S. a. H., Tajvar, Y., & Mirmousavi, S. H. (2023). Climate change vulnerability and resilience strategies for citrus farmers. *Environmental and Sustainability Indicators, 20*, 100317. https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100317

Li, W., Huang, J., Yang, L., Chen, Y., Fang, Y., Jin, H., Sun, H., & Huang, R. (2021). A practical remote sensing monitoring framework for late frost damage in wine grapes using Multi-Source satellite data. *Remote Sensing, 13*(16), 3231. https://doi.org/10.3390/rs13163231

Maracchi, G., Sirotenko, O., & Bindi, M. (2005). Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions: Europe. In *Springer eBooks* (pp. 117–135). https://doi.org/10.1007/1-4020-4166-7_6

Micheloud, N. G., Castro, D. C., Favaro, M. A., Buyatti, M. A., Pilatti, R. A., & Gariglio, N. F. (2017). Respuesta de diferentes variedades de cítricos a los daños causados por fuertes heladas en la región central de Santa Fe. DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals). https://doaj.org/article/aaa8750eaa40427a9216fa72d225e70a

Wang, S., Chen, J., Rao, Y., Liu, L., Wang, W., & Dong, Q. (2020). Response of winter wheat to spring frost from a remote sensing perspective: Damage estimation and influential factors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 168*, 221–235. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.08.014

Wang, S., Xie, W., & Yan, X. (2022). Effects of future climate change on citrus quality and yield in China. *Sustainability, 14*(15), 9366. https://doi.org/10.3390/su14159366

Whiteman, T. M. (1957). Freezing points of fruits, vegetables and florist stocks /. https://doi.org/10.5962/bhl.title.62920

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.119

Comparación entre la demanda teórica de riego y la estimación derivada de un balance hídrico asistido por teledetección a escala de parcela

Molina-Medina, Antonio [1] **González-Piqueras, José** [1] **Garrido-Rubio, Jesús** [2]

[1] Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Castilla – La Mancha, Campus Universitarios/n 02071 Albacete España.

[2] Instituto IMDEA Agua, Avda. Punto Com 2, Alcalá de Henares, 28805, Madrid, Spain

ORCID: Molina-Medina 0000-0002-3706-2489 González-Piqueras 0000-0003-2226-5731 Garrido-Rubio 0000-0002-1739-2616

Correspondencia: antoniojesus.molina@uclm.es jose.gonzalez@uclm.es jesus.garrido@imdea.org

RESUMEN

La estimación precisa del consumo de agua es un elemento clave para la optimización del uso del agua en cultivos extensivos, especialmente en zonas con alta variabilidad climática y creciente presión sobre los recursos hídricos. Los métodos tradicionales, basados en aforos y programación empírica del riego, presentan limitaciones para captar la variabilidad espacial del cultivo. En este trabajo se evalúa la capacidad de la herramienta HIDROMOREweb para estimar las necesidades de riego a escala de parcela mediante balance de agua en el suelo y coeficiente dual de cultivo (FAO56), integrando imágenes de satélite y datos meteorológicos. La estimación se valida con datos suministrados por la Junta Central de Regantes Mancha Oriental que publica para cada campaña su plan de explotación. Los resultados muestran una buena correspondencia entre el consumo teórico asignado a los cultivos y el consumo estimado por teledetección, con coeficientes de R2 superiores al 0.95. Se presenta por tanto la metodología aplicada y los resultados obtenidos para la OCA de La Roda empleando tres años consecutivos con diferentes condiciones climáticas en cuanto a la pluviometría.

Palabras clave: *Teledetección, Riego, Balance hídrico, HIDROMOREweb*

Fecha de recepción: 5 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 5 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Comparación entre la demanda teórica de riego y la estimación derivada de un balance hídrico asistido por teledetección a escala de parcela

Molina-Medina, Antonio [1], González-Piqueras, José [1], Garrido-Rubio, Jesús [2]
[1] Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Castilla – La Mancha. España
0000-0002-3706-2489, antoniojesus.molina@uclm.es.
0000-0003-2226-5731, jose.gonzalez@uclm.es.
[2] Instituto IMDEA Agua, España.
0000-0002-1739-2616, jesus.garrido@imdea.org.

Resumen: La estimación precisa del consumo de agua es un elemento clave para la optimización del uso del agua en cultivos extensivos, especialmente en zonas con alta variabilidad climática y creciente presión sobre los recursos hídricos. Los métodos tradicionales, basados en aforos y programación empírica del riego, presentan limitaciones para captar la variabilidad espacial del cultivo. En este trabajo se evalúa la capacidad de la herramienta HIDROMOREweb para estimar las necesidades de riego a escala de parcela mediante balance de agua en el suelo y coeficiente dual de cultivo (FAO56), integrando imágenes de satélite y datos meteorológicos. La estimación se valida con datos suministrados por la Junta Central de Regantes Mancha Oriental que publica para cada campaña su plan de explotación. Los resultados muestran una buena correspondencia entre el consumo teórico asignado a los cultivos y el consumo estimado por teledetección, con coeficientes de R^2 superiores al 0.95. Se presenta por tanto la metodología aplicada y los resultados obtenidos para la OCA de La Roda empleando tres años consecutivos con diferentes condiciones climáticas en cuanto a la pluviometría.

Palabras clave: Teledetección, Riego, Balance hídrico, HIDROMOREweb.

Comparison between theoretical irrigation demand and estimates derived from a remote sensing-assisted water balance at plot scale

***Abstract**: Accurate estimation of water consumption is a key factor for optimizing water use in extensive cropping systems, particularly in areas with high climatic variability and increasing pressure on water resources. Traditional methods, based on flow measurements and empirical irrigation scheduling, show limitations in capturing the spatial variability of crops. In this study, the ability of the HIDROMOREweb tool to estimate irrigation requirements at the field-plot scale is evaluated through a soil water balance and the dual crop coefficient approach (FAO56), integrating satellite imagery and meteorological data. The estimation is validated using data provided by the Central Board of Irrigators of the Mancha Oriental (JCRMO), which publishes an annual exploitation plan for each irrigation campaign. The results show a strong correspondence between the theoretical water consumption assigned to crops and the consumption estimated through remote sensing, with R² coefficients above 0.95. The methodology applied and the results obtained for the OCA of La Roda are therefore presented, using three consecutive years with different climatic conditions in terms of rainfall.*

***Keywords**: Remote sensing, Irrigation, Water balance, HIDROMOREweb.*

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de regadío en regiones semiáridas enfrenta un creciente estrés hídrico ligado a la variabilidad climática e intensificación de la demanda, lo que exige herramientas operativas que permitan cuantificar y gestionar el agua con resolución espacial fina y actualización frecuente. En el contexto europeo, los informes de la Agencia Europea de Medio Ambiente señalan que el estrés hídrico estacional afecta de forma recurrente a amplias zonas del sur de Europa y recomiendan mejorar la eficiencia y la transparencia en el uso del agua en agricultura (European Environment Agency, 2021). En este sentido, el uso de modelos basados en la metodología FAO56 y el coeficiente dual constituye un marco teórico robusto que integra los procesos de evapotranspiración de los cultivos (ETc), contenido de agua en el suelo y estrés hídrico (Pereira *et al.*, 2020), siempre que se alimente con datos espacialmente distribuidos y coherentes con la dinámica

real del cultivo con el objetivo de monitorizar extensas superficies. Es aquí donde la teledetección ha transformado la manera de monitorizar y gestionar las demandas de agua.

El acceso a series temporales densas de sensores como Sentinel-2 (S2), junto con parámetros biofísicos derivados de índices de vegetación como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), ha permitido mejorar la estimación de coeficientes basales de cultivo (Kcb), ETc ajustada y necesidades netas de riego (Garrido-Rubio *et al*., 2024). Además, la integración de estos datos en modelos FAO56 a través del enfoque RS-IWA (Remote Sensing-based Irrigation Water Accounting) ha demostrado su capacidad para proporcionar estimaciones diarias, espacialmente distribuidas y con precisión comparable a los datos de manejo en campo. En paralelo, implementaciones operativas del modelo RS-IWA como HidroMORE/HIDROMOREweb han acreditado su validez frente a redes in situ y su capacidad para mapear las necesidades netas de agua de riego basadas en teledetección (NIR_{RSb}) en distintos sistemas agrícolas (Garrido-Rubio *et al.*, 2020; Molina-Medina *et al*., 2024).En conjunto, estas evidencias sustentan la integración de teledetección y FAO56 como vía fiable, transparente y escalable para la contabilidad del agua y la optimización del riego a escala de parcela. El objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de RS-IWA para estimar la demanda de riego en cultivos extensivos y validar los resultados mediante datos de riego y observaciones de campo a escala de parcela.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La Oficina Comarcal Agraria (OCA) es una unidad administrativa, que acerca la gestión agraria, ganadera y medioambiental a los ciudadanos en el territorio. Este estudio se realizó sobre las OCA La Roda (28.670 ha regadas), que se sitúa en la masa de agua subterránea Mancha Oriental.

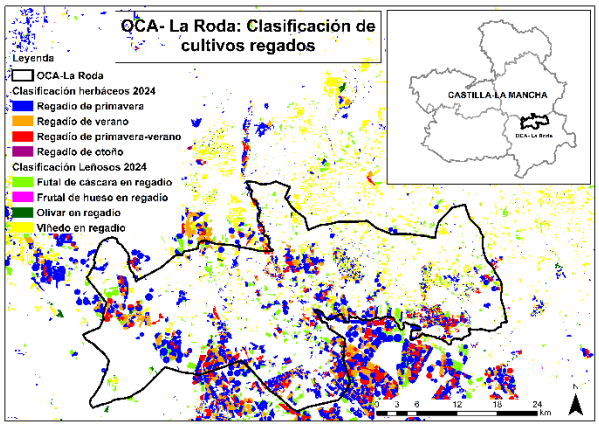


Figura 1. Localización de la OCA la Roda con la clasificación de cultivos por parcela en el año 2024, entrenado con trabajo de campo propio.

Dicha masa está localizada mayoritariamente en la provincia de Albacete (España) y pertenece a la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Se han empleado los años 2022, 2023 y 2024 que cuentan con diferentes condiciones pluviométricas, para poder abarcar diferentes condiciones climáticas y de manejo. El clima en el área de estudio es el mediterráneo continental, caracterizado por una acusada variación estacional con inviernos fríos y veranos calurosos. La precipitación (P) es baja y se distribuye irregularmente a lo largo del año, con mayores cantidades durante el otoño y la primavera, siendo la media de 340 mm durante los últimos 30 años.

2.2. Teledetección y datos meteorológicos

En este estudio, se han seleccionado imágenes NDVI para seguir el crecimiento de los cultivos durante cada la campaña agrícola. La serie temporal de imágenes está formada por imágenes procedentes de la constelación S2 formada por los satélites gemelos S2A y S2B, cuya alta frecuencia temporal de imágenes (alrededor de 1 imagen cada 5 días) permitió describir el ciclo de crecimiento del cultivo y estimar con precisión los parámetros utilizados en este estudio. Además, los efectos de distorsión atmosférica en los valores de las imágenes son compensados mediante un procedimiento de normalización para el NDVI (Chen *et al.*, 2005). Para ello, los valores máximos y mínimos de NDVI obtenidos para cada imagen en superficies consideradas invariantes (vegetación densa como alfalfa y suelo desnudo) son reescalados linealmente a los valores correspondientes de NDVI para estas superficies en función de los valores comunes observados en el área de estudio (0.91 y 0.15, respectivamente). Las fechas de adquisición de las imágenes utilizadas pertenecen al gránulo T30SWJ y T30SXJ, van desde 01/12/2021) hasta 31/12/2024) contando con 175 imágenes para los tres años de estudio, y que con una resolución espacial de 10 m es suficiente para monitorear áreas homogéneas. La evolución temporal del NDVI se ha interpolado en una escala diaria, empleando las imágenes satelitales elegidas en cada campaña, el sistema requiere utilizar una herramienta de estadísticas zonales de SIG, que asocia a cada parcela su valor NDVI promedio para cada día del año. Para ello se calcula el valor promedio del NDVI de la parcela en las fechas de las que se dispone de imagen y posteriormente se interpola linealmente entre fechas. Asimismo, se asigna a cada parcela el valor diario de P y evapotranspiración de referencia (ETo). Los datos meteorológicos se obtuvieron de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). Los datos utilizados en este estudio fueron la ETo calculada utilizando la ecuación FAO56 Penman-Monteith (Allen 1998) y la P diaria acumulada. De esta manera HIDROMOREweb utiliza información de las capas ráster de 5x5 km de ETo y P proporcionadas por AEMET para toda la Península (Campoy *et al*., 2025; Molina-Medina *et al*., 2025).

2.3. Balances de agua asistido por satélite

La herramienta HIDROMOREweb opera vía web para estimar las componentes del balance de agua en la capa del suelo explorada por las raíces, de un cultivo o cubierta general, a lo largo de un intervalo de temporal determinado o bien definido en su ciclo de crecimiento completo. HIDROMOREweb opera a alta resolución espacial, limitado según la resolución espacial del satélite empleado, en este caso 10 m, y proporciona las

componentes a escala diaria y tiene alcance global. Es importante destacar que la herramienta estima, entre otros parámetros como (ETc ajustada, ETc potencial, P, Transpiración potencial, Transpiración ajustada, ETo, Evaporación y percolación), las NIR_{RSb}, bien para mantener condiciones de confort hídrico en la vegetación, o bien para aplicar condiciones de riego deficitario controlado a lo largo del ciclo de crecimiento. La metodología para determinar las NIR_{RSb} es la de un balance de agua diario, en la capa de suelo explorada por las raíces. En este trabajo se sigue el procedimiento descrito de coeficiente dual por FAO56 (Pereira *et al.*, 2024). En él, la evapotranspiración del cultivo (ETc) se calcula mediante el producto del denominado coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), por la demanda evaporativa de la atmósfera, esto es la ETo, que se calcula desde datos meteorológicos. En el coeficiente de cultivo se separan la parte de la transpiración, Kcb, y la parte de la evaporación. Cuando el contenido de agua en suelo cae por debajo de un cierto valor umbral, que depende del cultivo, éste entra en estrés hídrico. La modelización del contenido de agua en suelo permite activar el momento de aplicar el riego en función del estrés tolerado (FAO56). La cuantía de agua total aplicada se obtiene por agregación de los riegos individuales. La serie temporal de imágenes de satélite se integra en este modelo de balance al proporcionar el valor del Kcb (con valores que oscilan entre 0.15 y 1.15), y por tanto determinar, junto con la ETo, el potencial de transpiración de la cubierta. En este trabajo se utiliza la relación Kcb = 1,44 NDVI – 0,1 propuesta por (Campos *et al.*, 2010) se aplica a todos los cultivos. Esta metodología ha sido validada en diferentes cultivos (Garrido-Rubio *et al.*, 2020). El software HIDROMOREweb utiliza como entradas: las series temporales de NDVI y variables meteorológicas descritas en el apartado 2.2. Además, se identifica el cultivo que se encuentra en cada parcela de la capa vectorial, definiendo su ciclo de crecimiento (mediante una fecha inicial y final o umbrales basados en valores NDVI). Asimismo, los parámetros requeridos en el balance de agua para cada cultivo se encuentran preconfigurados para diversos cultivos basados el manual FAO56. También se puede definir la estrategia de riego y, por último, se define el valor de agua disponible en suelo por unidad de profundidad (mm/m) que denominamos TAW para todas las parcelas y el valor de la fracción de agotamiento de la humedad en el suelo (p), capaz de determinar el valor umbral para definir cuando el cultivo entra en estrés hídrico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este estudio propone una herramienta basada en teledetección capaz de cuantificar NIR_{RSb} a escala de parcela durante tres años consecutivos, obteniendo la contabilidad de agua de forma individual. Los resultados obtenidos a escala de parcela se agregaron por tipo de cultivo obteniendo para cada cultivo mayoritario de la zona de estudio su consumo (m^3) y la superficie (ha) y poder obtener así el consumo unitario (m^3/ha) para cada cultivo y campaña de riego (Tabla 1). Estos datos se validaron mediante el plan de explotación que publica la JCRMO (https://www.jcrmo.org) donde hace una diferenciación de cultivos y asigna un consumo teórico (m^3/ha) para cada cultivo y campaña de riego.

Tabla 1. Evaluación de los consumos unitarios por cultivo y campaña de riego.

Cultivos	JCRMO Consumo (m^3/ha)	RS-IWA 2024 Consumo (m^3/ha)	RS-IWA 2023 Consumo (m^3/ha)	RS-IWA 2022 Consumo (m^3/ha)
Alfalfa	8.000	8.250	8.250	7.500
Trigo	3.100	2.950	3000	2.450
Cebolla	5.800	5.100	5.200	5.400
Almendro	2.300	2.250	2.300	2.700
Viña	1.500	1.450	1.200	1.830
Cebada	2.600	2.450	2.850	1.800
Maíz	6.000	5.500	5.100	6.000
Ajo	2.800	2.700	2.850	2.350

Como podemos observar en la Tabla 1, la JCRMO estima para cada cultivo un consumo unitario igual en las tres campañas de riego, mientras que mediante la RS-IWA somos capaces de evaluar en cada una de las campañas de riego el consumo estimado de cada uno de los cultivos en un escenario meteorológico diferente cada año y ver su respuesta sujeta al manejo de los agricultores, evidenciando que el consumo depende en gran medida de cómo se distribuyen las P a lo largo de la campaña de riego y el manejo. Por ello, presentamos la figura 2 para discutir el consumo estimado (RS-IWA) frente al consumo teórico (JCRMO). Los años evaluados muestra un ajuste lineal consistente, sin tendencia sistemática a la sobreestimación o infraestimación. La excepción se observa en 2022, año caracterizado por una prolongada ausencia de P, donde la respuesta diferencial entre cultivos herbáceos, leñosos y hortícolas refleja adecuadamente su sensibilidad y estrategias de manejo bajo estrés hídrico.

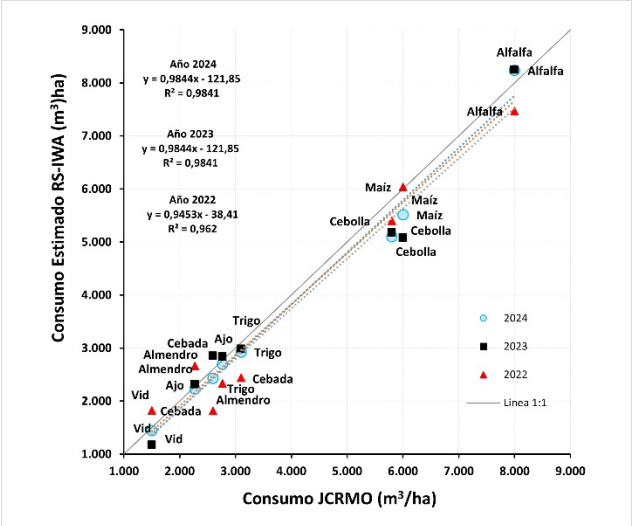


Figura 2. Evaluación anual (2022-2024) del consumo unitario (JCRMO) y consumo estimado RS-IWA en la OCA La Roda perteneciente a la masa de agua Mancha Oriental.

La agregación de parcelas por tipo de cultivo muestra una convergencia notable con las dotaciones teóricas publicadas por la JCRMO, lo que sugiere que, a nivel agregado, el consumo medio de cada cultivo se aproxima de forma consistente a los valores de referencia establecidos para la campaña. Sin embargo, cuando el análisis se realiza a escala de parcela individual, emerge un patrón mucho más heterogéneo: se observa un amplio rango de consumos entre parcelas clasificadas bajo el mismo tipo de cultivo, con algunas unidades de superficie que presentan consumos sensiblemente inferiores y otras muy elevados. Destacamos las parcelas de trigo regado cuyo consumo unitario es de 2.925 m^3/ha y una desviación estándar de 570 m^3/ha, dónde el consumo estimado para cada parcela varia (1.350 mínimo a 4.050 máximo), con una muestra de 456 parcelas y 2.966 ha en el año 2024, siendo similares los datos de los otros años. Esta variabilidad intra-cultivo pone de manifiesto la importancia de emplear herramientas de estimación parcelaria para capturar adecuadamente la diversidad de respuestas hídricas dentro de un mismo sistema.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que la contabilidad de agua de riego basada en teledetección RS-IWA mediante HIDROMOREweb constituye una herramienta robusta para la estimación parcelaria de las NIR_{RSb}, permitiendo caracterizar con precisión el consumo de agua para cada cultivo y cada campaña bajo condiciones meteorológicas contrastadas. La comparación con las dotaciones teóricas publicadas por la JCRMO revela una coincidencia notable a escala agregada por cultivo, lo que valida el enfoque RS-IWA como metodología fiable para la contabilidad del agua a nivel operativo, esto mismo se confirmó en (Garrido-Rubio *et al.*, 2020), lo que confirma la madurez técnica del sistema para la contabilidad del agua de riego.

Sin embargo, el análisis detallado a escala de parcela evidencia una variabilidad intra-cultivo considerable pues se muestran consumos muy diferentes entre sí. Un trabajo futuro es contrastar los datos frente a los contadores ya instalados en las parcelas de estudio. Esta heterogeneidad confirma la fuerte influencia de factores locales como propiedades del suelo, estado vegetativo, profundidad radicular y manejo individual del riego que no pueden captarse mediante estimaciones teóricas uniformes. En este sentido, la teledetección aporta una capacidad única para capturar la respuesta de cada parcela al agua de riego, mejorando la resolución y la utilidad de la información frente a enfoques tradicionales. En conjunto, este estudio demuestra que la aplicación RS-IWA permite avanzar hacia una contabilidad del agua más precisa, dinámica y adaptada a la realidad productiva, constituyendo un soporte fundamental para la planificación del riego, la gestión de recursos hídricos y la toma de decisiones en territorios con alta presión sobre los acuíferos.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto EUNOMIA (Proyecto referencia PID2024-161881OB-C21 y PID2024-161881OB-C22 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE).

6. BIBLIOGRAFÍA

Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (Vitis vinifera L.). *Agric. Water Manag. 98*, 45–54. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011

Campoy, J., Beltrán, A., Moreno, R., Molina, A., Calera, A., 2025. Balance de agua asistido por satélite para determinar las demandas de agua de riego de los cultivos. La herramienta HIDROMOREweb.

Chen, X., Vierling, L., Deering, D., 2005. A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. *Remote Sens. Environ. 98*, 63–79. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.021

Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., Calera, A., Osann, A., 2024. Remote sensing-based green and blue agricultural water footprint estimation at the river basin scale. *Ecol. Indic. 167*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112643

Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., Campos, I., Osann, A., González-Gómez, L., Calera, A., 2020. Remote sensing–based soil water balance for irrigation water accounting at plot and water user association management scale. *Agric. Water Manag. 238*. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106236

Molina-Medina, A., Campoy, ;, Jaime, Cañadas, ;, Diego, González, ;, Agustin, González-Piqueras, ;, José, Calera, ;, Alfonso, 2025. XL Congreso Nacional de Riegos ALBACETE 11, 12 y 13 de junio de 2025 Demanda de agua de riego en Maíz, Trigo y Cebada mediante HIDROMOREweb y su comparación con datos de campo. Albacete.

Molina-Medina, A., Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., Calera, A., 2024. Balance de agua en el suelo asistido por Teledetección sobre el acuífero Los Arenales-Tierra de Pinares para el seguimiento de extracciones de agua de riego.

Pereira, L.S., López-Urrea, R., Ortega-Farias, S., 2024. Editorial to the special issue on "Contributions to update the FAO56 guidelines for computing crop water requirements." Irrig. Sci. https://doi.org/10.1007/s00271-024-00975-x

Pereira, L.S., Paredes, P., Jovanovic, N., 2020. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agric. Water Manag.* https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.120

Integración de teledetección multiplataforma para la monitorización del vigor y el estrés hídrico en cultivos de viñedos y olivares

Marcello Ruiz, Francisco Javier [1] **Eugenio González, Francisco** [1] **Mederos Barrera, Antonio** [1]

[1] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España

ORCID: Marcello Ruiz 0000-0002-9646-1017 Eugenio González 0000-0002-0010-4024
Mederos Barrera 0000-0003-1680-0726

Correspondencia: javier.marcello@ulpgc.es francisco.eugenio@ulpgc.es antonio.mederos@ulpgc.es

RESUMEN

Patrones claros y consistentes de vigor del cultivo, fenología y estado hídrico en viñedos y olivares pueden obtenerse cuando la información procedente de múltiples plataformas de teledetección se analiza de forma conjunta. En este estudio, el uso combinado de imágenes multiespectrales y térmicas de Sentinel-2, WorldView y UAV permitió la caracterización de las condiciones del cultivo desde escalas regionales hasta intra-parcela. Las series temporales de Sentinel-2 (2020–2025) capturaron, a 10 y 20 m de resolución, la variabilidad interanual y el desarrollo estacional, identificando periodos recurrentes sensibles al estrés. Los datos WorldView, con una resolución espacial de 50 cm, revelaron fuertes contrastes espaciales en densidad y vigor del dosel en grandes zonas de producción, mientras que las observaciones UAV, a 10 cm, mostraron la heterogeneidad a escala fina asociada al estrés hídrico y a la variabilidad estructural. Un subconjunto de índices de vegetación, seleccionado a partir de un conjunto inicial de 27, mostró una correlación robusta con mediciones de campo de potencial hídrico foliar, contenido de clorofila y estado fenológico. En comparación con análisis de una única plataforma, el enfoque integrado produjo una discriminación marcadamente mejorada de niveles de estrés y clases de vigor. Estos resultados demuestran que la fusión de datos multiplataforma proporciona una base fiable y operativa para la gestión de precisión de cultivos perennes, apoyando intervenciones dirigidas en sistemas de vid y olivo.

Palabras clave: *Agricultura de precisión; Sentinel-2; WorldView; Sensores UAV; Índices de vegetación*

Fecha de recepción: 5 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 5 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Integración de datos de teledetección multiplataforma para la monitorización del vigor y el estrés hídrico en cultivos de viñedos y olivares

Marcello Ruiz, Francisco Javier [(1)], Eugenio González, Francisco [(1)], Mederos Barrera, Antonio [(1)]

[(1)] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España.

0000-0002-9646-1017, javier.marcello@ulpgc.es.

0000-0002-0010-4024, francisco.eugenio@ulpgc.es.

0000-0003-1680-0726, antonio.mederos@ulpgc.es.

Resumen: Patrones claros y consistentes de vigor del cultivo, fenología y estado hídrico en viñedos y olivares pueden obtenerse cuando la información procedente de múltiples plataformas de teledetección se analiza de forma conjunta. En este estudio, el uso combinado de imágenes multiespectrales y térmicas de Sentinel-2, WorldView y UAV permitió la caracterización de las condiciones del cultivo desde escalas regionales hasta intra-parcela. Las series temporales de Sentinel-2 (2020–2025) capturaron, a 10 y 20 m de resolución, la variabilidad interanual y el desarrollo estacional, identificando periodos recurrentes sensibles al estrés. Los datos WorldView, con una resolución espacial de 50 cm, revelaron fuertes contrastes espaciales en densidad y vigor del dosel en grandes zonas de producción, mientras que las observaciones UAV, a 10 cm, mostraron la heterogeneidad a escala fina asociada al estrés hídrico y a la variabilidad estructural. Un subconjunto de índices de vegetación, seleccionado a partir de un conjunto inicial de 27, mostró una correlación robusta con mediciones de campo de potencial hídrico foliar, contenido de clorofila y estado fenológico. En comparación con análisis de una única plataforma, el enfoque integrado produjo una discriminación marcadamente mejorada de niveles de estrés y clases de vigor. Estos resultados demuestran que la fusión de datos multiplataforma proporciona una base fiable y operativa para la gestión de precisión de cultivos perennes, apoyando intervenciones dirigidas en sistemas de vid y olivo.

Palabras clave: Agricultura de precisión; Sentinel-2; WorldView; Sensores UAV; Índices de vegetación.

Multiplatform Remote Sensing Data Integration for Monitoring Vigor and Water Stress in Vineyards and Olive Orchards

***Abstract**: Clear and consistent patterns of crop vigor, phenology, and water status in vineyards and olive groves can be obtained when information from multiple remote sensing platforms is jointly analyzed. In this study, the combined use of Sentinel-2, WorldView, and UAV-based multispectral and thermal imagery enabled the characterization of crop conditions from regional to within-field scales. Sentinel-2 time series (2020–2025), with 10 and 20 m spatial resolution, captured interannual variability and seasonal development, identifying recurrent stress-sensitive periods. WorldView data sharpened to 50 cm revealed strong spatial contrasts in canopy density and vigor over large production zones, while UAV observations at 10 cm presented fine-scale heterogeneity associated with water stress and structural variability. A subset of vegetation indices, selected from an initial pool of 27, exhibited robust agreement with ground measurements of leaf water potential, chlorophyll content, and phenological stage. Compared with single-platform analyses, the integrated approach produced markedly improved discrimination of stress levels and vigor classes. These results demonstrate that multiplatform fusion provides a reliable and operational basis for precision management of perennial crops, supporting targeted interventions in grapevine and olive systems.*

***Keywords**: Precision agriculture; Sentinel-2; WorldView; UAV sensors; Vegetation indices.*

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión se ha consolidado como una herramienta fundamental para optimizar la producción agrícola garantizando, al mismo tiempo, la sostenibilidad ambiental a largo plazo. Como resultado, se incrementa la eficiencia en el uso de insumos —fertilizantes, agua y

productos fitosanitarios—, se reduce la sobreutilización y se mitigan impactos ambientales adversos.

Entre los distintos cultivos agrícolas, los olivares y los viñedos ocupan una posición destacada a escala global, debido a su relevancia económica, cultural y ecológica. El olivo, representa un componente estratégico de la agricultura por su relevancia económica, nutricional y ambiental. Además, los olivares contribuyen a la sostenibilidad de los agroecosistemas al disminuir la erosión, favorecer la biodiversidad en áreas marginales y mantener productividad bajo condiciones semiáridas, mostrando elevada resiliencia ante escenarios de estrés climático. De manera complementaria, la vid sustenta la industria vitivinícola, una de las cadenas agroalimentarias con mayor valor añadido, extendiéndose a diversas condiciones agroclimáticas y a nuevas regiones productoras; su cultivo impulsa economías rurales mediante la generación de empleo, turismo y comercio internacional.

Un componente central de la agricultura de precisión moderna es el uso de datos de teledetección. La teledetección multiplataforma permite integrar información procedente de satélites, aeronaves tripuladas y UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*). Cada plataforma presenta ventajas específicas en términos de resolución espacial, temporal y espectral, y su combinación proporciona una comprensión más completa del estado de los cultivos. Las imágenes satelitales ofrecen una amplia cobertura espacial y consistencia temporal a largo plazo, lo que las hace idóneas para el seguimiento de tendencias estacionales y de la variabilidad a gran escala. Por su parte, los UAV proporcionan datos de ultra alta resolución capaces de capturar patrones de detalle fino asociados a la estructura del dosel, la incidencia de enfermedades o el estrés hídrico localizado (Sharma *et al.*, 2025).

Los índices de vegetación derivados de datos de teledetección son especialmente útiles para la detección temprana de estrés, la estimación de biomasa y la evaluación de los efectos de las prácticas de manejo a lo largo de las campañas agrícolas (Crespo *et al*., 2024; Radočaj *et al.,* 2023). Su integración, en análisis multitemporales, permite seguir el desarrollo fenológico, evaluar la resiliencia de los cultivos frente a eventos climáticos extremos y anticipar variaciones en el rendimiento.

En este contexto, el objetivo principal de este trabajo es proporcionar una evaluación del estado sanitario, el vigor y la dinámica de desarrollo de viñedos y olivares, así como caracterizar la variabilidad espacial existente dentro de cada parcela. Para ello, se emplean datos de teledetección multiplataforma y multisensor.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos

La agricultura en las Islas Canarias (España) desempeña un papel clave tanto en la economía como en la identidad cultural del archipiélago, a pesar de las limitaciones impuestas por su relieve volcánico, la escasez de suelo agrícola y las condiciones climáticas semiáridas.

El seguimiento de viñedos y olivares en las Islas Canarias se basó en la integración de datos de teledetección satelital y UAV con el fin de capturar información espacial y temporal a múltiples escalas. Las imágenes multiespectrales Sentinel-2 constituyeron la base del análisis gracias a su alta frecuencia de revisita, su resolución espacial de 10–20 m y un rango espectral entre 442–2202 nm, permitiendo la monitorización continua de la dinámica de la vegetación, el desarrollo fenológico y los indicadores de estrés a gran escala. Como complemento, se incorporaron imágenes adquiridas de alta resolución de los satélites WorldView-2/3/Legion, que aportan detalle espacial a nivel métrico y hasta ocho bandas espectrales (400–1040 nm), facilitando la detección de pequeñas variaciones en el dosel, gradientes de vigor y heterogeneidad estructural dentro de las parcelas.

A escala local, se adquirieron datos UAV mediante una plataforma DJI Matrice 350 RTK (80 m de altura de vuelo, a 5 m/s de velocidad y solape del 80%) equipada con un sensor multiespectral MicaSense RedEdge-MX Dual de 10 bandas (444–842 nm), caracterizado por su alta precisión radiométrica y bandas espectrales estrechas, idóneas para el cálculo avanzado de índices de vegetación y la estimación detallada de parámetros biofísicos. Adicionalmente, se utilizó el sensor térmico Zenmuse H20T para la obtención de la temperatura del dosel, permitiendo la evaluación del estrés hídrico con una elevada resolución espacial. Las imágenes UAV se generaron con un tamaño de píxel de 10 cm.

Además de los datos de teledetección, se realizaron mediciones de campo, coincidentes con los vuelos dron, para apoyar la selección de los índices de vegetación más adecuados tanto en viñedos como en olivares. En el caso de los viñedos, se registró información detallada sobre las características de las parcelas analizadas, las prácticas de manejo y el estado general del cultivo. De forma complementaria, se midió el contenido de clorofila mediante un medidor portátil Apogee MC-100, parámetro estrechamente relacionado con el estado nutricional nitrogenado del cultivo y representativo de condiciones de manejo acumuladas.

En los olivares, se recopiló información relativa a las características de las parcelas estudiadas, el estado del cultivo y las prácticas de manejo. Asimismo, se realizaron observaciones fenológicas y mediciones del tamaño del fruto para caracterizar el desarrollo del cultivo durante el periodo de estudio. Adicionalmente, se registraron datos microclimáticos continuos mediante *dataloggers* de temperatura del aire y humedad relativa, proporcionando el contexto ambiental necesario para interpretar las firmas espectrales y térmicas captadas por los sensores satelitales y UAV.

2.2. Metodología

El flujo de procesamiento se diseñó para generar indicadores de estrés de la vegetación a múltiples escalas para cada plataforma de observación, como se observa en las Figura 1.

Las imágenes Sentinel-2, de nivel 2A, han sido sometidas a un preprocesado estándar que incluye el

enmascaramiento de nubes y la corrección atmosférica, seguido del cálculo de un conjunto amplio de índices de vegetación. Posteriormente, correlando con la información de campo se llevó a cabo un análisis con el fin de identificar los índices más adecuados, considerando su sensibilidad al contenido de clorofila, la estructura del dosel y el estrés hídrico. Estos índices se calcularon para cada fecha y se construyeron series temporales, usando imágenes despejadas entre 2020 y 2025, que permitieron evaluar los patrones estacionales y la evolución del estrés a lo largo del ciclo de cultivo.

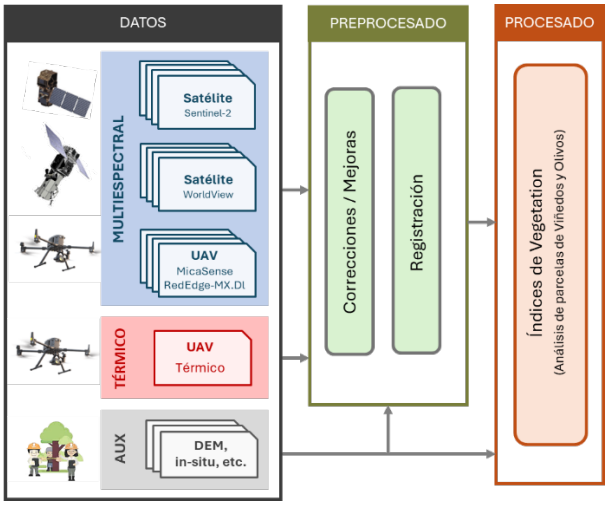


Figura 1. Diagrama de integración de datos multiplataforma para el análisis multiescala en viñedos y olivares.

Las imágenes WorldView requirieron correcciones adicionales de alta precisión para garantizar la consistencia radiométrica y la exactitud geométrica (Marcello *et al.*, 2016). La calibración radiométrica y la corrección atmosférica se realizaron mediante el modelo FLAASH, incorporando metadatos específicos del sensor para la configuración del contenido de vapor de agua, el espesor de aerosoles y la geometría de iluminación. La ortorrectificación se llevó a cabo utilizando uel modelo digital del terreno (MDT) del PNOA de alta resolución (2 m), con el fin de minimizar las distorsiones geométricas, especialmente relevantes en un terreno abrupto y altamente heterogéneo.

En el caso de los datos UAV, las imágenes adquiridas por ambos sensores se procesaron mediante calibración radiométrica, utilizando paneles de reflectancia y algoritmos de corrección específicos del sensor, seguidas de la alineación geométrica y la generación de mosaicos. Un paso crítico del preprocesado fue el registro preciso de las imágenes, indispensable para asegurar la coherencia espacial entre datos procedentes de distintas plataformas y sensores. Este aspecto se realizó de forma manual y resulta particularmente relevante al integrar imágenes multiespectrales y térmicas adquiridas por el UAV, ya que permite la superposición exacta de ambos conjuntos de datos y facilita la fusión de información espectral y térmica para la generación de índices de vegetación integrados.

Finalmente, se calcularon los índices de vegetación para estimar de forma cuantitativa el vigor vegetal, el contenido de clorofila y agua, así como de la actividad fotosintética. En este estudio se evaluó un total de 27 índices de vegetación (Rodríguez *et al.*, 2024) derivados de las bandas multiespectrales de Sentinel-2 (NDVI, EVI, SAVI, MSAVI2, GNDVI, SR, MSR, GEMI, WDRVI, WVVI, ARVI, MCARI2, TCARI, MTVI2, RENDVI, SIPI, CCI, ARI2, CRI2, PSRI, NPCR, NBR, NDWI, DWSI, MSI, FCI1 y FCI2). Mediante el análisis de las series temporales, el estudio de la fenología de cada cultivo, el comportamiento de los distintos elementos de cobertura del suelo presentes en las imágenes (cultivo, suelo desnudo y vegetación circundante), y la comparación con la información in situ disponible, se identificaron los índices más representativos (NDVI, EVI, MSAVI2, GNDVI, MCARI2, RENDVI, NDWI). Estos índices (salvo NDWI) fueron posteriormente seleccionados para su aplicación, tanto en los datos WorldView como en los datos UAV, con el objetivo de capturar la variabilidad a escala fina dentro de las parcelas individuales. De forma complementaria, el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) se calculó a partir de los datos térmicos adquiridos por el UAV (Ramírez-Cuesta *et al*., 2025).

En definitiva, se analizaron 21 parcelas agrícolas distribuidas en todas las islas del archipiélago canario (13 parcelas de viñedo y 8 parcelas de olivar). El estudio integró información multifuente y multiescala procedente de Sentinel-2 y WorldView-2/3/Legion, complementada con 42 campañas UAV (21 vuelos con sensor multiespectral y 21 con térmico).

3. RESULTADOS

A continuación, se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos.

A partir de Sentinel-2 se generó una serie temporal libre de nubes (2020–2025). Debido a la marcada heterogeneidad espacial en la persistencia de nubosidad dentro del archipiélago, la disponibilidad temporal varió notablemente entre parcelas: en algunos casos se dispuso de múltiples imágenes mensuales, mientras que en otros apenas fue posible seleccionar una única escena válida.

A modo de ejemplo, para una parcela en Tenerife, la Figura 2 presenta la evolución temporal del NDVI diferenciando tres tipos de cubierta (vid, suelo desnudo y otra vegetación fuera de la parcela), además del valor medio para la parcela completa. Asimismo, se incluyen mapas NDVI codificados por colores para las escenas de mediados de julio de cada año, permitiendo comparar visualmente las variaciones interanuales de vigor.

En el caso de WorldView, tras aplicar el flujo de preprocesado descrito previamente, se calcularon los índices seleccionados. Adicionalmente, se evaluó el impacto del realce espacial mediante *pansharpening*, comparando mapas de vigor generados con bandas multiespectrales originales frente a productos espacialmente mejorados.

Para los datos UAV se generaron índices a partir de información multiespectral y térmica. Como demostración del enfoque multiplataforma y multiescala, la Figura 3 presenta mapas de NDVI para una parcela de

olivar en La Palma, donde las diferencias de resolución espacial entre Sentinel-2, WorldView y UAV son evidentes.

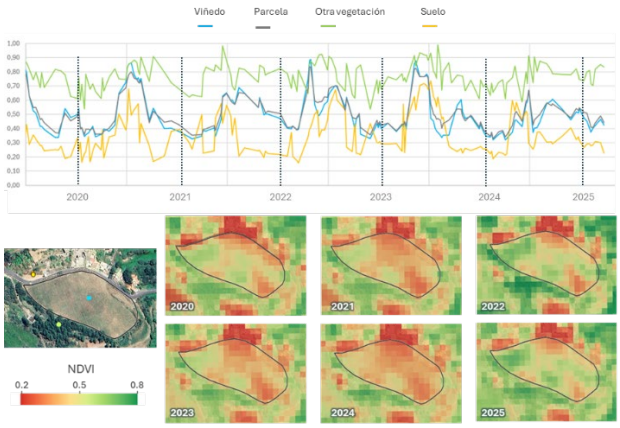


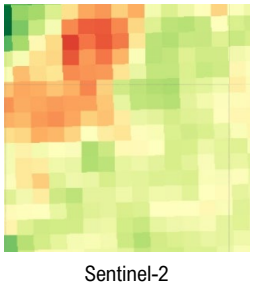
Figura 2. Series temporales del NDVI por clases de cobertura del suelo identificadas en el mapa, junto con cartografía del NDVI en composición cromática para mediados de julio.

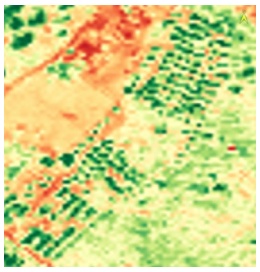
4. CONCLUSIONES

La teledetección se consolida como una herramienta clave para la monitorización del estado de viñedos y olivares. En este trabajo se ha desarrollado y aplicado un enfoque multiplataforma y multiresolución que integra datos Sentinel-2, WorldView y UAV para el análisis de 21 parcelas distribuidas en el archipiélago canario. Los resultados demuestran que las series temporales Sentinel-2, durante el periodo 2020–2025, son especialmente adecuadas para el análisis fenológico y la comparación interanual a gran escala, mientras que las imágenes WorldView, tras un procesamiento riguroso, permiten caracterizar la variabilidad espacial a nivel de parcela con un compromiso óptimo entre cobertura y detalle. Por su parte, los datos UAV multiespectrales y térmicos proporcionan una caracterización de alta precisión a escala intraparcelaria, esencial para la implementación de estrategias de manejo diferenciado.

La evaluación comparativa de un amplio conjunto de índices de vegetación permite identificar aquellos más representativos para la estimación del vigor, el contenido de clorofila y el estado hídrico en viñedos y olivares, garantizando su aplicabilidad consistente en distintas plataformas. La validación mediante mediciones de campo reforzaría la fiabilidad de los índices seleccionados, evidenciando su capacidad para reflejar parámetros fisiológicos clave del cultivo.


RGB


Sentinel-2


WorldView

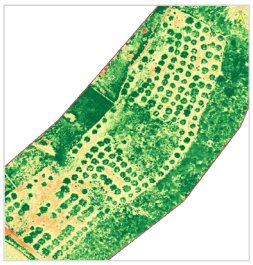

Dron-Micasense

Figura 3. Comparación del NDVI para las 3 diferentes plataformas: Sentinel-2 (7 mayo 2024), WorldView-2 (4 mayo 2024) y dron multiespectral (13 junio 2025).

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto “Agricultura de precisión para el control del estrés hídrico y la prevención de enfermedades en cultivos de vid y olivo” (Convenio CC 25/63), de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Soberanía Alimentaria del Gobierno de Canarias. La participación en el congreso ha sido financiada por el Organismo Autónomo Parques Nacionales (Proyecto SPIP2022-02897). También se agradece al Programa Copernicus el suministro de los datos Sentinel-2 y al Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA-LiDAR) la disponibilidad del Modelo Digital de Terreno de alta resolución.

REFERENCIAS

Crespo, N., Pádua, L., Santos, J.S. & Fraga, H. (2024). Satellite Remote Sensing Tools for Drought Assessment in Vineyards and Olive Orchards: A Systematic Review. *Remote Sensing (16)*. DOI: 10.3390/rs16112040.

Marcello, J., Eugenio, F., Perdomo, U. & Medina, A. (2016). Assessment of Atmospheric Algorithms to Retrieve Vegetation in Natural Protected Areas Using Multispectral High Resolution I*magery. Sensors (16)*. DOI: 10.3390/s16101624.

Radočaj, D., Šiljeg, A., Marinović, R. & Jurišić, M. (2023). State of Major Vegetation Indices in Precision Agriculture Studies Indexed in Web of Science: A Review. *Agriculture (13)*. DOI: 10.3390/agriculture1303070.

Ramírez-Cuesta, J.M., Martínez-Gimeno, M.A., Badal, E. et al. (2025). UAV-based multispectral and thermal indexes for estimating crop water status and yield on super-high-density olive orchards under deficit irrigation conditions. *Precision Agriculture (26)*. DOI: 10.1007/s11119-025-10240-6.

Rodríguez, D., Marcello, J., Eugenio, F., & Gamba, P. (2024). Index-based forest degradation mapping using high and medium resolution multispectral sensors. *International Journal of Digital Earth, 17*(1). https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2365981.

Sharma, H., Sidhu, H. & Bhowmik, A. (2025). Remote Sensing Using Unmanned Aerial Vehicles for Water Stress Detection: A Review Focusing on Specialty Crops. *Drones* (9-4). DOI: 10.3390/drones9040241.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.128

Análisis de la evolución temporal de las firmas espectrales de diferentes variedades de olivo en seto: riego vs secano

Torres Sánchez, Jorge [1] **Pérez Porras, Fernando** [1] **León, Lorenzo** [2] **de la Rosa, Raúl** [3] **Cantón Martínez, Susana** [1] **Páez, Francisco C.** [4] **Mesas Carrascosa, Francisco Javier** [1]

[1] Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática, Universidad de Córdoba

[2] Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), Centro Camino de Purchil

[3] Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC

[4] Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), Centro La Mojonera

ORCID: Torres Sánchez 0000-0003-1420-0145 Pérez Porras 0000-0003-4263-2260 León 0000-0002-5664-3393 de la Rosa 0000-0002-0752-9607 Cantón Martínez 0009-0009-9361-8224 Páez 0000-0002-8724-5793 Mesas Carrascosa 0000-0002-5674-1292

Correspondencia: o22tosaj@uco.es o12pepof@uco.es lorenzo.leon@juntadeandalucia.es raul.rosa@ias.csic.es z52camas@uco.es franciscoc.paez@juntadeandalucia.es ig2mecaf@uco.es

RESUMEN

La teledetección hiperespectral embarcada en UAV representa una herramienta prometedora para el fenotipado eficiente de diferentes variedades de olivo. Este trabajo presenta los resultados obtenidos mediante el análisis de datos hiperespectrales adquiridos en julio y septiembre de 2022 en un ensayo de variedades. Se evaluaron cuatro variedades ('Arbosana', 'Sikitita', 'Arbequina' y 'Koroneiki') bajo dos regímenes hídricos: riego deficitario y secano. Se usó un sensor hiperespectral con 274 bandas en el rango 400–1000 nm para trazar las firmas espectrales, y se analizó la variación de las firmas entre fechas. Los resultados muestran una evolución temporal diferenciada entre variedades y regímenes hídricos. En riego, 'Koroneiki' y 'Sikitita' presentaron variaciones mínimas entre fechas, mientras que 'Arbequina' y 'Arbosana' mostraron una disminución en NIR. En secano, las diferencias fueron más marcadas, destacando mayores descensos en NIR para la mayoría de variedades, salvo 'Koroneiki' y 'Sikitita', que mantuvieron valores más estables, sugiriendo una posible mejor adaptación al secano.

Palabras clave: *UAV, hiperespectral, fenotipado, olivar*

Fecha de recepción: 6 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 6 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis de la evolución temporal de las firmas espectrales de diferentes variedades de olivo en seto: riego vs secano

Torres Sánchez, Jorge [(1)], Pérez Porras, Fernando [(1)], León, Lorenzo [(2)], de la Rosa, Raúl [(3)], Cantón Martínez, Susana [(1)], Páez, Francisco C. [(4)], Mesas Carrascosa, Francisco Javier [(1)]

[(1)] Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática, Universidad de Córdoba.
0000-0003-1420-0145, o22tosaj@uco.es; 0000-0003-4263-2260, o12pepof@uco.es;
0009-0009-9361-8224, z52camas@uco.es; 0000-0002-5674-1292, ig2mecaf@uco.es.

[(2)] Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), Centro Camino de Purchil.
0000-0002-5664-3393, lorenzo.leon@juntadeandalucia.es.

[(3)] Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC.
0000-0002-0752-9607, raul.rosa@ias.csic.es.

[(4)] Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), Centro La Mojonera.
0000-0002-8724-5793, franciscoc.paez@juntadeandalucia.es.

Resumen: La teledetección hiperespectral embarcada en UAV representa una herramienta prometedora para el fenotipado eficiente de diferentes variedades de olivo. Este trabajo presenta los resultados obtenidos mediante el análisis de datos hiperespectrales adquiridos en julio y septiembre de 2022 en un ensayo de variedades. Se evaluaron cuatro variedades (‘Arbosana’, ‘Sikitita’, ‘Arbequina’ y ‘Koroneiki’) bajo dos regímenes hídricos: riego deficitario y secano. Se usó un sensor hiperespectral con 274 bandas en el rango 400–1000 nm para trazar las firmas espectrales, y se analizó la variación de las firmas entre fechas. Los resultados muestran una evolución temporal diferenciada entre variedades y regímenes hídricos. En riego, ‘Koroneiki’ y ‘Sikitita’ presentaron variaciones mínimas entre fechas, mientras que ‘Arbequina’ y ‘Arbosana’ mostraron una disminución en NIR. En secano, las diferencias fueron más marcadas, destacando mayores descensos en NIR para la mayoría de las variedades, salvo ‘Koroneiki’ y ‘Sikitita’, que mantuvieron valores más estables, sugiriendo una posible mejor adaptación al secano.

Palabras clave: UAV, hiperespectral, fenotipado, olivar

Analysis of the Temporal Evolution of Spectral Signatures in Different Hedgerow Olive Cultivars: Irrigated vs. Rainfed Conditions

***Abstract**: UAV-borne hyperspectral remote sensing represents a promising tool for efficient phenotyping of different olive cultivars. This study presents the results obtained from the analysis of hyperspectral data acquired in July and September 2022 in a varietal trial. Four cultivars (‘Arbosana’, ‘Sikitita’, ‘Arbequina’, and ‘Koroneiki’) were evaluated under two water regimes: deficit irrigation and rainfed conditions. A hyperspectral sensor with 274 bands covering the 400–1000 nm range was used to derive spectral signatures, and the temporal variation between acquisition dates was assessed. The results reveal distinct temporal spectral dynamics across cultivars and water regimes. Under deficit irrigation, ‘Koroneiki’ and ‘Sikitita’ showed minimal variation between the two dates, whereas ‘Arbequina’ and ‘Arbosana’ showed a decrease in NIR. Under rainfed conditions, temporal differences were more pronounced, with most cultivars presenting stronger declines in NIR reflectance. Notably, ‘Koroneiki’ and ‘Sikitita’ maintained comparatively stable NIR values, suggesting a potentially better adaptation to rainfed cultivation.*

***Keywords**: UAV, hyperspectral, phenotyping, olive crop*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha observado una transición del olivar tradicional hacia el olivar en seto, el cual se caracteriza por densidades entre 1000 y 2500 pies/ha. Sin embargo, la sostenibilidad de este sistema de cultivo, asociado normalmente al riego, puede verse afectada por las condiciones actuales de cambio climático. Esto ha motivado que se hayan comenzado a realizar plantaciones de olivar en seto en condiciones de secano. No obstante, aún hay poca bibliografía científica relacionada con la gestión de olivares de alta densidad

en condiciones de secano. El análisis de los datos procedentes de sensores embarcados en vehículos aéreos no tripulados (UAV por sus siglas en inglés) ha permitido avanzar en la eficiencia del fenotipado. Y existen trabajos en los que ya se han utilizado sensores hiperespectrales instalados en UAV para el fenotipado de especies leñosas (Sankey, 2025). En este contexto, se plantea el uso de sensores hiperespectrales embarcados en UAV en ensayos de fenotipado, con el objetivo de caracterizar en detalle la firma espectral de diferentes variedades de olivo y su posible correlación con parámetros fisiológicos tanto en riego como en secano. Asimismo, es interesante estudiar cómo la firma espectral se ve influenciada por el estrés hídrico de manera diferencial en función de la variedad objeto de estudio, lo que puede ligarse a la adaptación de las variedades estudiadas a su cultivo en seto en secano. Como objetivo general, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de los datos tomados con un sensor hiperespectral embarcado en un UAV en un ensayo de fenotipado en dos fechas diferentes. Esta tecnología ha sido utilizada previamente para detectar el sistema de riego en olivar (Santos-Rufo *et al*., 2020), detectar enfermedades (Calderón *et al*., 2013) y ver diferencias entre variedades (Torres Sánchez *et al*., 2024), pero es la primera vez que se estudia en el ámbito del fenotipado la variabilidad temporal de la firma espectral del olivo y como esta se ve influenciada por el régimen de riego.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Parcela de estudio

El estudio se llevó a cabo en una parcela de 2.2 ha sita en el Centro IFAPA de Cabra (Córdoba) (37.502° N, 4.428° O, WGS84) en la que se plantó en marzo de 2020 un ensayo comparativo de variedades de olivar dividido en dos sub-ensayos. El primero de ellos con un marco de plantación de 4×1.5 m y en riego deficitario, y el otro con un marco de 6×1.5 m en secano. En ambos sub-ensayos se establecieron cuatro variedades de olivar en un diseño de 3 bloques al azar (parcela elemental: 3 filas de 30 plantas cada una): `Arbosana` y `Sikitita` (bajo vigor), 'Arbequina` (vigor intermedio) y ` Koroneiki` (vigor alto).

2.2. Vuelos UAV

Aunque sólo se presentan los datos de julio y septiembre de 2022 se han realizado vuelos mensuales entre junio de 2022 y enero de 2023, así como vuelos trimestrales desde 2023 hasta final de 2025. Se ha utilizado un UAV DJI Matrice 600 Pro (DJI, Shenzen, China) equipado con un sensor hiperespectral Nano-Hyperspec (Headwall Photonics, Inc., Bolton, USA). Dicho sensor cuenta con una resolución espectral de 274 bandas entre 400 y 1000 nm, abarcando el rango visible y el infrarrojo cercano. El UAV se configuró para volar a 3.5 m/s a 50 m sobre el terreno y con un solape entre pasadas del 30%. Antes del despegue, el sensor se calibraba con un panel blanco de 0.5×0.5 m con objeto de determinar el tiempo de exposición del sensor. Además, se instaló una manta de calibración de 3×3 m para obtener valores de reflectancia calibrados a partir de los de radiancia. Para la obtención de los hipercubos espectrales ortorrectificados con valores de reflectividad se empleó el software Spectral View (Headwall Photonics, Inc., Bolton, USA). El sensor hiperespectral iba acompañado de un sensor LiDAR modelo Velodyne Puck 16 VLP-16 (Velodyne, San José, CA, USA). El modelo tridimensional generado por el sensor LiDAR se empleó para la ortorrectificación de los hipercubos espectrales.

2.3. Análisis de firmas espectrales

La nube de puntos LiDAR se empleó para la segmentación de las copas de los olivos estudiados siguiendo el flujo de trabajo de (Cantón Martínez, 2025). Del total de los árboles de cada sub-ensayo se extrajeron los valores de los píxeles de los hipercubos para obtener la firma espectral media por variedad y sub-ensayo tanto en julio como en septiembre. Se calculó la diferencia porcentual entre las firmas espectrales tomando la primera fecha como referencia. También se calcularon una serie de índices espectrales (Tabla 1) a partir de bandas distribuidas a lo largo del rango de longitudes de onda proporcionadas por el sensor usado. Las fórmulas de los índices pueden consultarse en Calderón *et al*. (2013). Se estudió la existencia de diferencias significativas ($p< 0.05$) en dichos índices entre las dos fechas de estudio usando el test de Wilcoxon o el t-test en función de la normalidad de los datos.

Tabla 1. Índices de vegetación calculados.

Índice	Longitudes de onda	Tipo de índice
NDVI	800, 670	Estructural
PRI_{570}	570, 531	Xantofilas
TCARI	700, 670, 550	Clorofila a+b
SIPI	800, 680, 445	Carotenoides

Se utilizó R-commander para la segmentación de las copas a partir de la nube de puntos LiDAR, el cálculo de las firmas espectrales, de los índices de vegetación y de sus diferencias.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 muestra las firmas espectrales medias de las 4 variedades estudiadas en el sub-ensayo de riego deficitario, así como el cambio porcentual entre la firma en el mes de julio y la del mes de septiembre. Se puede observar como en todas las variedades hay unas fuertes fluctuaciones en los valores de la diferencia al principio y al final de la firma espectral, lo que puede ser atribuido a fallos en la toma de datos del sensor en los valores extremos del rango espectral del mismo. Obviando estas zonas del espectro se pueden apreciar diferencias entre variedades en la evolución temporal de la firma espectral. En 'Koroneiki' y 'Sikitita' la variación entre julio y septiembre fue muy pequeña a lo largo de todo el espectro, con diferencias entre el -5% y el 5%. En 'Arbequina' se aprecia una disminución en la reflectividad a lo largo de toda la firma espectral con valores que van del -5% al -15%, siendo la diferencia mayor en el rango del infrarrojo cercano. En 'Arbosana' se produjo un incremento en los valores de reflectividad en el rango visible que contrasta con el descenso registrado en el infrarrojo cercano.

En el sub-ensayo de secano (Fig. 2) las firmas espectrales tuvieron un comportamiento diferente. 'Koroneiki' y 'Sikitita' tuvieron mayores diferencias que en el ensayo de riego, con mayores valores en el rango del infrarrojo cercano. En 'Arbequina' las diferencias temporales se redujeron en valor absoluto, y hubo un cambio importante en función del rango del espectro; mientras que en riego hubo una bajada de la reflectividad tanto en el visible como en el infrarrojo cercano, en secano hubo un incremento de la reflectividad en el rango visible y un decremento en el infrarrojo cercano. En cuanto a 'Arbosana' se mantuvo el mismo patrón que en riego, pero con una mayor bajada de la reflectividad en el rango del infrarrojo cercano.

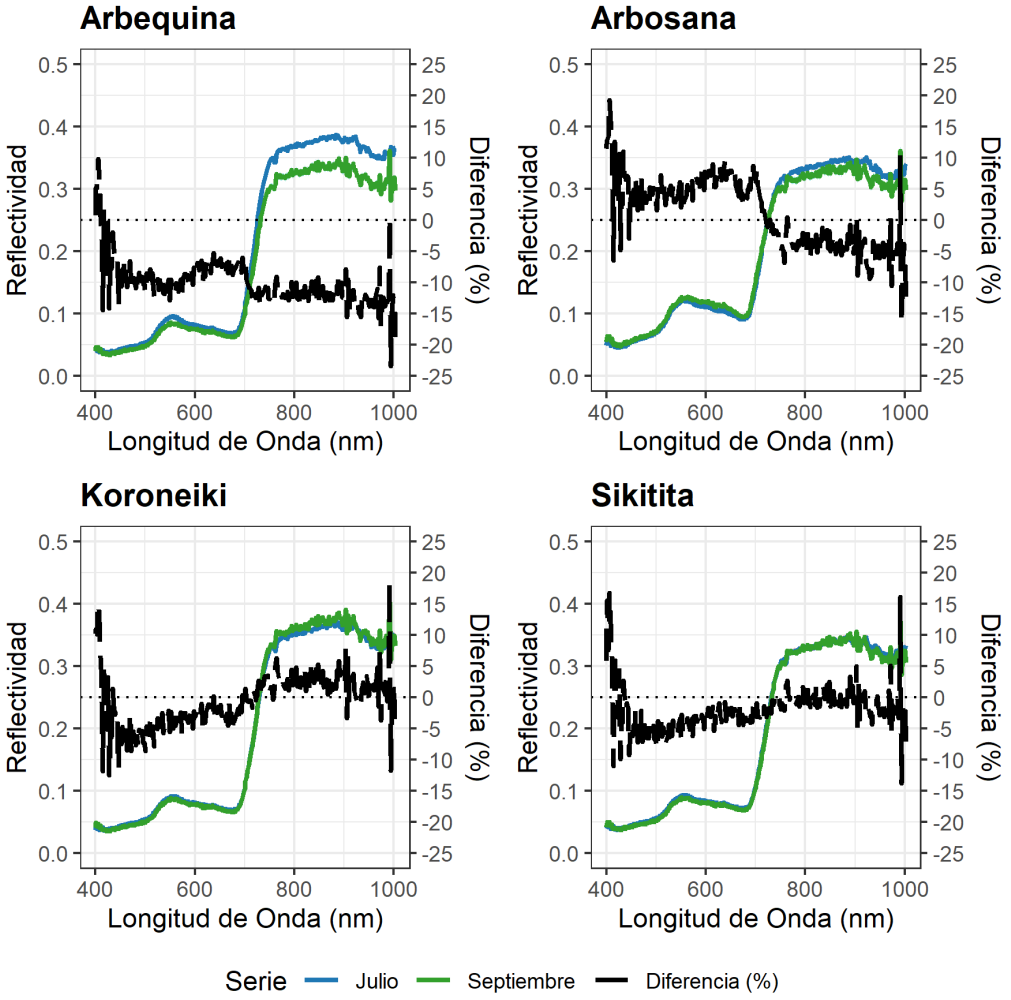


Figura 1. Firmas espectrales medias de las diferentes variedades estudiadas en el sub-ensayo de riego deficitario. Se ha trazado también una franja con el error estándar de las firmas, aunque no es apreciable.

Salvo para 'Koroneiki' y 'Sikitita' en riego, todas las variedades mostraron un descenso de su reflectividad en el infrarrojo cercano, lo que probablemente esté ligado a un descenso del vigor ocasionado por los rigores del verano. La aplicación de riego deficitario produjo una amortiguación del efecto del verano que produjo que los olivos tuvieran mayor vigor, hecho que se vio reflejado en variables medidas en campo como el tamaño de copa y la producción (Cantón Martínez, 2025).

En cuanto al análisis de los índices de vegetación, se detectaron diferencias significativas en gran parte de las comparaciones entre fechas. En el ensayo de riego 'Arbequina' y 'Arbosana' mostraron diferencias significativas para todos los índices, mientras que 'Sikitita' presentó diferencias para todos los índices menos NDVI, y 'Koroneiki' tuvo diferencias tan sólo en PRI_{570} y SIPI. En el ensayo de secano tan sólo 'Arbosana' mostró diferencias para todos los índices estudiados, 'Arbequina' las presentó para todos menos TCARI, 'Koroneiki' tuvo diferencias significativas en NDVI, PRI_{570} y SIPI, mientras que 'Sikitita' tan solo mostró cambios significativos para PRI_{570}.

El hecho de que 'Koroneiki' y 'Sikitita' sean las variedades que menos diferencias presentaron, tanto en el análisis de los índices como en el de las firmas espectrales, podría ser indicativo de una mejor adaptación de estas variedades a su cultivo en seto en secano.

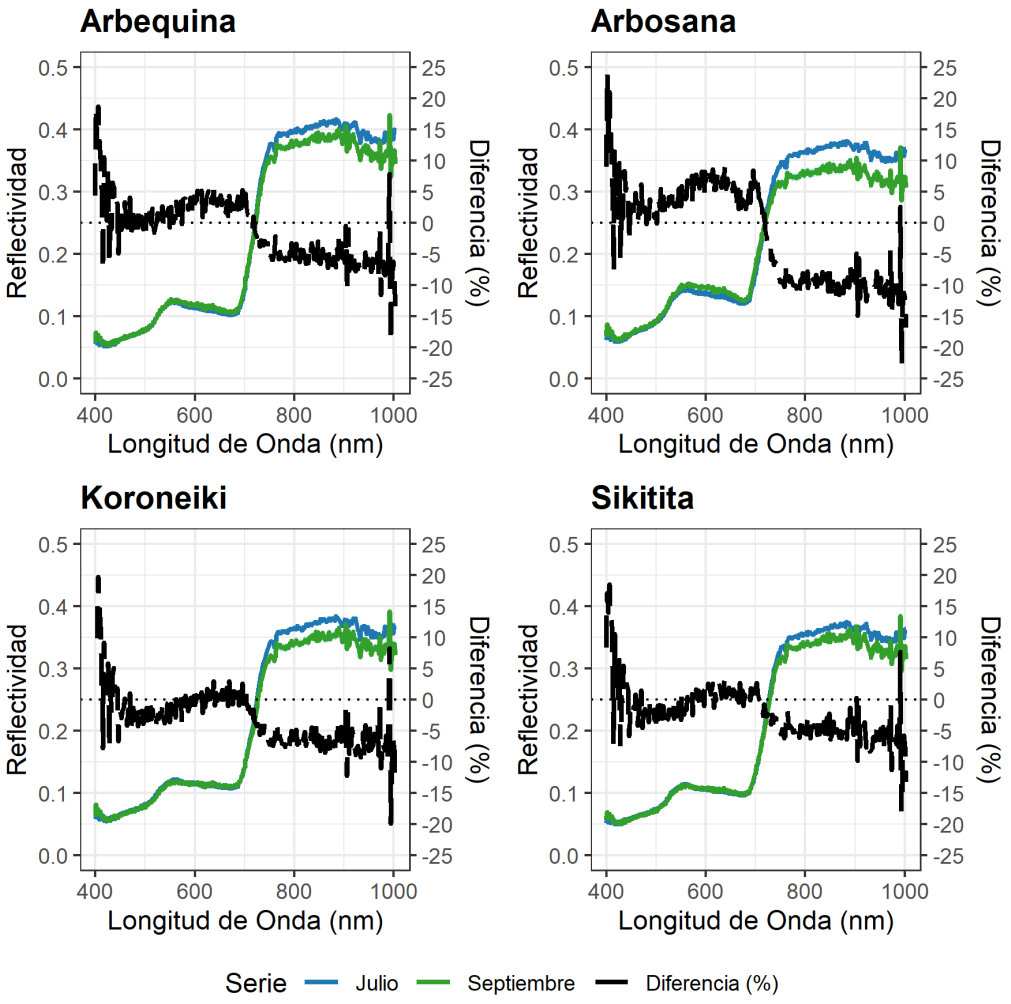


Figura 2. Firmas espectrales medias de las diferentes variedades estudiadas en el sub-ensayo de secano. Se ha trazado también una franja con el error estándar de las firmas, aunque no es apreciable.

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran la importancia de estudiar la evolución temporal de las firmas espectrales y los índices de vegetación de diferentes variedades de olivar. Se ha constatado de forma preliminar que existen diferencias entre las firmas espectrales de variedades de olivo a lo largo del tiempo, y que estas diferencias no son iguales para todas las variedades, lo que podría estar ligado a su capacidad de resistencia al estrés hídrico y adaptabilidad a su cultivo en seto en secano.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PID2024-156792OR-C33 (Retos-Sociedad, MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033) y AVA23.INV2023.016/ TRA23.TRA2023.003 (Proyectos de Investigación y Transferencia del IFAPA, cofinanciados al 80% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FEDER).

6. REFERENCIAS

Calderón, R., Navas-Cortés, J. A., Lucena, C., & Zarco-Tejada, P. J. (2013). High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of Verticillium wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, *139*, 231-245. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.031

Cantón Martínez, S. (2025). *Definición fenotípica de cultivos mediante sensorización remota multiescala* (p. 1) [Universidad de Córdoba (ESP)]. https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/34065

Sankey, T. T. (2025). UAV hyperspectral-thermal-lidar fusion in phenotyping: Genetic trait differences among Fremont cottonwood populations. *Landscape Ecology*, *40*(3), 45. https://doi.org/10.1007/s10980-025-02048-6

Torres Sánchez, J., López Granados, F., Cantón Martínez, S., León, L., Pérez Porras, F., de la Rosa, R., Páez, F. C., & Mesas Carrascosa, F. J. (2024, junio 26). Caracterización mediante sensor hiperespectral embarcado en UAV de varieades para olivar en seto: Riego vs secano. *Frutales mediterráneos y subtropicales frente al cambio climático, la sostenibilidad y la digitalización*. VIII Jornadas Nacionales del Grupo de Olivicultura.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.142

Evaluación del impacto de diversas estrategias de gestión del agua en el rendimiento del arroz

Gómez Candón, David [1,2] **Pérez-Méndez, Néstor** [3] **Jimenez-Berni, Jose Antonio** [4] **Catala-Forner, Mar** [3] **Bellvert, Joaquim** [5] **Villegas, Dolors** [1]

[1] CSIC, Aula Dei Experimental Station, Genetics and Plant Production, 50059 Zaragoza, Spain

[2] ARAID Foundation, 50004 Zaragoza, Spain

[3] IRTA, Sustainable Field Crops Program, 43870 Amposta, Spain

[4] CSIC, Institute for Sustainable Agriculture, 14004 Cordoba, Spain

[5] IRTA, Efficient Use of Water in Agriculture Program, Fruitcentre, 25003, Lleida, Spain

ORCID: Gómez Candón 0000-0002-4216-6709 Pérez-Méndez 0000-0001-6264-2920 Jimenez-Berni 0000-0001-6542-921X Catala-Forner 0000-0002-1026-7097 Bellvert 0000-0002-9234-7110 Villegas 0000-0003-2961-6346

Correspondencia: david.gomez@csic.es nestor.perez@irta.cat berni@ias.csic.es mar.catala@irta.cat joaquim.bellvert@irta.cat dvillegas@eead.csic.es

RESUMEN

La gestión sostenible del agua en arrozales mediterráneos requiere identificar prácticas que reduzcan el consumo hídrico sin comprometer el rendimiento. En este estudio se evaluó el impacto de tres estrategias de riego —inundación convencional (CONV), alternancia de inundación y secado (AWD) y drenaje a mitad de estación (MSD)— en dos campañas consecutivas (2022 y 2023), integrando mediciones de rendimiento con teledetección multiespectral y térmica obtenida mediante UAV. El rendimiento mostró un marcado efecto interanual, con valores superiores en 2022. Ese año, CONV y MSD alcanzaron rendimientos similares (9478 y 9303 kg·ha^{-1}), ambos significativamente mayores que AWD (8121 kg·ha^{-1}). En 2023 no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Las relaciones entre rendimiento e índices espectrales revelaron que NDRE, GNDVI y, en menor medida, NDVI explican de manera consistente la variabilidad productiva en ambas campañas, destacando su sensibilidad al vigor y contenido de clorofila. MTVI2 mostró un comportamiento sólido en 2023. En cambio, la evapotranspiración no presentó asociaciones suficientemente significativas con el rendimiento, indicando que una única medición térmica no captura adecuadamente la dinámica hídrica acumulada del ciclo. Los resultados sugieren que el drenaje a mitad de temporada (MSD) puede representar una alternativa viable de ahorro de agua sin penalizaciones de rendimiento entre años, mientras que la aplicación de AWD requiere un ajuste cuidadoso para evitar pérdidas productivas en años favorables. La integración de información espectral de alta resolución mediante UAV constituye una herramienta eficaz para evaluar respuestas fisiológicas del cultivo y apoyar la toma de decisiones hacia una gestión hídrica más sostenible.

Palabras clave: *Manejo del agua en arroz, Teledetección UAV, Evapotranspiración, Índices de Vegetación*

Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 9 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación del impacto de diversas estrategias de gestión del agua en el rendimiento del arroz

Gómez Candón, David [1,2], Pérez-Méndez, Néstor [3], Jimenez-Berni, Jose Antonio [4], Catala-Forner, Mar [3], Bellvert, Joaquim [5], Villegas, Dolors [1]

[1] CSIC, Aula Dei Experimental Station, Genetics and Plant Production Zaragoza, Spain.
[2] ARAID Foundation Zaragoza, Spain.
0000-0002-4216-6709, david.gomez@csic.es ; 0000-0003-2961-6346, dvillegas@eead.csic.es.

[3] IRTA, Sustainable Field Crops Program Amposta, Spain,
0000-0001-6264-2920, nestor.perez@irta.cat ; 0000-0002-1026-7097, mar.catala@irta.cat.

[4] CSIC, Institute for Sustainable Agriculture Cordoba, Spain,
0000-0001-6542-921X, berni@ias.csic.es.

[5] IRTA, Efficient Use of Water in Agriculture Program, Fruitcentre, Spain,
0000-0002-9234-7110, joaquim.bellvert@irta.cat.

Resumen: La gestión sostenible del agua en arrozales mediterráneos requiere identificar prácticas que reduzcan el consumo hídrico sin comprometer el rendimiento. En este estudio se evaluó el impacto de tres estrategias de riego —inundación convencional (CONV), alternancia de inundación y secado (AWD) y drenaje a mitad de estación (MSD)— en dos campañas consecutivas (2022 y 2023), integrando mediciones de rendimiento con teledetección multiespectral y térmica obtenida mediante UAV. El rendimiento mostró un marcado efecto interanual, con valores superiores en 2022. Ese año, CONV y MSD alcanzaron rendimientos similares (9478 y 9303 kg·ha^{-1}), ambos significativamente mayores que AWD (8121 kg·ha^{-1}). En 2023 no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Las relaciones entre rendimiento e índices espectrales revelaron que NDRE, GNDVI y, en menor medida, NDVI explican de manera consistente la variabilidad productiva en ambas campañas, destacando su sensibilidad al vigor y contenido de clorofila. MTVI2 mostró un comportamiento sólido en 2023. En cambio, la evapotranspiración no presentó asociaciones suficientemente significativas con el rendimiento, indicando que una única medición térmica no captura adecuadamente la dinámica hídrica acumulada del ciclo. Los resultados sugieren que el drenaje a mitad de temporada (MSD) puede representar una alternativa viable de ahorro de agua sin penalizaciones de rendimiento entre años, mientras que la aplicación de AWD requiere un ajuste cuidadoso para evitar pérdidas productivas en años favorables. La integración de información espectral de alta resolución mediante UAV constituye una herramienta eficaz para evaluar respuestas fisiológicas del cultivo y apoyar la toma de decisiones hacia una gestión hídrica más sostenible.

Palabras clave: Manejo del agua en arroz, Teledetección UAV, Evapotranspiración, Índices de Vegetación

Assessing the impact of various water management strategies on rice yield

***Abstract**: Sustainable water management in Mediterranean rice systems requires identifying irrigation strategies that reduce water use without affecting yield. This study assessed the impact of three irrigation practices—conventional flooding (CONV), alternate wetting and drying (AWD), and mid-season drainage (MSD)—over two consecutive seasons (2022 and 2023), integrating grain yield measurements with multispectral and thermal UAV-based remote sensing. Yield exhibited a strong inter-annual effect, with higher values in 2022. In that year, CONV and MSD achieved comparable yields (9478 and 9303 kg·ha^{-1}), both significantly higher than AWD (8121 kg·ha^{-1}). No significant differences among treatments were detected in 2023. Relationships between yield and spectral indices showed that NDRE, GNDVI and, to a lesser extent, NDVI consistently explained variations in productivity across seasons, reflecting their sensitivity to canopy vigor and chlorophyll content. MTVI2 performed well in 2023. Conversely, single-flight estimates of daily evapotranspiration showed no significant relationships with yield, indicating that one-time thermal measurements do not capture the seasonal dynamics of crop water status. Overall, the results suggest that mid-season drainage (MSD) is a promising water-saving strategy that maintains yield stability across years, while AWD requires careful adjustment to avoid yield reductions under favorable conditions. High-resolution UAV multispectral sensing proved*

effective for detecting physiological responses of the crop and supports informed decision-making toward more sustainable water management in rice systems.

***Keywords**: Rice water management, UAV remote sensing, Evapotranspiration, Vegetation indices*

1. INTRODUCCIÓN

El arroz ocupa más de 100.000 ha en España, con rendimientos cercanos a 7,7 t·ha^{-1} 1. En un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos, la FAO destaca la mejora genética y la optimización del uso del agua como pilares de una intensificación sostenible (Reeves *et al*., 2016). En los sistemas mediterráneos, donde el cultivo se desarrolla en zonas inundables próximas al mar, la gestión del riego es crítica tanto para sostener la productividad como para evitar la salinización del suelo (Bouman *et al*., 2007).

En el delta del Ebro, los arrozales constituyen un agroecosistema de alto valor ecológico integrado en la red Natura 2000, donde las prácticas de manejo influyen en la biodiversidad y en la emisión de gases de efecto invernadero (Martínez-Eixarch *et al*., 2018). La inundación continua tradicional garantiza la estabilidad productiva, pero implica un elevado consumo hídrico y emisiones significativas de metano. Por ello se han propuesto estrategias alternativas a la inundación convencional (CONV), como alternancia de inundación y secado (AWD) o drenaje a mitad de estación (MSD), capaces de reducir el uso de agua entre un 14% y un 45% sin comprometer necesariamente el rendimiento (Rejesus *et al*., 2011).

La evaluación del impacto agronómico de estas prácticas requiere herramientas capaces de detectar cambios en el estado fisiológico del cultivo. En este sentido, la teledetección mediante UAV permite monitorizar rasgos biofísicos y térmicos del dosel con alta resolución espacial, constituyendo una vía eficaz para analizar la respuesta del arroz al manejo hídrico. El objetivo de este estudio fue cuantificar los efectos de distintas estrategias de ahorro de agua sobre el rendimiento y explorar el potencial de los índices espectrales y variables derivadas de balance energético para explicar dicha variación.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Estrategias de riego en arroz

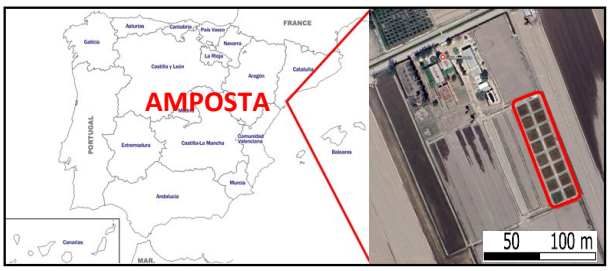


Figura 1. Localización de la parcela de estudio.

Los experimentos se llevaron a cabo en las instalaciones del IRTA en Am posta (Tarragona, España) durante los años 2022 y 2023 (Figura 1). El experimento consistió en quince parcelas de arroz de 25 x 10 m dispuestas en bloques completos aleatorios con 5 réplicas (Figura 2).

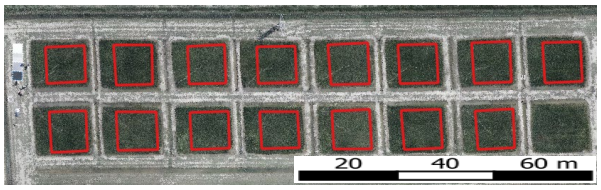


Figura 2. Parcelas de arroz utilizadas en el estudio.

Se aplicaron tres prácticas de gestión del agua: CONV, AWD y MSD. El rendimiento del arroz se estimó como el producto de los granos por panícula por la densidad de plantas.

2.2. Teledetección

Para evaluar el efecto del estrés hídrico en el cultivo de arroz, se emplearon imágenes multiespectrales y térmicas. A partir de estos datos, se estimaron distintos rasgos fisiológicos relacionados con el estado hídrico del cultivo, utilizando índices espectrales y modelos de balance energético. Los vuelos se realizaron el 12 de julio de 2022 y el 18 de julio de 2023, en las horas centrales del día, utilizando un UAV DroneHexa equipado con una cámara térmica FLIR A655sc y un sensor multiespectral MicaSense RedEdge-P (Micasense, Seattle, EE. UU.). Este último proporciona cinco bandas espectrales centradas en 475 ± 32 nm (*Blue*), 560 ± 27 nm (*Green*), 668 ± 14 nm (*Red*), 717 ± 12 nm (*Red Edge*) y 842 ± 57 nm (*NIR*), alcanzando una resolución espacial de 0,002 m. Previo a cada vuelo, se colocaron paneles de referencia en tierra para la calibración radiométrica y la corrección térmica.

Tabla 1. Índices de vegetación utilizados en el estudio.

Acrónimo	Ecuación	Autor
NDVI	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Sellers, 1985
GNDVI	$\frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Ma *et al*., 1996
NDRE	$\frac{NIR - Red\ Edge}{NIR + Red\ Edge}$	Fitgerald *et al*.,2006
MTVI2	$\frac{1.5[1.2(NIR - Green) - 2.5(Red\ Edge - Green}{\sqrt{(2NIR + 1)^2 - (6NIR - 5\sqrt{Red\ Edge}) - 0.5}}$	Yao *et al*., 2017

El procesado inicial consistió en convertir los valores digitales a reflectancia empleando las mediciones del panel de calibración. Posteriormente, las imágenes calibradas se reconstruyeron en ortomosaicos mediante aerotriangulación en PIX4Dmapper© v4.6.4 (PIX4D S.A., Prilly, Suiza). El análisis posterior se realizó en QGIS v3.34.8, donde se aplicó una clasificación supervisada para separar píxeles de vegetación y agua, conservando únicamente los correspondientes a vegetación pura. Para cada parcela se extrajeron tanto la temperatura superficial del dosel como la reflectancia de cada banda. Se seleccionaron cuatro índices de vegetación relacionados con el vigor de las plantas y el contenido de clorofila (Tabla 1), en particular NDVI (*Normailzed*

Difference VI), GNDVI (*Green Normalized Difference VI*), NDRE (*Normalized Difference VI*) y MTVI2 (*Improved Modified Triangular VI*). Por último, se combinaron los datos de temperatura con los parámetros biofísicos de los cultivos y la información meteorológica para estimar la evapotranspiración diaria de los cultivos (ET diaria) mediante el modelo de balance energético de dos fuentes TSEB (Norman *et al*., 1995).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Índices y parámetros biofísicos

Respecto a los índices de vegetación, el NDVI mostró valores elevados y similares entre tratamientos en ambos años (Figura 3). Este comportamiento es coherente con la conocida saturación del NDVI en cultivos de alto vigor, lo que limita su capacidad para discriminar diferencias sutiles en la estructura o contenido de clorofila. El GNDVI, en cambio, mostró mayor sensibilidad, especialmente en 2023, con diferencias claras entre tratamientos (Figura 3). Este índice, más relacionado con el contenido de clorofila y la absorción en el verde, parece captar mejor la respuesta fisiológica del cultivo a la variación de las condiciones hídricas.

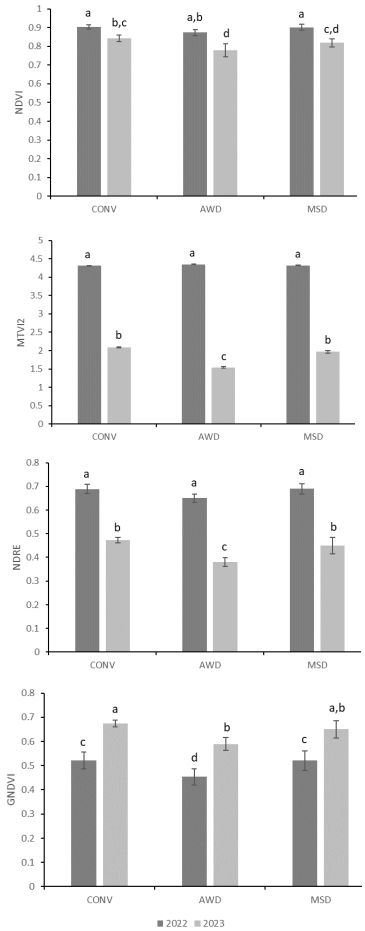


Figura 3. Índices de vegetación por tratamiento. 2022 y 2023. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos y fechas (test de Duncan, α = 0,05).

Por otro lado, se observó un comportamiento similar en la ET, encontrando diferencias significativas entre años, pero no entre tratamientos (Figura 4). Esto sugiere que, bajo las condiciones experimentales, las estrategias de manejo del agua no indujeron un estrés hídrico suficientemente severo como para generar diferencias detectables por el modelo TSEB. En 2022 se observaron los mayores valores de ET, que podrían explicarse por una mayor demanda evaporativa y unas temperaturas más elevadas durante los vuelos. Esto concuerda con la sensibilidad del TSEB a la radiación neta y al déficit de presión de vapor. La ausencia de diferencias claras entre tratamientos indica que tanto AWD como MSD son estrategias capaces de mantener la transpiración del cultivo en niveles comparables al manejo convencional, al menos en las fechas de adquisición analizadas.

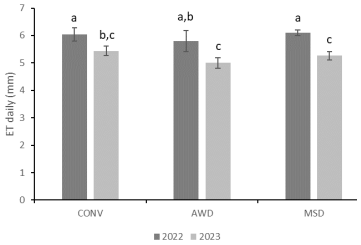


Figura 4. ET por tratamiento para los vuelos de 2022 y 2023. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos y fechas (test de Duncan, α = 0,05).

3.2. Rendimiento

Respecto al rendimiento a 14% de humedad, éste se analizó por campaña mediante un diseño en bloques completos al azar, ajustando el efecto de bloque dentro de cada año para obtener medias marginales (LSMeans) comparables entre tratamientos (Figura 5). En 2022, las LSMeans mostraron un desempeño elevado y relativamente homogéneo entre el manejo convencional y el drenaje a mitad de temporada: CONV alcanzó 9478 kg·ha⁻¹ (IC95%: 8752–10205) y MSD 9303 kg·ha⁻¹, mientras que AWD se situó en 8121 kg·ha⁻¹. Por otro lado, la comparación múltiple de Tukey (α=0,05) separó CONV y MSD en un grupo distinto a AWD, lo que indica que, bajo las condiciones de 2022, la alternancia de inundación y secado resultó en un rendimiento significativamente inferior al de la inundación continua y al drenaje de mitad de campaña (MSD = 1272 kg·ha⁻¹).

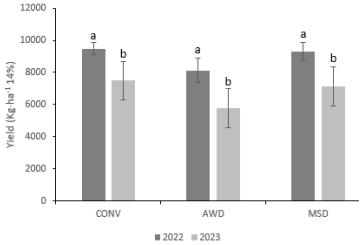


Figura 5. Rendimiento (*Yield*) por tratamiento. 2022 y 2023. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos y fechas (test de Duncan, α = 0,05).

En 2023, el rendimiento medio disminuyó en los tres tratamientos, con CONV en 7490 kg·ha⁻¹, MSD en 7139 kg·ha⁻¹ y AWD en 5773 kg·ha⁻¹. Sin embargo, la prueba de Tukey no detectó diferencias significativas entre tratamientos ese año (todas las estrategias en el grupo A, HSD = 2627 kg·ha⁻¹), lo que sugiere que la variabilidad interanual asociada a las condiciones ambientales y a la demanda evaporativa condicionó el nivel productivo, homogeneizando el efecto relativo de las estrategias de

riego sobre el rendimiento. En conjunto, los resultados confirman un efecto dominante del año sobre la producción y muestran que MSD mantiene rendimientos comparables al manejo convencional en ambas campañas, mientras que AWD requiere un ajuste fino del momento y profundidad de los periodos de secado para evitar mermas en años favorables como 2022. Esta evidencia respalda la viabilidad agronómica de MSD como práctica de ahorro de agua sin penalizaciones consistentes de rendimiento entre campañas, y sugiere que AWD puede ser igualmente viable si se calibra su implementación a las condiciones ambientales del ciclo.

3.3. Relación rendimiento y teledetección

Para evaluar la capacidad de distintos indicadores de teledetección para explicar la variabilidad del rendimiento del arroz, se analizó la relación entre el rendimiento (kg/ha al 14% de humedad) y las cinco variables derivadas de los datos remotos obtenidos.

Tabla 2. Índices de vegetación utilizados en el estudio.

Variable	r parcial (año y tratamiento)	p_value	n
NDVI	0.428	0.0184	30
GNDVI	0.552	0.0015	30
NDRE	0.591	0.0006	30
MTVI2	0.478	0.0076	30
ET	0.343	0.0636	30

Controlando el efecto del año y tratamiento (principales fuentes de variación estructural), los resultados revelaron patrones consistentes (Tabla 2) donde NDRE emergió como el predictor más robusto (r parcial = 0.591; p = 0.0006) junto con el GNDVI mostró también una asociación (r = 0.552; p = 0.0015). Además, MTVI2 (r = 0.478; p = 0.0076) y NDVI (r = 0.428; p = 0.0184) mostraron asociaciones significativas. Por otro lado, la ET diaria quedó en el umbral de significación (r = 0.343; p = 0.0636). Estos resultados confirman que, tras corregir por la variabilidad externa, los índices de vegetación explican mejor el rendimiento que las variables térmicas puntuales. En conjunto, estos resultados muestran que los índices basados en Red Edge y banda verde capturan mejor las variaciones en vigor y estado fisiológico asociadas al rendimiento, mientras que la señal térmica puntual es insuficiente para representar la dinámica hídrica acumulada del ciclo.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó el efecto de tres estrategias de manejo del agua en el cultivo del arroz (CONV, AWD y MSD), combinando mediciones agronómicas con teledetección multiespectral y térmica obtenida mediante UAV. Los resultados mostraron un marcado efecto interanual, con rendimientos más altos en 2022 que en 2023. En 2022, los rendimientos de CONV y MSD fueron superiores a los de AWD significativamente, según las comparaciones múltiples de Tukey basadas en LSMeans ajustadas por bloque, mientras que en 2023 no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos. Estos resultados indican que el drenaje a mitad de estación constituye una alternativa sólida de ahorro de agua sin penalización productiva entre campañas, mientras que la alternancia de inundación y secado puede requerir ajustes precisos para evitar reducciones de rendimiento en años de alto potencial. La relación entre el rendimiento y los índices espectrales confirmó que los indicadores basados en las bandas Red Edge (NDRE) y Verde (GNDVI) fueron los predictores más consistentes del rendimiento, incluso después de controlar el efecto del año y del bloque mediante correlaciones parciales. El NDVI también mostró capacidad explicativa, aunque su eficacia disminuyó en 2023, probablemente debido a la saturación causada por el alto vigor vegetal. Por su parte, MTVI2 presentó un buen comportamiento en 2023. Por el contrario, las estimaciones puntuales de la evapotranspiración diaria (ET) y la temperatura del dosel, derivadas de un único vuelo, no mostraron una relación significativa con el rendimiento, lo que sugiere que la dinámica hídrica estacional no puede capturarse adecuadamente mediante medidas térmicas aisladas. En general, los resultados demuestran que la teledetección UAV, especialmente a través de índices espectrales sensibles al vigor y la clorofila, es una herramienta eficaz para evaluar la respuesta del arroz a las estrategias de manejo hídrico y apoyar la toma de decisiones orientada hacia una gestión más sostenible del recurso agua.

5. AGRADECIMIENTOS

Este estudio es parte de los proyectos PID2020-118650RR-C33 (CERESTRÉS) y PID2023-149687OR-C32 (MERCEDES) MICIU/AEI/10.13039/501100011033

6. REFERENCIAS

Bouman, B.A.M., Humphreys, E., Tuong, T.P, Barker, R. (2007) Rice and *Water. Advances in Agronomy. Academic Press*. pp. 187–237

Fitzgerald, G. J., Rodriguez, D., Christensen, L. K., Belford, R., Sadras, V. O., Clarke, T. R. (2006). Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. *Precision Agriculture, 7*, 233–248

Ma, B.L.; Morrison, M.J.; Dwyer, L.M. (1996) Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize. *Agron. J. 88*, 915–920

Martínez-Eixarch, M., Alcaraz, C., Viñas, M., Noguerol, J., Aranda, X., Prenafeta-Boldú, F.X. (2018) Correction: Neglecting the fallow season can significantly underestimate annual methane emissions in Mediterranean rice fields. PLoS One. 13: e0202159

Norman, J. M., Kustas, W. P., Humes, K. S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temp. *Agric. Forest Meteorol.77*, 263–293

Reeves, T., Thomas, G., Ramsay, G. (2016) Save and grow in practice: maize, rice, wheat. A guide to sustainable cereal production (FAO UN, 2016)

Rejesus, R.M., Palis, F.G., Rodriguez, D.G.P., Lampayan, R.M., Bouman, B.A.M. (2011) Impact of the alternate wetting and drying (AWD) water-saving irrigation technique: Evidence from rice producers in the Philippines. Food Policy. pp. 280–288

Sellers, P.J. (1985) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. Int. J. Remote Sens. 6, 1335–1372

Yao, X., Wang, N., Liu, Y., Cheng, T., Tian, Y., Chen, Q., et al. (2017). Estimation of wheat LAI at middle to high levels using UAV narrowband multispectral imagery. *Remote Sens. 9*:1304.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.148

Monitorización de la respuesta productiva en trigo a la aplicación de abonos orgánicos mediante el uso de imágenes satelitales

Martínez, Ana [1] **Simeón, Rubén** [1] **Agenjos Moreno, Alba** [1] **Escudero, Ana Isabel** [1] **Moreno, Marcos** [1] **Uris, Antonio** [2] **Alcaraz, Alejandro** [3] **Naranjo, Miguel Ángel** [3] **Rubio, Contanza** [2] **San Bautista, Alberto** [1]

[1] Centro de Investigación del Regadío y Agrosistemas Mediterráneos, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España

[2] Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España

[3] Fertinagro Biotech, Teruel 44002, España.

Correspondencia: anmarde4@etsiamn.upv.es rusibro@etsiamn.upv.es alagmo@etsiamn.upv.es anesiz@etsiamn.upv.es marmolea@etsiamn.upv.es auris@fis.upv.es alejandro.alcaraz@tervalis.com mnaranjo@ibmcp.upv.es crubiom@fis.upv.es asanbau@prv.upv.es

RESUMEN

El suelo es un recurso clave para la producción agrícola, cuya calidad puede verse afectada por la intensificación de las prácticas agronómicas. Una medida alternativa para mantener las propiedades del suelo y el vigor de la planta es la aplicación de abonos orgánicos y bioestimulantes. En este sentido se desarrolló un experimento para determinar la influencia de materias orgánicas aplicadas al cultivo de trigo en una parcela experimental situada en Coscurita (Soria) mediante un diseño en bloques al azar con cuatro tratamientos agronómicos (control; abono orgánico; bioestimulante; combinado). La respuesta productiva del cultivo se monitorizó mediante imágenes Sentinel-2 e índices de vegetación (NDVI, NDRE, GNDVI y RVI) para caracterizar su dinámica fenológica y vigor. Los resultados evidenciaron una marcada variabilidad espacial y una clara relación entre las zonas de mayor vigor y los mayores rendimientos de grano, confirmando el potencial de la teledetección para el análisis de la variabilidad productiva y el manejo agronómico en agricultura de precisión.

Palabras clave: *Suelo, Trigo, Agricultura de Precisión, Índices de Vegetación, Rendimiento*

Fecha de recepción: 10 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 10 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Monitorización de la respuesta productiva en trigo a la aplicación de abonos orgánicos mediante el uso de imágenes satelitales

Martínez, Ana [(1)], Simeón, Rubén [(1)], Agenjos Moreno, Alba [(1)], Escudero, Ana Isabel [(1)], Moreno, Marcos [(1)], Uris, Antonio [(2)], Alcaraz, Alejandro [(3)], Naranjo, Miguel Ángel [(3)], Rubio, Contanza [(2)], San Bautista, Alberto [(1)]

[(1)] Centro de Investigación del Regadío y Agrosistemas Mediterráneos, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España.
anmarde4@etsiamn.upv.es; rusibro@etsiamn.upv.es ; alagmo@etsiamn.upv.es ; anesiz@etsiamn.upv.es ; marmolea@etsiamn.upv.es ; asanbau@prv.upv.es.

[(2)] Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España
auris@fis.upv.es ; crubiom@fis.upv.es

[(3)] Fertinagro Biotech, Teruel 44002, España.
alejandro.alcaraz@tervalis.com ; mnaranjo@ibmcp.upv.es.

[(9)] Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España.
crubiom@fis.upv.es.

Resumen: El suelo es un recurso clave para la producción agrícola, cuya calidad puede verse afectada por la intensificación de las prácticas agronómicas. Una medida alternativa para mantener las propiedades del suelo y el vigor de la planta es la aplicación de abonos orgánicos y bioestimulantes. En este sentido se desarrolló un experimento para determinar la influencia de materias orgánicas aplicadas al cultivo de trigo en una parcela experimental situada en Coscurita (Soria) mediante un diseño en bloques al azar con cuatro tratamientos agronómicos (control; abono orgánico; bioestimulante; combinado). La respuesta productiva del cultivo se monitorizó mediante imágenes Sentinel-2 e índices de vegetación (NDVI, NDRE, GNDVI y RVI) para caracterizar su dinámica fenológica y vigor. Los resultados evidenciaron una marcada variabilidad espacial y una clara relación entre las zonas de mayor vigor y los mayores rendimientos de grano, confirmando el potencial de la teledetección para el análisis de la variabilidad productiva y el manejo agronómico en agricultura de precisión.

Palabras clave: Suelo, Trigo, Agricultura de Precisión, Índices de Vegetación, Rendimiento.

Monitoring wheat yield response to organic fertilizer application using satellite imagery

***Abstract**: Soil is a key resource for agricultural production, and its quality can be affected by the intensification of agronomic practices. An alternative measure to maintain soil properties and plant vigor is the application of organic fertilizers and biostimulants. In this regard, an experiment was developed to determine the influence of organic matter applied to wheat cultivation on an experimental plot located in Coscurita (Soria) using a randomized block design with four agronomic treatments (control; organic fertilizer; biostimulant; combined). The crop's productive response was monitored using Sentinel-2 images and vegetation indices (NDVI, NDRE, GNDVI, and RVI) to characterize its phenological dynamics and vigor. The results showed marked spatial variability and a clear relationship between areas of greater vigor and higher grain yields, confirming the potential of remote sensing for the analysis of productive variability and agronomic management in precision agriculture.*

***Keywords**: Soil, Wheat, Precision Agriculture, Vegetation Indices, Yield*

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural fundamental para la vida en el planeta y se considera no renovable, lo que resalta la necesidad de su protección y conservación. Cumple funciones clave, como la filtración del agua, el mantenimiento de la biodiversidad y el soporte de la vegetación natural y agrícola, siendo indispensable para el equilibrio ambiental y el bienestar humano. Desde el punto de vista agrario, la conservación del suelo es esencial para garantizar la seguridad alimentaria mundial, ya que cerca del 95 % de los alimentos

consumidos dependen directa o indirectamente de este recurso (FAO, 2015). Sin embargo, el crecimiento poblacional y la creciente demanda de alimentos han impulsado sistemas de producción intensivos que favorecen la degradación del suelo. Este escenario plantea uno de los principales retos actuales: incrementar la productividad agrícola sin comprometer la sostenibilidad de los agroecosistemas (Kopittke *et al*., 2019).

Asimismo, la agricultura moderna contribuye de manera significativa a las emisiones globales de gases de efecto invernadero, especialmente a través de los cambios en el uso del suelo y la intensificación de las prácticas agrícolas (Campbell *et al*., 2017). Estas actividades han provocado la liberación de entre 130 y 190 Pg de carbono en forma de CO_2 a la atmósfera, intensificando el calentamiento global (Sanderman *et al*., 2017). Prácticas como la labranza, la rotación de cultivos y la incorporación de materia orgánica contribuyen a este objetivo y favorecen una agricultura más sostenible (Dignac *et al*., 2017). Sin embargo, las prácticas agrícolas intensivas han reducido notablemente sus reservas (Sanderman *et al*., 2017).

Frente a ello, el uso de bioestimulantes surge como una alternativa sostenible para mejorar las propiedades del suelo y favorecer la estabilidad del carbono orgánico mediante la estimulación de la actividad microbiana (Dębska *et al*., 2016; Mitter *et al*., 2021). Esta estrategia resulta especialmente relevante en cultivos como el trigo, clave para la seguridad alimentaria y de gran importancia en España, donde la producción nacional es insuficiente para cubrir la demanda interna (MAPA, 2025).

El objetivo de este trabajo es monitorizar la respuesta productiva en trigo mediante lo valores de reflectancia y los índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes satelitales en Sentinel 2 después de la aplicación de sustancias orgánicas al suelo y bioestimulantes a la planta.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Diseño experimental

En el presente trabajo, se seleccionó una parcela (Fig. 1), situada en el municipio de Coscurita (Soria). Según la clasificación agroclimática de Papadakis, la zona presenta un clima mediterráneo continentalizado, de carácter templado-frío y seco, con inviernos fríos prolongados, veranos moderados y déficit hídrico estival (Papadakis, 1966). El suelo para el cultivo de trigo en la zona suele ser franco arcilloso. La parcela fue cultivada con la variedad trigo 'Marcopolo', utilizando una dosis de siembra de 200 kg/ha. La siembra se llevó a cabo el 15 de noviembre del 2024 y la recolección se efectuó el 14 de julio del 2025. La fertilización mineral del cultivo fue acorde con las recomendaciones de López-Bellido *et al*. (2000): 150 UFN, 60 UF P_2O_5 y 120 UF K_2O. El suelo de cultivo presentó una textura franco-arenosa, el pH fue de 8,1 y la CE de 0,78 dS m^{-1}.

La parcela tiene una superficie total de 6 hectáreas. El cultivo se estableció en un diseño experimental en bloques (Tabla 1), donde se aplicaron los distintos tratamientos agronómicos definidos para el ensayo.

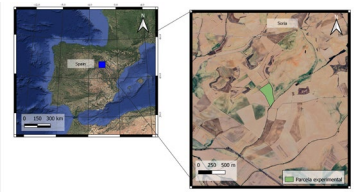


Figura 1. Localización de la parcela experimental en la provincia de Soria (España).

Cada bloque constituyó una unidad experimental independiente, permitiendo evaluar la variabilidad espacial y la respuesta del cultivo a escala intraparcelaria (Fig. 2). A lo largo del ciclo del cultivo se realizaron visitas periódicas a la parcela en fechas estratégicas, coincidentes con los principales estadios fenológicos (macollaje, floración/llenado de grano y madurez fisiológica previa a la cosecha), con el objetivo de supervisar el estado fenológico del cultivo y validar la información obtenida mediante técnicas de teledetección.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos agronómicos evaluados en el ensayo.

Tratamiento	Descripción
Control (CK)	Manejo agronómico estándar requerido por el cultivo.
Orgánico (Org)	Manejo estándar, adicionando un biofertilizante orgánico como abonado de fondo.
Bioestimulante (Bio)	Manejo estándar, suplementado con un bioestimulante microbiano aplicado en cobertera mediante aspersión foliar.
Combinado (Org+Bio)	Manejo agronómico combinando tratamiento orgánico y bioestimulante.



Figura 2. Distribución de los tratamientos aplicados.

2.2. Monitoreo mediante teledetección

El monitoreo remoto del cultivo se realizó a partir de imágenes satelitales multiespectrales obtenidas por el sensor Sentinel-2 (número total de imágenes 20), utilizando productos con corrección atmosférica (nivel L2A). A partir de estas imágenes se calcularon distintos índices espectrales de vegetación con el objetivo de caracterizar el estado fisiológico y el vigor del cultivo a lo largo del ciclo productivo.

El índice principal empleado fue el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Rouse *et al*., 1974), ampliamente utilizado como indicador del vigor vegetal y de la densidad de biomasa fotosintéticamente activa. De manera complementaria, se calcularon otros índices

espectrales, tales como el NDRE (índice de diferencia normalizada de borde rojo) (Barnes *et al*., 2000), el GNDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada verde) (Gitelson *et al*.,1996) y el RVI (índice relativo de vigor) (Pearson & Miller, 1972), con el fin de contrastar la consistencia espacial de los patrones observados.

2.3. Evaluación del rendimiento

La productividad final del cultivo se evaluó mediante la generación de un mapa de rendimiento real, elaborado a partir del software específico instalado en la cosechadora John Deere. Estos datos fueron procesados y especializados para obtener la distribución intra-parcelaria del rendimiento de grano.

El mapa de rendimiento se utilizó como referencia para validar los patrones espaciales identificados previamente mediante los índices espectrales de vegetación y analizar la relación entre el vigor observado durante el ciclo del cultivo y la productividad final.

Para evaluar la influencia estadística de los tratamientos aplicados en el experimento, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor. Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, se procedió a la comparación de medias mediante la prueba de diferencia mínima significativa (LSD, *Least Significant Difference*), estableciendo un nivel de significación de $p < 0,05$.

El procesado de los datos se ha efectuado con el programa QGIS 3.10.14 y el análisis estadístico con Statgraphics Centurion XVIII.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Dinámica fenológica del cultivo a partir de NDVI

La evolución espacio-temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) permitió caracterizar la dinámica fenológica del cultivo a lo largo del ciclo productivo. Los mapas de NDVI reflejan claramente los cambios en el vigor vegetal en diferentes fechas clave de la fenología del cultivo (Fig. 3).

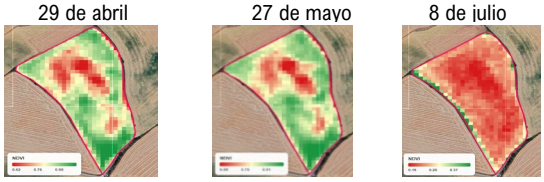


Figura 3. Evolución espacio-temporal del NDVI en la parcela de estudio durante tres momentos clave del ciclo fenológico: macollaje (29 de abril), floración/llenado de grano (27 de mayo) y madurez fisiológica (8 de julio).

En las fechas del 29 de abril y 27 de mayo, los mapas muestran una predominancia de valores elevados de NDVI, con rangos comprendidos entre 0,60 y 0,90. Estos valores indican un alto vigor vegetativo y una elevada densidad de biomasa fotosintéticamente activa, correspondientes a las etapas de macollaje y floración/llenado de grano, respectivamente. No obstante, aun en estos estadios de máximo desarrollo, se observa una marcada heterogeneidad espacial dentro de la parcela, con sectores de menor vigor concentrados principalmente en la franja central, correspondientes a la zona control del experimento.

El mapa correspondiente al 8 de julio evidencia un cambio drástico en la respuesta espectral del cultivo. En esta fecha predominan valores bajos de NDVI, con rangos entre 0,19 y 0,37, asociados al proceso de senescencia, pérdida de clorofila y disminución de la actividad fotosintética. Esta respuesta confirma el estado de madurez fisiológica del cultivo previo a la cosecha.

3.2. Evaluación multiespectral en el pico de vigor del cultivo

Con el objetivo de profundizar en la caracterización fisiológica del cultivo durante su máximo desarrollo vegetativo en cada uno de los tratamientos, se realizó un análisis comparativo de distintos índices espectrales a fecha 9 de mayo, en la cual se registró el mayor valor histórico de NDVI medio de la parcela.

Además del NDVI, se calcularon el NDRE, el GNDVI y el RVI, cuyos mapas se presentan de forma comparativa en la Figura 5. La evaluación visual y espacial de estos índices evidencia una elevada coherencia en los patrones identificados por los distintos algoritmos, observándose una alta correlación espacial entre ellos.

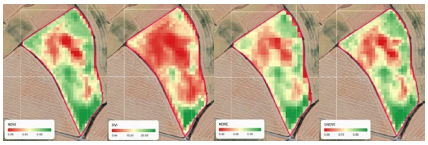


Figura 5. Panel comparativo de índices espectrales de vegetación (NDVI, NDRE, GNDVI y RVI) correspondientes a la fecha de máximo vigor del cultivo (9 de mayo).

Todos los índices identifican zonas de menor vigor principalmente en el sector central de la parcela (tratamiento control), así como áreas de mayor desarrollo vegetativo en los bordes. Esta consistencia confirma que la heterogeneidad espacial observada responde a diferencias estructurales reales del cultivo y la efectividad de los tratamientos (orgánico, bioestimulante y combinado).

3.3. Variabilidad espacial del rendimiento

El mapa de rendimiento permitió cuantificar la variabilidad intra-parcelaria de la productividad final del cultivo (Fig. 6). Los resultados evidencian una marcada heterogeneidad espacial, coherente con los patrones de vigor observados previamente mediante teledetección.

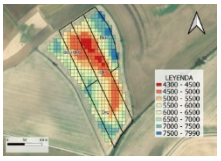


Figura 6. Mapa de rendimiento real de grano (kg ha^{-1}) obtenido a partir de los datos del monitor de cosecha. Se muestra la distribución espacial de la productividad en relación con la rejilla experimental.

Por último, el rendimiento medio del cultivo mostró diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 2). El tratamiento bioestimulante registró el mayor

rendimiento, seguido del orgánico, mientras que el tratamiento combinado mostró valores intermedios y el control los más bajos. Los índices espectrales presentaron un patrón similar: los tratamientos orgánico y bioestimulante alcanzaron los valores más altos de NDVI, RVI, GNDVI y NDRE, asociados a una mayor vigorosidad y contenido de clorofila, el tratamiento combinado mostró valores intermedios y el control los menores.

Tabla 2. Rendimiento medio del cultivo (kg/ha) e índices espectrales (NDVI, RVI, GNDVI y NDRE) en función del tratamiento aplicado. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según la prueba LSD (p < 0,05) Tratamientos con al menos una letra en común no difieren significativamente. Las letras se asignaron en orden descendente (a = mayor valor).

Tratamiento	Rendimiento	NDVI	RVI	GNDVI	NDRE
CK	4892,84^{c}	0,69^{b}	0,51^{b}	0,69^{b}	5,48^{b}
ORG	6333,99^{ab}	0,83^{a}	0,65^{a}	0,79^{a}	7,32^{b}
ORG+BIO	5507,3b^{c}	0,73^{ab}	0,55^{b}	0,72^{ab}	12,07^{a}
BIO	6487,96^{a}	0,79^{a}	0,60^{ab}	0,76^{a}	8,71^{ab}

4. CONCLUSIÓN

El uso de la teledetección permitió describir la evolución fenológica del cultivo de trigo a lo largo de su ciclo. Los índices espectrales NDVI, NDRE, GNDVI y RVI permitieron identificar zonas con menor vigor del cultivo, correspondientes al tratamiento control, que se diferenciaron de los tratamientos orgánico, bioestimulante y combinado. La distribución espacial del rendimiento mostró una clara correspondencia con la respuesta espectral del cultivo. Destacando el tratamiento bioestimulante con mayores valores de rendimiento, mientras que el control presentó los resultados más bajos.

En conclusión, estos resultados demuestran la efectividad de los tratamientos aplicados, así como la utilidad de la teledetección como herramienta eficaz para evaluar el comportamiento del cultivo y contribuir a la toma de decisiones en sistemas de agricultura de precisión.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto BIOFER-CO2 SCPP2200C009686XV0, de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España.

6. REFERENCIAS

Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J. U. L. I. O., Kostrzewski, M., ... & Moran, M. S. (2000, July). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. In Proceedings of the fifth international conference on precision agriculture, Bloomington, MN, USA (Vol. 1619, No. 6).

Campbell, B. M., Beare, D. J., Bennett, E. M., Hall-Spencer, J. M., Ingram, J. S. I., Jaramillo, F., … Shindell, D. (2017). Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society, 22*(4), 8. https://doi.org/10.5751/ES-09595-220408

Dębska, B., Banach-Szott, M., & Szombathová, N. (2016). Impact of bio-stimulants on soil organic matter structure. *Journal of Soils and Sediments, 16*, 1407–1418. https://doi.org/10.1007/s11368-015-1337-2

Dignac, M. F., Derrien, D., Barré, P., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., & Basile-Doelsch, I. (2017). Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 37*, 14. https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2

FAO. (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment, 58*, 289–298.

Kopittke, P. M., Dalal, R. C., Finn, D., & Menzies, N. W. (2019). Global changes in soil stocks of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur as influenced by long-term agricultural production. *Global Change Biology, 25*(11), 3576–3590. https://doi.org/10.1111/gcb.14736

López-Bellido, L., López-Bellido, R. J., Castillo, J. E., & López-Bellido, F. J. (2000). Effects of tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization on wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, *92*(6), 1054-1063.

MAPA. (2025). Avances de superficies y producciones de cultivos. Campaña 2024/2025. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Mitter, E. K., Tosi, M., Obregón, D., Dunfield, K. E., & Germida, J. J. (2021). Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: Innovative biofertilizer technologies. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 5*, 606815. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606815

Papadakis, J. (1966). Climates of the world and their agricultural potentialities.

Pearson, R.L.; Miller, L.D. Remote mapping of standing crop biomass for estimating the productivity of the short grass prairie. In Proceedings of the 8th *International Symposium on Remote Sensing of Environment (ERIM)*, Ann Arbor, MI, USA, 2–6 October 1972; pp. 1357–1381.

Rouse, J.W.; Hasas, R.H.; Schell, J.A.; Deerino, D.W.; Harlan, J.C. *Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation. Type III. Final Report*; NASA/OSFC: Oreenbello, MD, USA, 1974; p. 371.

Sanderman, J., Hengl, T., & Fiske, G. J. (2017). Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114*(36), 9575–9580. https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.153

Validación agronómica de la aplicación variable de nitrógeno y semilla en trigo mediante zonificación por Clustering

Cruzado-Campos, Enric [1] **Coronado-Campos, Javier** [1] **Arizo-García, Patricia** [1,2] **Castiñeira-Ibáñez, Sergio** [2] **Tarrazó-Serrano, Daniel** [2] **Ricarte, Beatriz** [3] **de la Rubia, Pablo** [4] **Caballero-Molada, Marcos** [4] **Rubio, Constanza** [2] **San Bautista, Alberto** [1]

[1] Centro de Investigación del Regadío y Agrosistemas Mediterráneos, Universitat Politècnica de València, València 46022, España.

[2] Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, València 46022, España.

[3] Instituto Universitario de Investigación de Matemática Multidisciplinar, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 València, España.

[4] Fertinagro Biotech, Teruel 44002, España.

ORCID: Cruzado-Campos 0009-0004-5761-8685 Coronado-Campos 0009-0006-0374-3792 Arizo-García 0000-0002-6725-9098 Castiñeira-Ibáñez 0000-0001-6414-3906 Tarrazó-Serrano 0000-0001-9986-0884 Ricarte 0000-0001-8094-1908 Caballero-Molada 0000-0003-4166-843X Rubio 0000-0002-4395-7473 San Bautista 000-0003-4846-6611

Correspondencia: ecrucam@etsiamn.upv.es jacocam@etsiamn.upv.es patarga1@etsiamn.upv.es sercasib@fis.upv.es dtarrazo@fis.upv.es bearibe@mat.upv.es pablo.delarubia@tervalis.com marcos.caballero@tervalis.com crubiom@fis.upv.es asanbau@prv.upv.es

RESUMEN

La agricultura de precisión busca optimizar el uso de insumos ajustando las dosis a la variabilidad intra-parcelaria. Sin embargo, la adopción de tecnologías de dosis variable (VRT, Variable Rate Technology) a menudo carece de una validación agronómica posterior que cuantifique su éxito real. Este trabajo evalúa la eficacia de una prescripción VRT de semilla y nitrógeno en una parcela comercial de trigo (Triticum aestivum) en Espinosa de Cerrato (Palencia). Se integraron datos masivos de mapas de aplicación (As-Applied), monitor de rendimiento y series temporales de satélite (Sentinel-2). Mediante el uso de algoritmos de aprendizaje no supervisado (K-Means Clustering), se segmentó la parcela en tres zonas de manejo homogéneas para reducir el ruido espacial. Los resultados demuestran una correlación positiva significativa entre las zonas de alto potencial (identificadas mediante NDVI) y el rendimiento final, alcanzando el valor de 0,50 en el momento de mayor desarrollo vegetativo, validando la estrategia de intensificación en dichas áreas. Por el contrario, las zonas de bajo potencial mostraron una respuesta limitada a los insumos, sugiriendo restricciones edáficas estructurales donde la estrategia de ahorro de insumos resulta la más eficiente económica y ambientalmente.

Palabras clave: *Agricultura de precisión, VRT, K-Means, Sentinel-2, Triticum aestivum*

Fecha de recepción: 13 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 13 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Validación agronómica de la aplicación variable de nitrógeno y semilla en trigo mediante zonificación por Clustering

Cruzado-Campos, Enric [(1)], Coronado-Campos, Javier [(1)], Arizo-García, Patricia [(1,2)], Castiñeira-Ibáñez, Sergio [(2)], Tarrazó-Serrano, Daniel [(2)], Ricarte, Beatriz [(3)], de la Rubia, Pablo [(4)], Caballero-Molada, Marcos [(4)], Rubio, Constanza [(2)], San Bautista, Alberto [(1)]

[(1)] Centro de Investigación del Regadío y Agrosistemas Mediterráneos, Universitat Politècnica de València, València 46022, España.

0009-0004-5761-8685, ecrucam@etsiamn.upv.es ; 0009-0006-0374-3792, jacocam@etsiamn.upv.es.

0000-0002-6725-9098, patarga1@etsiamn.upv.es ; 0000-0003-4846-6611, asanbau@prv.upv.es.

[(2)] Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, València 46022, España.

0000-0001-6414-3906, sercasib@fis.upv.es ; 0000-0001-9986-0884, dtarrazo@fis.upv.es.

0000-0002-4395-7473, crubiom@fis.upv.es.

[(3)] Instituto Universitario de Investigación de Matemática Multidisciplinar, Universitat Politècnica de València València, España.

0000-0001-8094-1908, bearibe@mat.upv.es.

[(4)] Fertinagro Biotech, Teruel 44002, España.

pablo.delarubia@tervalis.com ; 0000-0003-4166-843X, marcos.caballero@tervalis.com.

Resumen: La agricultura de precisión busca optimizar el uso de insumos ajustando las dosis a la variabilidad intra-parcelaria. Sin embargo, la adopción de tecnologías de dosis variable (*VRT, Variable Rate Technology*) a menudo carece de una validación agronómica posterior que cuantifique su éxito real. Este trabajo evalúa la eficacia de una prescripción VRT de semilla y nitrógeno en una parcela comercial de trigo (*Triticum aestivum*) en Espinosa de Cerrato (Palencia). Se integraron datos masivos de mapas de aplicación (*As-Applied*), monitor de rendimiento y series temporales de satélite (Sentinel-2). Mediante el uso de algoritmos de aprendizaje no supervisado (*K-Means Clustering*), se segmentó la parcela en tres zonas de manejo homogéneas para reducir el ruido espacial. Los resultados demuestran una correlación positiva significativa entre las zonas de alto potencial (identificadas mediante NDVI) y el rendimiento final, alcanzando el valor de 0,50 en el momento de mayor desarrollo vegetativo, validando la estrategia de intensificación en dichas áreas. Por el contrario, las zonas de bajo potencial mostraron una respuesta limitada a los insumos, sugiriendo restricciones edáficas estructurales donde la estrategia de ahorro de insumos resulta la más eficiente económica y ambientalmente.

Palabras clave: Agricultura de precisión, VRT, K-Means, Sentinel-2, *Triticum aestivum*

Agronomic validation of variable nitrogen and seed application in wheat through clustering zoning

***Abstract**: Precision agriculture aims to optimize input use by adjusting rates to intra-field variability. However, the adoption VRT often lacks rigorous ex-post agronomic validation to quantify its actual success. This study evaluates the efficacy of a seed and nitrogen VRT prescription in a commercial winter wheat (Triticum aestivum) field in Espinosa de Cerrato (Palencia, Spain). Massive data from As-Applied maps, yield monitors, and Sentinel-2 satellite time series were integrated. Using unsupervised machine learning algorithms (K-Means Clustering), the field was segmented into three homogeneous management zones to reduce spatial noise. Results demonstrate a significant positive correlation between high-potential zones (identified by NDVI) and final yield, validating the intensification strategy in these areas. Conversely, low-potential zones showed limited response to inputs, suggesting structural soil constraints where the input-saving strategy proves to be the most economically and environmentally efficient.*

***Keywords**: Precision agriculture, VRT, K-Means, Sentinel-2,* Triticum aestivum

1. INTRODUCCIÓN

El paradigma productivo en la agricultura de secano se enfrenta al doble desafío de garantizar la rentabilidad económica y cumplir con las exigencias de sostenibilidad ambiental, alineadas con los objetivos de reducción de insumos de la estrategia europea 'De la Granja a la Mesa' (European Commission, 2020) y la reciente normativa nacional sobre nutrición sostenible en suelos agrarios (RD 1051/2022). En este contexto, la Gestión Específica del Sitio (*SSC, Site-Specific Management)* se presenta como una estrategia indispensable para racionalizar el uso de insumos, tal y como revisan Mulla (2013) y Diacono *et al*. (2013). Tecnologías como VRT permiten ajustar la densidad de siembra y la fertilización nitrogenada a la variabilidad espacial del terreno, rompiendo con la tradición del manejo uniforme.

Sin embargo, la adopción comercial de la tecnología VRT a menudo adolece de una falta de validación cuantitativa. Resulta crítico discernir si la variabilidad en el rendimiento final es consecuencia directa de la dosis aplicada o si está gobernada por factores estructurales. Para ello, el uso de imágenes satelitales de alta resolución, como las de Sentinel-2, ha demostrado ser eficaz en la monitorización y predicción del rendimiento (Hunt *et al*., 2019; Segarra *et al*., 2020).

La validación agronómica tradicional mediante parcelas de control suele ser insuficiente para capturar la heterogeneidad intra-parcelaria compleja. Por ello, el uso de técnicas de Aprendizaje No Supervisado, específicamente el algoritmo *K-Means Clustering*, podría suponer una herramienta útil para la delimitación de zonas de manejo (*MZ, Management Zones*), permitiendo segmentar la parcela en unidades funcionalmente homogéneas basadas en datos multicapa (Hamada *et al*, 2019).

La contribución fundamental de este trabajo radica en validar agronómicamente la eficacia de una estrategia de prescripción variable de semilla y nitrógeno en trigo de invierno, determinando la eficiencia en el uso de los insumos en zonas de alto potencial y el ahorro en zonas marginales mediante el uso de técnicas de *machine learning* no supervisado.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio y adquisición de datos

El ensayo se realizó en una parcela comercial de trigo de invierno (*Triticum aestivum*) situada en el municipio de Espinosa de Cerrato (Palencia). Para el análisis se recopilaron y procesaron tres fuentes de datos espaciales georreferenciados:

- **Variable Dependiente:** Mapa de rendimiento (Cosecha (kg·ha^{-1})) obtenido mediante monitor de cosecha, sometido a un filtrado de errores geométricos y valores atípicos siguiendo la metodología propuesta por Arizo-García *et al*., 2026.
- **Variables Independientes:** Mapas de aplicación real (*As-Applied*) correspondientes a la dosis de semilla (kg·ha^{-1}) y Fertilización Nitrogenada (kg N·ha^{-1}).
- **Covariable Ambiental:** Imágenes satelitales de la constelación Sentinel-2 (Nivel L2A). Se utilizaron imágenes de reflectancia BOA *Bottom-Of-Atmosphere,* las cuales integran corrección atmosférica. Se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) máximo de la campaña como indicador del desarrollo de biomasa acumulada (Segarra *et al*., 2020).

2.2. Procesamiento estadístico

El análisis de datos se llevó a cabo en entorno Python utilizando las librerías geoespaciales Geopandas y de aprendizaje automático Scikit-Learn. Tras el preprocesamiento el conjunto de datos final estuvo formado por 750 observaciones (pixeles 10x10m).

Se utilizó el algoritmo de agrupamiento no supervisado K-Means Clustering para segmentar la parcela en zonas de manejo homogéneas, el algoritmo se ejecutó aplicando múltiples inicializaciones aleatorias (n_init = 10). Se seleccionó un número de clústeres k=3, una decisión fundamentada en la operatividad y facilidad de interpretación para el agricultor, permitiendo una clasificación intuitiva y aplicable en zonas de productividad Baja, Media y Alta. Esta segmentación simplifica la gestión de insumos a dosis variable y se alinea con la logística de maquinaria en campo, evitando una fragmentación excesiva que dificultaría el manejo práctico. Finalmente, se calcularon matrices de correlación de Pearson y diagramas de dispersión para identificar los factores influyentes. De manera complementaria, para validar la robustez de la zonificación, se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA, $p < 0.05$) con el objetivo de confirmar estadísticamente la existencia de diferencias significativas entre las medias productivas de cada clúster, garantizando que la división propuesta responde a una variabilidad real y no al azar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis estadístico preliminar, representado en la matriz de correlación (Fig. 1), reveló dependencia positiva entre el NDVI máximo y el rendimiento final. Esta relación sugiere que el vigor detectado por el satélite es un reflejo fiel del desempeño del cultivo en la cosecha. Esto podría confirmar la utilidad de las imágenes para predecir el potencial productivo desde el inicio, justificando su uso como base principal para definir correctamente las zonas de manejo



Figura 1. Matriz de correlación de Pearson entre las variables analizadas (Cosecha, Semilla, Nitrato, NDVI Max).

La segmentación mediante el algoritmo K-Means permitió identificar tres zonas con comportamientos agronómicos claramente diferenciados, cuya distinción fue validada estadísticamente mediante el análisis de varianza (ANOVA, $p < 0.001$), tal como se observa en los perfiles de los clústeres (Fig. 2).

El Clúster 0 se identifica como el grupo de menor desempeño productivo. Presenta los valores más bajos de NDVI (mediana $\approx$ 0.67), lo que indica una escasa capacidad fotosintética y acumulación de biomasa. Esta deficiencia se relaciona a su vez con un rendimiento significativamente inferior (<4100 kg·ha^{-1}) a los demás grupos. A pesar de recibir una cantidad de insumos (semilla y nitrato) comparable al clúster 1, su baja respuesta sugiere que esta zona presenta restricciones edáficas, clasificándose como una zona de bajo potencial donde la eficiencia del insumo es mínima.

El Clúster 1 representa una zona de potencial medio. Pese a niveles de semilla y nitrato similares al clúster 0, presenta un incremento en la cosecha (4500 kg·ha^{-1}), además de un vigor vegetativo superior (NDVI = 0.73). Es relevante destacar la presencia de valores atípicos (*outliers*) inferiores en las variables de insumos, lo que sugiere que el clúster integra puntos con aplicaciones reducidas de nitrógeno y semilla, equiparables al Clúster 0. No obstante, presenta un desempeño correcto que justifica mantener una dosis estándar.

El Clúster 2 se presenta como la unidad de gestión de máximo rendimiento, donde existe una sinergia clara entre el potencial y la intensificación del manejo. El clúster presenta valores elevados de NDVI (0.75), similares estadísticamente al clúster 1, pero con densidades de semilla notablemente superiores al resto de los grupos (260 kg·ha^{-1}) y aportes superiores de nitrato. Esta combinación resulta en la mayor productividad del clúster (>4550 kg·ha^{-1} de cosecha). Por tanto, debido a sus características, esta zona presentó una respuesta productiva positiva frente a dosis incrementales de semilla y nitrógeno.

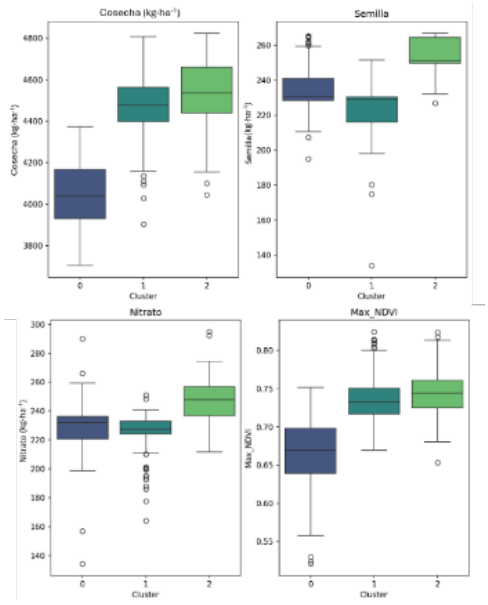


Figura 2. Boxplots de las variables agronómicas para cada zona de manejo (Clúster).

Tabla 1. Resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) para la validación de la zonificación.

Variable	Clúster 0	Clúster 1	Clúster 2
Rendimiento (kg·ha^{-1})	4045.76 ± 148.76 c	4477.44 ± 131.86 b	4538.50 ± 157.88 a
Nitrato (kg·ha^{-1})	228.79 ± 15.41 b	227.15 ± 9.34 b	247.79 ± 12.55 a
Semilla (kg·ha^{-1})	234.30 ± 12.55 b	226.21 ± 11.64 c	255.04 ± 8.18 a
Vigor (NDVI Máx)	0.66 ± 0.04 c	0.73 ± 0.02 b	0.74 ± 0.02 a

Nota: Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

El análisis cuantitativo detallado en la Tabla 1 confirma la existencia de tres poblaciones productivas estadísticamente distintas. Resulta de especial interés la comparación entre el Clúster 0 y el Clúster 1 respecto a la fertilización nitrogenada: ambos recibieron dosis estadísticamente equivalentes (letra 'b' en nitrato), pero el Clúster 1 logró un rendimiento significativamente superior. Este hallazgo podría validar que la baja productividad del Clúster 0 se debió a limitaciones estructurales y no a falta de insumos.

El gráfico de dispersión (Fig. 3) pone de manifiesto dos realidades opuestas fundamentales para validar el sistema. Por un lado, el Clúster 0 se mantiene estancado en niveles bajos de producción, lo que parece confirmar que tiene limitaciones de suelo que no se pueden solucionar con más insumos. Por otro lado, la comparación entre los Clústeres 1 y 2 revela un efecto de saturación: aunque la Zona de Alto Potencial (C2) recibió mucha más semilla y nitrógeno —y rindió más—, su nivel de vigor (NDVI) se quedó igual que en la Zona Media (~0.73-0.74). Esto podría demostrar que, cuando el cultivo está muy denso, el satélite pierde capacidad para distinguir diferencias, subestimando un potencial productivo que el monitor de cosecha sí detectó, lo que, bajo las condiciones de este estudio, confirmaría que la inversión extra mereció la pena.

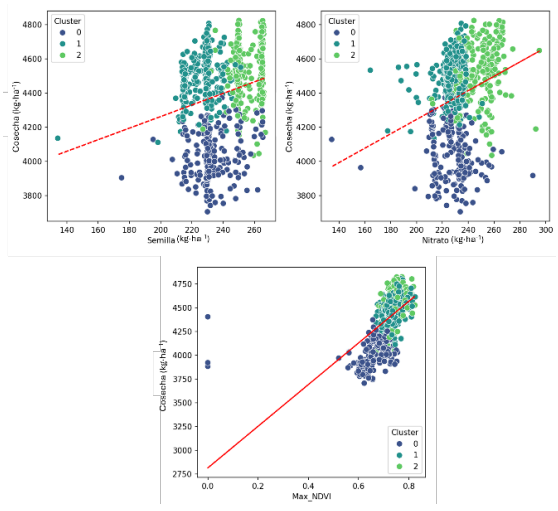


Figura 3. Diagramas de dispersión: Relación entre insumos aplicados (semilla/nitrato) y Rendimiento final por zonas.

Finalmente, la visualización espacial 3D (Fig. 4) ofrece una perspectiva integral de la variabilidad intra-parcelaria, permitiendo verificar la coherencia estratigráfica entre las decisiones de manejo y la respuesta del cultivo. Se observa una correspondencia entre las áreas donde la prescripción redujo la densidad de siembra y el aporte nitrogenado se alinean geográficamente con las zonas de menor extracción de cosecha (Clúster 0). Esta coincidencia espacial confirma que se interpretó correctamente la heterogeneidad del terreno, validando la decisión técnica de reducir costes en zonas marginales para evitar el desperdicio de insumos, focalizando la inversión exclusivamente en las áreas capaces de transformar el fertilizante en rendimiento comercial.

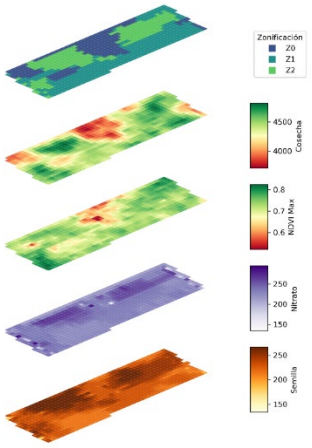


Figura 4. Visualización 3D multicapa de la distribución espacial de las variables y la zonificación final.

4. CONCLUSIONES

- El algoritmo K-Means funcionó como un filtro eficaz para suavizar el ruido de las variables espaciales. Esto permitió transformar miles de datos dispersos en un mapa de zonas homogéneas y limpias, facilitando una toma de decisiones agronómicas mucho más clara.

- Se valida agronómicamente la estrategia VRT implementada: la intensificación en zonas de alto potencial generó retorno productivo, mientras que la reducción de dosis en zonas de bajo potencial fue la decisión correcta para maximizar la eficiencia económica.

5. FUTURAS INVESTIGACIONES

Esta investigación se desarrolló en una única parcela durante una sola campaña mediante un diseño observacional. Por lo tanto, aunque la metodología pueda ser útil, se sugiere que futuros trabajos se amplíen múltiples años y distintas localizaciones para confirmar la validación de la estrategia agronómica.

Además, se recomienda mantener la estrategia de ahorro en la Zona 0 y evaluar un incremento marginal de densidad en la Zona 2 para explorar nuevos techos de rendimiento.

Finalmente, aunque la validación agronómica aquí presentada es positiva, futuras líneas de investigación deberían incorporar un análisis económico detallado para cuantificar el Retorno de la Inversión o *ROI* específico por zona. Esto resulta fundamental para confirmar si el ahorro de insumos en el Clúster 0, además de racionalizar el uso de insumos, mejora la eficiencia económica global al minimizar costes en las áreas de capacidad productiva limitada.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Grupo Operativo APP-TRI, cofinanciado por Fertinagro Biotech S.L. y el MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación)

7. REFERENCIAS

Arizo-García, P., Castiñeira-Ibáñez, S., Cruzado-Campos, E., Ricarte, B., Rubio, C., & San Bautista, A. (2026). A Standardized Framework for Cleaning Non-Normal Yield Data from Wheat and Barley Crops, and Validation Using Machine Learning Models for Satellite Imagery. *Agronomy, 16*(3), 386. https://doi.org/10.3390/agronomy16030386

Diacono, M., Rubino, P., & Montemurro, F. (2013). Precision nitrogen management of wheat. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 33*(1), 219-241. https://doi.org/10.1007/s13593-012-0111-z

European Commission. (2020). A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. COM(2020) 381 final. Brussels. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0381

Hamada, M. A., Kanat, Y., & Abiche, A. E. (2019). Multi-spectral image segmentation based on the K-means clustering. Int. *J. Innov. Technol. Explor. Eng, 9*(2), 1016-1019. https://doi.org/10.35940/ijitee.K1596.129219

Hunt, M. L., Blackburn, G. A., Carrasco, L., Redhead, J. W., & Rowland, C. S. (2019). High resolution wheat yield mapping using Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment, 233*, 111410. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111410

Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering, 114*(4), 358-371. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios. Boletín Oficial del Estado, 312, 18961-19004. https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/12/27/1051/con

Segarra, J., Buchaillot, M. L., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2020). Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy, 10*(5), 641. https://doi.org/10.3390/agronomy10050641

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.159

Sensores remotos para la optimización de la fertilización nitrogenada en trigo

Quemada, Miguel [1] **Pancorbo, Jose Luis** [2] **Arencibia-Pérez, Nuria** [3] **Raya-Sereno, María Dolores** [4] **Zarco-Tejada, Pablo J.** [5] **Gabriel, Jose Luis** [6]

[1] CEIGRAM, Universidad Politecnica de Madrid, España

[2] Institute of BioEconomy, Italian National Research Council, Italia

[3] CEIGRAM, Universidad Politecnica de Madrid, España

[4] SpecLab, CSIC, Madrid, España

[5] IAS, CSIC, Córdoba,España

[6] INIA, CSIC, Madrid, España

ORCID: Quemada 0000-0001-5793-2835 Pancorbo 0000-0003-1837-7589 Arencibia-Pérez 0009-0000-5021-2157 Zarco-Tejada 0000-0003-1433-6165 Gabriel 0000-0002-5508-4120

Correspondencia: miguel.quemada@upm.es joseluis.pancorbodeonate@cnr.it nuria.arencibiap@upm.es mdolores.raya@csic.es pablo.zarco@csic.es gabriel.jose@inia.csic.es

RESUMEN

La teledetección es una herramienta valiosa para crear mapas de aplicación variable de fertilizantes que permitan mejorar la eficiencia del nitrógeno (N) y reducir el impacto ambiental de la aplicación excesiva. El objetivo de este estudio fue aplicar la teledetección para estimar el estado nutricional del cultivo y ajustar la fertilización de N a las necesidades de trigo panificable (Triticum aestivum L.). Se llevó a cabo un experimento en un campo de trigo con cuatro niveles de N y dos regímenes hídricos en Aranjuez (Madrid) durante 2 años. Se tomaron en campo mediciones de biomasa, concentración de N en la planta y el índice de nutrición nitrogenada (NNI) en tres etapas de crecimiento, y se registraron el rendimiento del grano y la concentración de N en la cosecha. Cerca de las fechas de las mediciones en campo, se adquirieron imágenes hiperespectrales con un sensor que cubría las regiones del visible y parte del infrarrojo cercano (400–850 nm) y otro que cubría parte del infrarrojo de onda corta (950–1750 nm) desde una aeronave que voló a 300 m sobre el experimento. También se descargaron imágenes Sentinel-2 del sitio. Se evaluaron índices de vegetación extraídos de las imágenes aéreas y satelitales para estimar el NNI. El índice de contenido de clorofila del dosel (CCCI) fue el mejor indicador del NNI (RMSE = 0,21). Los mapas de NNI obtenidos a partir de las imágenes reflejaron la distribución espacial de las necesidades de N del trigo y permitieron identificar zonas que al ser fertilizadas responden al rendimiento en encañado y a la concentración de N en grano en floración. Los resultados destacan la capacidad de las imágenes hiperespectrales y satelitales para el monitoreo de cultivos y la gestión del N y de la fertilización.

Palabras clave: *Estado nutricional cultivo, Mapas aplicación fertilizante, Rendimiento, Calidad grano*

Fecha de recepción: 15 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 15 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Sensores remotos para la optimización de la fertilización nitrogenada en trigo

Quemada, Miguel [1], Pancorbo, Jose Luis [2], Arencibia-Pérez, Nuria [1], Raya-Sereno, María Dolores [3], Zarco-Tejada, Pablo J. [4], Gabriel, Jose Luis [5]

[1] CEIGRAM, Universidad Politecnica de Madrid, España.

0000-0001-5793-2835, miguel.quemada@upm.es ; 0009-0000-5021-2157, nuria.arencibiap@upm.es.

[2] Institute of BioEconomy, Italian National Research Council, Italia.

0000-0003-1837-7589, joseluis.pancorbodeonate@cnr.it.

[3] SpecLab, CSIC, España.

0000-0000-0000-0001, mdolores.raya@csic.es.

[4] IAS, CSIC, España.

0000-0003-1433-6165, pablo.zarco@csic.es.

[5] INIA, CSIC, España

0000-0002-5508-4120, gabriel.jose@inia.csic.es.

Resumen: La teledetección es una herramienta valiosa para crear mapas de aplicación variable de fertilizantes que permitan mejorar la eficiencia del nitrógeno (N) y reducir el impacto ambiental de la aplicación excesiva. El objetivo de este estudio fue aplicar la teledetección para estimar el estado nutricional del cultivo y ajustar la fertilización de N a las necesidades de trigo panificable (*Triticum aestivum* L.). Se llevó a cabo un experimento en un campo de trigo con cuatro niveles de N y dos regímenes hídricos en Aranjuez (Madrid) durante 2 años. Se tomaron en campo mediciones de biomasa, concentración de N en la planta y el índice de nutrición nitrogenada (NNI) en tres etapas de crecimiento, y se registraron el rendimiento del grano y la concentración de N en la cosecha. Cerca de las fechas de las mediciones en campo, se adquirieron imágenes hiperespectrales con un sensor que cubría las regiones del visible y parte del infrarrojo cercano (400–850 nm) y otro que cubría parte del infrarrojo de onda corta (950–1750 nm) desde una aeronave que voló a 300 m sobre el experimento. También se descargaron imágenes Sentinel-2 del sitio. Se evaluaron índices de vegetación extraídos de las imágenes aéreas y satelitales para estimar el NNI. El índice de contenido de clorofila del dosel (CCCI) fue el mejor indicador del NNI (RMSE = 0,21). Los mapas de NNI obtenidos a partir de las imágenes reflejaron la distribución espacial de las necesidades de N del trigo y permitieron identificar zonas que al ser fertilizadas responden al rendimiento en encañado y a la concentración de N en grano en floración. Los resultados destacan la capacidad de las imágenes hiperespectrales y satelitales para el monitoreo de cultivos y la gestión del N y de la fertilización.

Palabras clave: Estado nutricional cultivo, Mapas aplicación fertilizante, Rendimiento, Calidad grano

Remote sensors for optimizing nitrogen fertilization in bread wheat

***Abstract**: Remote sensing is a valuable tool for creating site-specific maps to reduce the environmental impact of excessive nitrogen (N) fertilization. The aim of this study was the application of remote sensing to improve N management and harvest assessment in bread wheat (Triticum aestivum L.). A wheat field experiment with four N levels and two water regimes was conducted in Aranjuez (Madrid) over 2 years. Ground-truth measurements of biomass, plant N concentration, and nitrogen nutrition index (NNI) were collected at three growth stages, with grain yield and N concentration recorded at harvest. Close to the dates of the ground measurements, hyperspectral imagery was acquired with a sensor covering the visible and part of the near-infrared regions (400–850 nm) and other covering part of the short-wave infrared (950–1750 nm) from an aircraft flying 300 m above the experiment. Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery of the site were downloaded. Vegetation indices extracted from the airborne imagery were tested to assess NNI. The canopy chlorophyll content index (CCCI) was the best proxy for crop N status, assessing NNI with RMSE = 0.21. The NNI maps from aerial imagery reflected the spatial distribution of wheat N requirements and enabled identification of N-responsive and nonresponsive sites for*

yield at stem elongation and for grain N at flowering. The findings highlight the effectiveness of hyperspectral and multispectral imagery for crop monitoring and N-fertilizer management.

***Keywords**: Crop nutritional status, Fertilizer application maps, Yield, Grain quality*

1. INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es un nutriente esencial para el crecimiento y la productividad de los cultivos, por lo que se aplica frecuentemente como fertilizante (Fitzgerald *et al*., 2010). Sin embargo, la eficiencia en el uso del N es relativamente baja y solo alrededor de la mitad del fertilizante aplicado es asimilado por los cultivos. El resto se pierde al medio ambiente, causando problemas graves para la calidad del agua y del aire. Ajustar la fertilización a las necesidades del cultivo es una estrategia clave para aumentar la eficiencia del N y reducir la contaminación del agua y del aire.

El trigo ocupa el 15% de la superficie mundial de tierras cultivadas y supone el 17% del uso global de fertilizantes nitrogenados (FAOstat, 2019). Una estrategia común para mejorar la eficiencia del N en trigo es la fertilización fraccionada, aplicando un abonado de cobertera antes del encañado para asegurar el rendimiento y otro adicional en floración para aumentar el contenido de proteína del grano. La evaluación del estado nitrogenado del cultivo en estos estadios permite a los agricultores ajustar la aplicación de fertilizante N.

El índice de nutrición nitrogenada (NNI) es la herramienta de diagnóstico más reconocida para evaluar el estado de N del cultivo (Lemaire *et al*., 2008). El NNI se calcula como la relación entre la concentración de N en los brotes aéreos y la concentración mínima de N necesaria para la acumulación máxima de biomasa. Cuando NNI<1, el cultivo presenta deficiencia de N, y cuando NNI>1, está sobre fertilizado. Su determinación en campo es destructiva y presenta gran variabilidad espacial por lo que existe potencial para la estimación con sensores remotos (Lemaire *et al*., 2008).

Para ello, se han seguido dos enfoques principales. La estimación de las propiedades del cultivo (biomasa, concentración de N en brotes) mediante teledetección y su utilización posterior para calcular el NNI. Otros autores han creado modelos de regresión entre índices de vegetación (VIs) y el NNI en enfoque semi-empírico. El VI que ha mostrado mayor potencial es el índice de clorofila del dosel del cultivo (*CCCI*; Fitzgerald *et al*., 2010) que podría ser útil para reflejar la variabilidad espacial del NNI en campo y obtener mapas para la aplicación variable de fertilizante.

En este trabajo nos centramos en i) explorar la capacidad de CCCI para estimar el NNI del trigo, ii) desarrollar relaciones que permitiesen obtener mapas que reflejen el estado nitrogenado del cultivo y iii) estimar el error cometido al identificar las zonas de cultivo donde se recomienda aplicar fertilizante N.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Experimento y toma de datos en campo

El ensayo se llevó a cabo en un campo de 8 ha de la finca experimental La Chimenea (Aranjuez, Madrid); ocupaba la mitad de un campo regado con un pivote (Fig.1). El clima en la zona es frío semi-árido (BSk) según la clasificación de Köppen. El suelo está clasificado como *Haplic Calcisol*, con pH ≈ 8.1, materia orgánica 1.8% y textura franco arcillo-limosa.

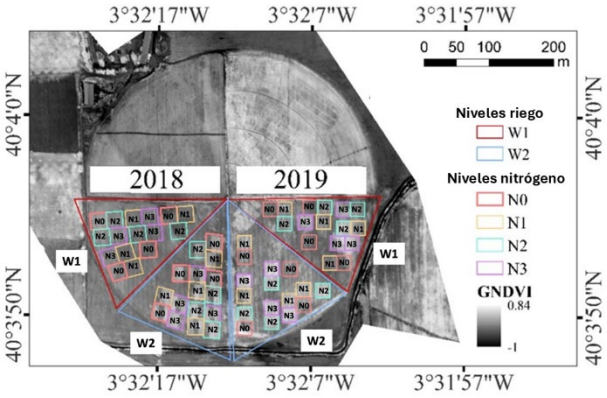


Figura 1. Localización del ensayo e índice de vegetación verde normalizado (GNDVI) en floración para las 32 parcelas distribuidas en 2 niveles de riego y 4 de nitrógeno.

En noviembre de 2017, la mitad del campo experimental se sembró con trigo de invierno (*Triticum aestivum* L.) a una densidad de siembra de 220 kg ha^{-1} y la otra mitad se sembró en 2018 (Fig. 1). Cada año, se estableció un ensayo factorial con cuatro repeticiones distribuyendo 32 parcelas (25 m× 25 m) aleatoriamente en cuatro niveles de N (N0, N1, N2 y N3, respectivamente) y dos regímenes hídricos en floración (W1 y W2). Las parcelas se marcaron con cinemática en tiempo real (RTK) a través de la Red Nacional de Estaciones de Referencia GNSS, con un receptor Topcon HiPer Pro (Topcon Singapore Holdings Pte. Ltd, Singapur) utilizando estaciones permanentes en Sonseca (Toledo) y Aranjuez (Madrid).

La fertilización con sulfato amónico nítrico se fraccionó en dos aplicaciones de cobertera: 66% en ahijado y 33% al final de encañado. Los cuatro niveles de N correspondieron a N0 (control), N1 (estrés por N), N2 (dosis recomendada) y N3 (sobrefertilizado). Los dos regímenes hídricos se establecieron al inicio de la floración regando la mitad de las parcelas (W2) con 25 mm en mayo de 2018 y 46 mm en 2019 (Fig. 1).

La respuesta del trigo a los tratamientos se determinó tomando dos muestras de biomasa aérea (0,5 m × 0,5 m) por parcela en inicio, final de encañado y floración, así como cosechando franja central (1,4 m × 20 m) de cada parcela en julio. Las muestras de biomasa aérea y de grano se secaron y una submuestra se analizó en el laboratorio para determinar la concentración de N mediante el método de combustión Dumas (analizador LECO FP-428, St. Joseph, MI, EE. UU.). El estado de N del cultivo en cada parcela se estimó con la curva crítica de dilución propuesta por Pancorbo *et al*. (2021):

$$\%N_{critical} = 4.42 \cdot Biomass^{-0.832} \quad (1)$$

donde $\%N_{critical}$ es el mínimo %N en los brotes aéreos que produce el crecimiento máximo para un valor dao de biomasa. El NNI se calculó en las muestras como:

$$NNI = \frac{\%N}{\%N_{critical}} \quad (2)$$

Por lo tanto, valores de NNI < 1 muestran parcelas deficientes en N, y NNI>1 sobre fertilizadas.

2.2. Adquisición imágenes aéreas y satelitales

Se capturaron imágenes hiperespectrales aéreas a 300 m sobre el experimento en encañado inicial, final y floración. En ambos años, los sensores espectrales se instalaron en una aeronave Cessna que volaba a 75 km h^{-1} sobre el campo experimental, siguiendo el plano solar a las 11 GMT. Las campañas aéreas fueron operadas por el Laboratorio de Métodos de Investigación en Teledetección Cuantitativa del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (QuantaLab, IAS-CSIC, España). Las imágenes se adquirieron bajo condiciones de cielo despejado y un máximo de 4 días después de la recolección de biomasa. Uno de los sensores hiperespectrales (Hyperspec VNIR, Headwall Photonics, Fitchburg, MA, EE.UU.) capturó la reflectancia en las regiones visible (VIS) y NIR (400–850 nm) con una resolución espectral de 6,5 nm de ancho completo a mitad de altura (FWHM) y un campo de visión (FOV) de 50°, que proporcionó una resolución espacial de 0,2 m. El otro sensor (NIR-100, Headwall Photonics, Fitchburg, MA, EE.UU.) capturó la reflectancia en el SWIR (950–1750 nm) con 6,05 nm FWHM, un FOV de 38,6° y resolución espacial de 0,6 m. Los sensores se calibraron radiométricamente con una esfera integradora (CSTM-USS-2000C LabSphere, North Sutton, NH, EE. UU.) utilizando cuatro niveles de iluminación y seis tiempos de integración. La corrección atmosférica se realizó midiendo la irradiancia entrante simultáneamente con los vuelos y mediante simulaciones del modelo SMARTS usando datos de profundidad óptica de aerosoles y condiciones meteorológicas.

También se descargaron imágenes de Sentinel-2 en los días libres de nubes próximos a la adquisición de las muestras de biomasa del servidor de la Agencia Espacial Europea (ESA, 2022). Los productos descargados estaban corregidos atmosféricamente (Level 2A).

2.3. Extracción índices y búsqueda relaciones

De cada parcela, los datos se extrajeron de las imágenes ortorrectificadas utilizando las coordenadas RTK GNSS y dejando un margen de 2 m en todos los lados de las parcelas. Se obtuvieron espectros promedio de cada parcela de los que se calcularon el NDVI, el NDRE y el CCCI siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo} \quad (3)$$

$$NDRE = \frac{NIR - Borde\ rojo}{NIR + Borde\ rojo} \quad (4)$$

$$CCCI = \frac{NDRE - NDRE_{mínimo}}{NDRE_{mínimo} + NDRE_{máximo}} \quad (5)$$

Además, para construir una representación planar con múltiples combinaciones, las imágenes aéreas se remuestrearon a 2 m para todo el campo de trigo cultivado cada año y se calculó *NDVI, NDRE* y *CCCI*.

De las imágenes satelitales se extrajeron las bandas de 10 m (NIR y Rojo) de los pixeles puros de cada parcela. Al no haber pixeles puros de las bandas de 20 m, se realizó una convolución en los espectros medios de cada parcela para obtener los valores de la banda de Borde rojo. Aplicando las Ecuaciones 3, 4 y 5 se obtuvieron los VIs de cada parcela (Pancorbo *et al*. (2023).

3. RESULTADOS

Los resultados de rendimiento y concentración de N en grano de trigo se vieron afectados por los distintos niveles de N y riego, mostrando diferentes respuestas según los años (Pancorbo *et al*., 2023). Esto muestra el papel de los sensores que midan el estado del cultivo durante la campaña para ajustar las aplicaciones a las necesidades reales del cultivo.

El índice CCCI mostró mejor relación que NDVI y NDRE con el estado nitrogenado del cultivo. CCCI presentó una relación lineal con NNI (RMSE = 0,21; R^2 = 0,41), que cuando se calculó con los datos extraídos del avión fue:

$$NNI = 0{,}321 + 0{,}981\ CCCI \quad (6)$$

Esta relación para los datos extraídos de Sentinel-2 presentó una pendiente de 1,64 e intercepto de -0,01, siendo el RMSE = 0,29 y R^2 = 0,36. CCCI fue calculado en ambos casos con las ecuaciones de $NDRE_{max}$ y $NDRE_{min}$ obtenidas de los datos del avión (Fig. 2).

Al estudiar la relación entre otras bandas de reflectancia con las propiedades del cultivo no se observaron relaciones significativas (datos no mostrados) con algunas excepciones. Entre ellas destaca la capacidad de CCCI para estimar la biomasa y las bandas de la región en torno a 1600nm para la concentración de N en los brotes aéreos.

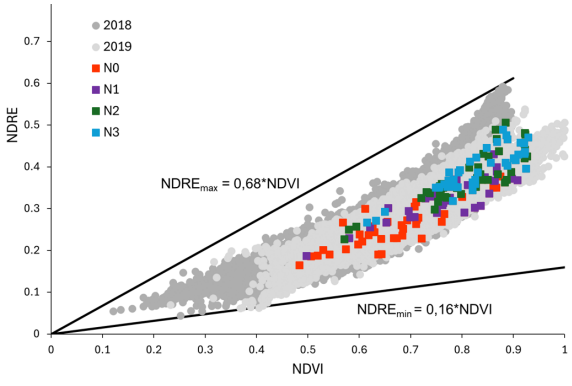


Figura 2. Representación planar de NDVI y NDRE extraídos de las imágenes aéreas de las cinco campañas. Los símbolos grises son los valores de los pixeles de 2m de todo el campo experimental. Los símbolos coloreados son el valor medio para cada parcela según los niveles de nitrógeno. Las líneas sólidas son las envolventes de todas las observaciones para el cálculo de CCCI en la Ecuación 5.

El mapa de NNI obtenido a partir de las imágenes adquiridas desde el avión refleja la variabilidad del estado nutricional del cultivo en el estadio de encañado (Fig. 3). NNI varó desde 0,1 en las áreas no fertilizadas hasta 1,22 en las sobre fertilizadas.

En este estadio y en floración el error cometido al distinguir parcelas en las que el rendimiento respondió a la aplicación de fertilizante fue del 18%, mientras que el inicio de encañado fue del 38%. El error cometido al distinguir parcelas en las que la concentración de N en grano respondió a la aplicación de fertilizante en el inicio de encañado fue del 39%, en final de encañado fue del 26% y en floración del 22%.

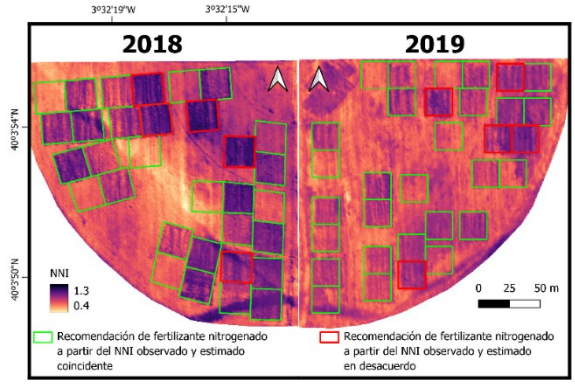


Figura 3. Mapas de índice de nutrición del cultivo (NNI) obtenidos de las imágenes hiperespectrales adquiridas desde un avión sobrevolando un campo de trigo en el estadio de final de encañado en los dos años experimentales.

4. DISCUSIÓN

Este estudio confirmó que el CCCI es un indicador fiable del índice de nutrición de nitrógeno (NNI); por lo tanto, puede utilizarse para obtener mapas que representen la variabilidad espacial del estado de N del cultivo y utilizarlos para ajustar la fertilización nitrogenada de cobertera con el fin de aumentar el rendimiento (final encañado) o la calidad del grano (floración) en trigo.

El CCCI tiene varias ventajas (Fitzgerald *et al*., 2010). En primer lugar, su base conceptual es similar a la del índice fisiológico NNI, ya que combina en un plano el NDVI (sustituto de la biomasa) y el NDRE (sustituto de la concentración de N en los brotes). En segundo lugar, es muy común que los VIs se saturen cuando la biomasa es abundante; esto ocurre con los índices basados en el visible y el NIR (como el NDVI) y se reduce ligeramente cuando los índices incorporan la banda de borde rojo (como el NDRE). La combinación de ambos índices en una representación planar ayuda a minimizar este inconveniente. Por último, estimar el NNI a partir del CCCI puede reflejar la verdadera necesidad de N del cultivo, proporcionando una regla clara para técnicos, agricultores o herramientas de decisión. Resuelve el dilema de aplicar más fertilizante nitrogenado a las zonas menos fértiles (esquema Robin Hood) o a las zonas con mayor potencial de rendimiento (esquema del Rey).

A partir de los datos proporcionados, pueden crearse mapas de NNI que reflejan el estado de N del cultivo y así un mapa de aplicación de fertilizante (Fig. 4). Estos pueden orientar decisiones sobre la fertilización de cobertera para mejorar el rendimiento en el encañado, y para la calidad del grano en torno a floración. Utilizar mapas de estadios más tempranos implica una alta incertidumbre en la identificación de sitios sensibles lo que puede hacerlo no viable en la práctica.

5. CONCLUSIONES

El CCCI estimó mejor el estado de N del cultivo que otros índices espectrales. Con las ecuaciones obtenidas se generaron mapas que reflejan la distribución espacial del NNI del trigo a partir de imágenes aéreas. La tasa de error en estos mapas al identificar sitios sensibles y no sensibles a la aplicación de N para aumentar el rendimiento en la fase final de encañado fue del 18%, y para aumentar la concentración de N en grano fue del 22% en floración.

6. AGRADECIMIENTOS

Proyecto (PID2021-124041OB-C21/C22) financiado por la Agencia Estatal de Investigación, Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033/).

7. REFERENCIAS

FAO. World Fertilizer Trends and Outlook to 2019; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2016.

Fitzgerald, G., Rodriguez, D., O'Leary, G. (2010). Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index-The canopy chlorophyll content index (CCCI). *Field Crops Res., 116*, 318–324. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.01.010.

Lemaire G., M.-H. Jeuffroy, F. Gastal. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: theory and practices for crop N management. European *Journal of Agronomy, 28* (4) (2008) 614–624. https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.005

Pancorbo, J. L., Camino, C., Alonso-Ayuso, M., Raya-Sereno, M. D., Gonzalez-Fernandez, I., Gabriel, J. L., Zarco-Tejada, P. J., & Quemada, M. (2021). Simultaneous assessment of nitrogen and water status in winter wheat using hyperspectral and thermal sensors. Eur. *J. Agron, 127*, 126287. https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126287

Pancorbo, J. L., Alonso-Ayuso, M., Camino, C., Raya-Sereno, M. D., Zarco-Tejada, P. J., Molina, I., Gabriel, J.L., Quemada, M. (2023). Airborne hyperspectral and Sentinel imagery to quantify winter wheat traits through ensemble modeling approaches. *Precis. Agric. 24*, 1288-1311. https://doi.org/10.1007/s11119-023-09990-y.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.160

Integración de modelos asistidos por satélite para contabilizar el agua consumida por los cultivos

Garrido-Rubio, Jesús [1] **Molina-Medina, Antonio** [2] **Moya, Alejandro** [3] **Pérez-Blanco, C. Dionisio** [1] **Sánchez, Juan Manuel** [2] **González-Piqueras, José** [2] **Galve, Joan Miquel** [2]

[1] WAVE - Water Environment and Economics. Instituto IMDEA Agua

[2] Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha

[3] Departamento de Ingeniería Informática. Escuela Politécnica Superior.

ORCID: Garrido-Rubio 0000-0002-1739-2616 Molina-Medina 0000-0002-3706-2489 Moya 0000-0002-8071-9845 Pérez-Blanco 0000-0002-7777-4317 Sánchez 0000-0003-1027-9351 González-Piqueras 0000-0003-2226-5731 Galve 0000-0003-1066-7717

Correspondencia: jesus.garrido@imdea.org antoniojesus.molina@uclm.es alejandro.moya@uam.es dionisio.perez@imdea.org juanmanuel.sanchez@uclm.es jose.gonzalez@uclm.es joanmiquel.galve@uclm.es

RESUMEN

La contabilidad del agua de riego ha sido tradicionalmente abordada por los registros de medidores volumétricos, aunque su fiabilidad requiere de correctas instalaciones y mantenimientos, y garantizar una cobertura espacializada obliga, además, a un importante esfuerzo económico. Por el contrario, los modelos basados en teledetección permiten monitorizar extensas superficies regables y estimar la contabilidad del agua empleada por los cultivos. Este trabajo persigue reducir las incertidumbres de esta contabilidad, mediante la integración de dos modelos conceptualmente distintos, basados en balance de agua y de energía. Los resultados se muestran integrados a la escala de comunidad de regantes, con el fin de aportar mayor fiabilidad en las medidas disponibles, y mostrar aplicabilidad hacia los gestores hídricos. Este trabajo viene a contribuir a los esfuerzos por trasladar a nuestro territorio nacional, los avances que se están mostrando a nivel internacional por integrar varios modelos asistidos por satélite en la contabilidad del agua consumida (evapotranspirada) por los cultivos. Los resultados similares obtenidos entre modelos y el buen acuerdo frente a contadores (R2 ≈ 0,81), animan a adoptar la integración de modelos en la planificación de políticas asistidas con datos de Teledetección.

Palabras clave: *evapotranspiración, balance de agua y energía, regadío, ensemble*

Fecha de recepción: 15 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 15 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Integración de modelos asistidos por satélite para contabilizar el agua consumida por los cultivos

Garrido-Rubio, Jesús [(1)], Molina-Medina, Antonio [(2)], Moya, Alejandro [(3)], Pérez-Blanco, C. Dionisio [(1)], Sánchez, Juan Manuel [(2)], González-Piqueras, José [(2)], Galve, Joan Miquel [(2)]

[(1)] WAVE - Water Environment and Economics. Instituto IMDEA Agua.
0000-0002-1739-2616, jesus.garrido@imdea.org ; 0000-0002-7777-4317, dionisio.perez@imdea.org.

[(2)] Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha.
0000-0002-3706-2489, antoniojesus.molina@uclm.es ; 0000-0003-1027-9351, juanmanuel.sanchez@uclm.es.
0000-0003-2226-5731, jose.gonzalez@uclm.es ; 0000-0003-1066-7717, joanmiquel.galve@uclm.es.

[(3)] Departamento de Ingeniería Informática. Escuela Politécnica Superior.UAM. Madrid.
0000-0002-8071-9845, alejandro.moya@uam.es.

Resumen: La contabilidad del agua de riego ha sido tradicionalmente abordada por los registros de medidores volumétricos, aunque su fiabilidad requiere de correctas instalaciones y mantenimientos, y garantizar una cobertura espacializada obliga, además, a un importante esfuerzo económico. Por el contrario, los modelos basados en teledetección permiten monitorizar extensas superficies regables y estimar la contabilidad del agua empleada por los cultivos. Este trabajo persigue reducir las incertidumbres de esta contabilidad, mediante la integración de dos modelos conceptualmente distintos, basados en balance de agua y de energía. Los resultados se muestran integrados a la escala de comunidad de regantes, con el fin de aportar mayor fiabilidad en las medidas disponibles, y mostrar aplicabilidad hacia los gestores hídricos. Este trabajo viene a contribuir a los esfuerzos por trasladar a nuestro territorio nacional, los avances que se están mostrando a nivel internacional por integrar varios modelos asistidos por satélite en la contabilidad del agua consumida (evapotranspirada) por los cultivos. Los resultados similares obtenidos entre modelos y el buen acuerdo frente a contadores ($R^2 \approx 0{,}81$), animan a adoptar la integración de modelos en la planificación de políticas asistidas con datos de Teledetección.

Palabras clave: evapotranspiración, balance de agua y energía, regadío, ensemble

Remote Sensing-based models' ensemble for crop water use accounting

***Abstract**: Irrigation water accounting has traditionally been based on records from volumetric meters, although their reliability depends on proper installation and maintenance, and ensuring spatially comprehensive coverage also entails substantial economic effort. In contrast, remote-sensing-based models enable the monitoring of extensive irrigated areas and the estimation of the water accounted for as being used by crops. This work aims to reduce the uncertainties in such accounting by integrating two conceptually different models, based respectively on water balance and energy balance approaches. The results are presented in an integrated manner at the irrigation district (water users association) scale, to provide greater confidence in the available measurements and to demonstrate applicability for water managers. This study contributes to ongoing efforts to transfer to our national context the advances being demonstrated internationally in integrating multiple satellite-assisted models for accounting of water consumed (i.e., evapotranspired) by crops. The similar results obtained between models, together with the good agreement observed against meter readings ($R^2 \approx 0{,}81$), support adopting this model integration in policy planning assisted by Earth Observation data.*

***Keywords**: evapotranspiration, thermal and water balance, irrigation, ensemble*

1. INTRODUCCIÓN

La medición de los recursos hídricos empleados por la agricultura de regadío se ha abordado tradicionalmente mediante la instalación de instrumentos de medida como los contadores de agua riego. Si bien, para evitar su deterioro y obtener lecturas fiables, la correcta instalación y mantenimiento exige recursos económicos y humanos. Por ello, y según el último informe ESYRCE de 2024 (www.mapa.gob.es) que cifra la superficie de

regadío en España cerca de los 3,8Mha, la instalación de instrumentos de medida repartidos por todo el territorio se aprecia cómo una estrategia de contabilidad difícilmente operativa. Por el contrario, la captura de información sobre grandes superficies por los satélites de Observación de la Tierra, representada por los programas Landsat o Copernicus, ofrece datos gratuitos, libres, fiables y en las frecuencias temporales y resoluciones espaciales adecuadas para la generación de series temporales de información que permiten monitorizar correctamente la evolución de los cultivos en las superficies de regadío. Esto ha facilitado el desarrollo de modelos para estimar la evapotranspiración de los cultivos (ET_c), es decir, para contabilizar sus recursos hídricos consumidos. No obstante, estos modelos presentan limitaciones en su aplicación, así como incertidumbres en los resultados generados, que deben tenerse en cuenta a la hora de abordar la contabilidad del agua de los cultivos en regadío (Foster *et al*., 2020).

Es por ello, que la creciente y razonable exigencia de aportar información fiable y relevante a los gestores hídricos ha adquirido una tendencia colaborativa que busca integración entre los diferentes modelos mediante su acoplamiento, con el fin de reducir las incertidumbres individuales asociadas a cada uno, aportando así mayor transparencia. Iniciativas existentes como la plataforma estadounidense OpenET (https://etdata.org/) ya recogen dichos planteamientos. Sin embargo, una limitación general e importante a la hora de calibrar y evaluar estimaciones de la ET_c asistida por teledetección es la disponibilidad de instrumentos de medida adecuados, como puedan ser los lisímetros o las torres de covarianza de torbellinos, que a la vez estén repartidos por todo el territorio sobre diferentes tipos de cultivos. Una alternativa actualmente más accesible son los contadores de agua de riego repartidos en mayor medida sobre las superficies en regadío y comúnmente usados por gestores hídricos. Por ello, ¿es posible emplearlos como alternativa para armonizar la ET_c asistida por satélite y generada por distintos modelos para depurar las salidas y aportar mayor confianza a la contabilidad del agua de riego? La presente comunicación aborda esta hipótesis combinando dos modelos basados en teledetección para estimar la ET_c y su evaluación a partir de los registros anuales de los contadores de riego repartidos sobre una Unidad de Demanda Agraria (UDA).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La UDA "*Bombeo recarga artificial El Carracillo*" (https://mirame.chduero.es), en adelante El Carracillo (Figura 1), situada en la Demarcación Hidrográfica del Duero, nutre con unos 14hm^3/año procedentes de la masa de agua subterránea *Los Arenales-Tierra de Pinares*, unas 2.950ha de cultivos hortícolas (patata…), herbáceos (maíz…) e industriales (remolacha azucarera …). El sistema de riego mayoritario es aspersión, y debido al cultivo de hortícolas es necesario introducir barbechos en las rotaciones anuales. Con un clima mediterráneo, su precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o) anual rondan de media los 400 y 1100 mm respectivamente, según la estación SIAR cercana de Gomezserracín (www.siar.es).

Cómo datos de partida el estudio contó con los registros anuales por campaña de riego de unos 740 contadores proporcionados por El Carracillo, además de una clasificación supervisada multitemporal basada en series temporales de NDVI por campaña, cuyas clases de clasificación de grupos de cultivos en regadío, y proporción de superficie son: cereal invierno (17%), cereal primavera (10%), primavera tardía (3%), veranos alta cobertura (48%), veranos baja cobertura (14%), hortícolas otoño (6%), alfalfa (1%) y dobles cosechas (2%). Esta clasificación, evaluada mediante la matriz de contingencia frente a las líneas de declaración SIGPAC, obtuvo una precisión global de identificación del 97%.

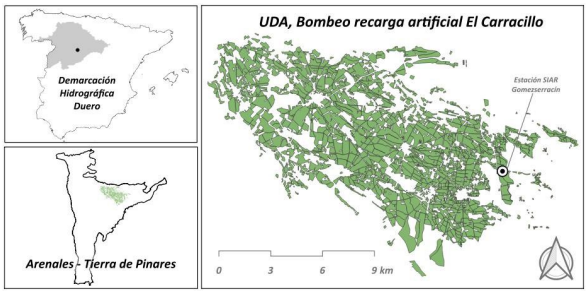


Figura 1. Localización UDA El Carracillo.

2.2. Integración de modelos basados en teledetección para la contabilidad de la ET_c

La ET_c mensual se estimó con los modelos de balance de energía de una fuente, METRIC (*Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration*, Allen *et al*., 2007) y balance de agua en el suelo asistido por teledetección, RS-SWB (*Remote Sensing-based Soil Water Balance*, Garrido-Rubio *et al*., 2020). El RS-SWB generó la evapotranspiración de cultivo ajustada ET_{caj}, en adelante ET (RS-SWB), empleando el gránulo 30TUL de los satélites Sentinel 2 (A y B), con un tamaño de píxel de 10 m, y procesando una serie temporal de 63 imágenes NDVI (25 para 2021, 20 para 2022 y 18 para 2023), corregidas atmosféricamente por normalización absoluta. METRIC usó los mapas de evapotranspiración, en adelante ET (METRIC) generados por la aplicación EEFLUX (eeflux-level1), que trabaja con la serie temporal de imágenes VNIR y TIR de Landsat 8 y 9, con un tamaño de píxel de 30 m. Destacar las diferentes fuentes meteorológicas usadas por ambos modelos, mientras que el RS-SWB usó los datos diarios de P y ET_o registrados por la citada estación SIAR, METRIC usó la ET_o observacional diaria proporcionada por AEMET (rejilla de 5x5 km^2).

Para evaluar las series mensuales de ET_c a partir de los valores brutos de agua de riego entregados se siguieron los siguientes pasos: i) cálculo del valor promedio de ET (RS-SWB y METRIC) por uso de suelo clasificado y ciclo de cultivo (derivado de las series temporales promedio NDVI); ii) consideración de la P efectiva por ciclo de cultivo y su descuento al anterior valor estimado; iii) agregación espacial a los siete términos municipales localizados en El Carracillo para recoger la frecuente

rotación de las superficies en regadío (Molina-Medina, A. *et al*., 2024); iv) agregación espacial del agua de riego bruta por campaña recogida por los contadores en cada uno de los términos municipales y aplicación de una eficiencia global de riego del 75% (mirame.chduero.es), en adelante necesidades netas de agua de riego (NIR); y iv) evaluación de los anteriores valores totales por término municipal y campaña de riego. Finalmente, se combinaron linealmente ambas salidas de ET (RS-SWB y METRIC) generando una ET integrada (en adelante "ensemble").

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra el buen acuerdo, en líneas generales, entre las series mensuales de los valores promedio de ET (RS-SWB) y ET (METRIC) por uso del suelo clasificado. Destacamos la proximidad de la evolución de la ET de ambos modelos durante las fases de desarrollo y meseta (ver NDVI promedio, Figura 2), así como los semejantes valores mensuales mínimos (≈25mm) y máximos (≈150mm). Por el contrario, apreciamos diferencias significativas entre ambas estimaciones mensuales de ET en el uso del suelo doble cosecha, particularmente en el periodo anual entre cultivos (ver NDVI promedio), o bien cuando los cultivos presentan un desarrollo más acelerado con sucesivas cosechas a lo largo de la campaña (alfalfa). También destacamos las diferencias en la fase de senescencia para la mayoría de los usos clasificados (salvo en veranos) que, sin embargo, deben tener un menor peso en la contabilidad del agua por ser coincidentes con los cortes de riego y cosecha en la mayoría de los cultivos. Resaltar, además, que las barras de dispersión asociadas a cada estimación mensual son más elevadas en la fase con mayor demanda de agua de riego, mostrando una fuerte variabilidad en este importante periodo. Este aspecto debe ser investigado en mayor profundidad para determinar las causas, cómo por ejemplo y ya observado, que diferentes fechas de siembra provoquen desfases evolutivos dentro de un mismo tipo de cultivo, y en consecuencia diferentes contabilidades.

Más allá del comportamiento mensual de la ET de ambos modelos, la Tabla 1 recoge los valores acumulados por grupo de cultivo clasificado y campaña (acotada a su desarrollo evolutivo). Nuevamente, observamos un buen acuerdo entre modelos estimando valores ligeramente superiores en ET (RS-SWB) respecto a ET (METRIC), con un promedio de las diferencias entre ambos modelos de 70mm, fundamentalmente lastrado por las significativas diferencias estimadas en alfalfa (≈250mm).

Tabla 1. Valores promedio en mm de ET (RS-SWB y METRIC) por grupo de cultivo clasificado y campaña.

Grupo de cultivos clasificado	ET (RS-SWB), mm			ET (METRIC), mm		
	2021	2022	2023	2021	2022	2023
Cereal invierno	510	500	540	530	440	540
Cereal primavera	460	450	390	480	380	380
Primavera tardía	350	320	280	280	240	240
Verano alta	600	610	630	550	530	530
Verano baja	490	490	490	450	450	450
Hortícola otoño	360	470	410	350	410	380
Alfalfa	880	960	1030	670	590	820
Dobles Cosechas	730	780	800	740	710	770

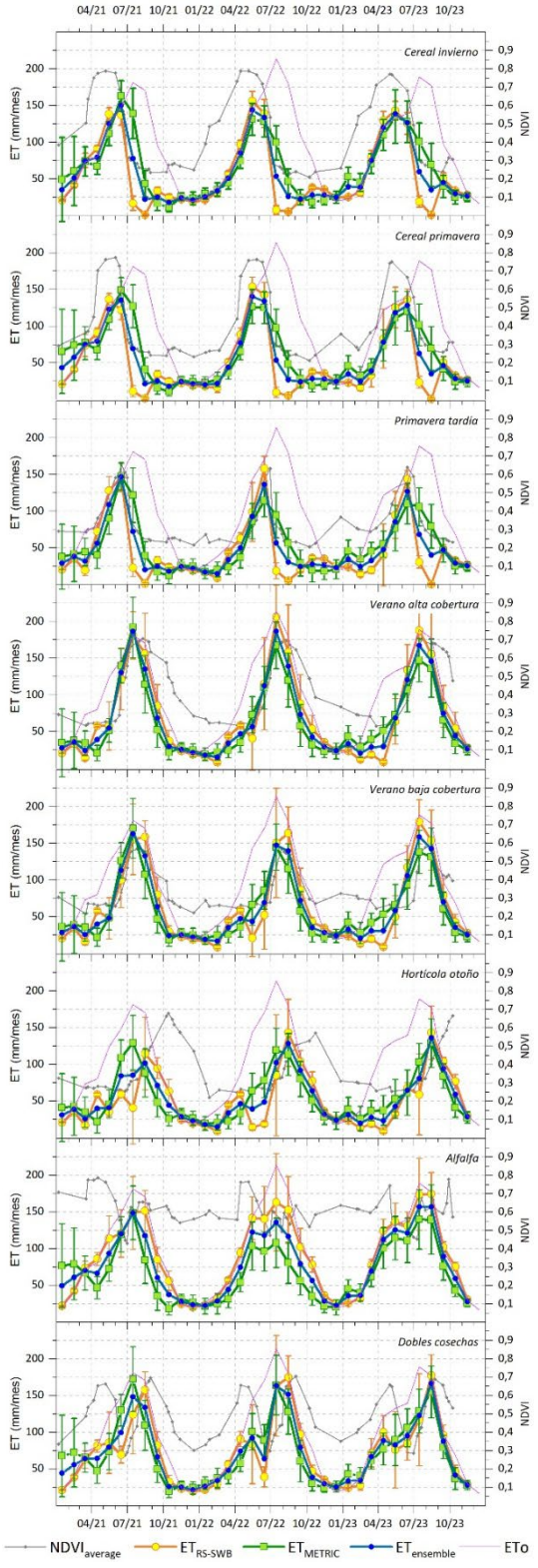


Figura 2. Serie mensual del valor promedio de ET (RS-SWB, METRIC y ENSEMBLE), ET_o y NDVI por grupo de cultivo clasificado. Las barras de error representan la dispersión entre todos los píxeles de un mismo grupo de cultivo.

La Figura 3 muestra la evaluación del acumulado de consumo de agua de los cultivos (una vez sustraída la P efectiva) de las estimaciones de ET (RS-SWB y METRIC) por municipio y campaña de riego frente a las NIR recogidas por los contadores de agua. En ambos casos se obtiene un $R^2 \approx 0{,}81$, un bias de 0,02 hm^3 con RS-SWB y de 0,21 hm^3 con METRIC, y un error cuadrático medio (RMSE) de ±0,54 hm^3 con RS-SWB y de ±0,51 hm^3 con METRIC. Además de esta escala de agregación por municipios, los acumulados totales estimados para 2021, 2022 y 2023 en El Carracillo a partir de ET (RS-SWB) son 11,41, 13,04 y 12,39 hm^3/año, y para ET (METRIC) 10,66, 11,21 y 10,92 hm^3/año, frente a 12,59, 12,25 y 12,41 hm^3/año de NIR registrada por los contadores, confirmando así la ligera infraestimación que bien puede ser debida a las propias incertidumbres de los modelos, a la aplicación de una eficiencia global del 75% o a la combinación de ambos factores.

Finalmente, el análisis en los resultados a partir de la integración de ambos modelos, ET (ENSEMBLE), los principales estadísticos son muy similares en la evaluación por municipio y campaña de riego, (Figura 3, $R^2 \approx 0{,}81$, bias de 0,12 hm^3 y RMSE de ±0,52 hm^3) y un acumulado total por campaña de 11,04, 12,12 y 11,66 hm^3/año, de nuevo algo inferiores a los registrados por las NIR de los contadores.

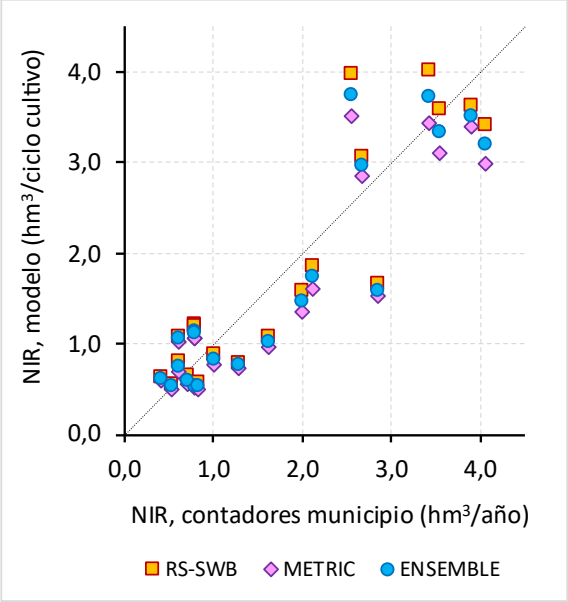


Figura 3. Evaluación de las estimaciones de consumo de agua de riego, tras considerar la P efectiva, a partir de la ET (RS-SWB, METRIC y ENSEMBLE) frente a las NIR por término municipal y campaña de riego (2021-2023).

4. CONCLUSIONES

Tras esta primera experiencia a escala de comunidad de regantes de integración o ensemble de varios modelos basados en teledetección (RS-SWB y METRIC) para contabilizar el agua consumida por los cultivos en regadío, ET (ENSEMBLE), podemos concluir que se observa una gran similitud entre las estimaciones a través del balance de agua asistido por Teledetección y del balance de energía, con diferencias en algunas fases del crecimiento, más acusadas para ciertos grupos de cultivo, que merecen un análisis más detallado y pausado más adelante. El buen acuerdo entre los resultados y los datos netos de agua de riego registrados directamente en los contadores son prometedores, y muestran el potencial y fiabilidad de las técnicas basadas en Teledetección para el seguimiento y contabilidad del agua empleada por los cultivos en regadío en extensas superficies, al tiempo que permiten cuantificar las incertidumbres cometidas. Esto resulta de particular interés para los gestores del agua, pues permite disponer de una herramienta operativa a escala nacional.

No obstante, conviene ser cautos e investigar en mayor profundidad esta experiencia, con el fin de acotar y proporcionar las incertidumbres asociadas al uso de diferentes datos meteorológicos, estudiar tipos concretos de cultivos, y extender su aplicación a diferentes zonas regables. El trabajo también se podría beneficiar de las medidas de una red extensa de observaciones de ET que permita una validación independiente a los registros de una red de contadores.

5. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el European Research Council, proyecto "*Water Theft*" (Grant agreement ID: 101124884) y por MICIU/AEI/10.13039/501100011033, junto con FEDER,UE, a través del proyecto EUNOMIA (PID2024-161881OB-C21 y PID2024-161881OB-C22).

6. REFERENCIAS

Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *133*(4), 380–394. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)

Foster, T., Mieno, T., & Brozović, N. (2020). Satellite-Based Monitoring of Irrigation Water Use: Assessing Measurement Errors and Their Implications for Agricultural Water Management Policy. *Water Resources Research*, *56*(11), e2020WR028378. https://doi.org/10.1029/2020WR028378

Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., Campos, I., Osann, A., González-Gómez, L., & Calera, A. (2020). Remote sensing–based soil water balance for irrigation water accounting at plot and water user association management scale. *Agricultural Water Management*, *238*, 106236. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106236

Molina-Medina, A., Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., & Calera, A. (2024). Balance de agua en el suelo asistido por Teledetección sobre el acuífero Los Arenales-Tierra de Pinares para el seguimiento de extracciones de agua de riego. *Teledetección y Cambio Global: Retos y Oportunidades Para Un Crecimiento Azul. XX Congreso de La Asociación Española de Teledetección.*, 543–546. http://www.aet.org.es/?q=congresos

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.173

Teledetección del estrés hídrico en maíz: aplicación de la termometría infrarroja bajo riego deficitario en clima templado

Di Lorenzi, Andrés [1,2] **Puppo, Lucía** [2]

[1] Insituto Nacional de Invstigación Agropecuaria (INIA) - Uruguay, Uruguay

[2] Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay

ORCID: Di Lorenzi 0009-0004-6324-6531 Puppo 0009-0004-3529-8473

Correspondencia: a.dilorenzi@gmail.com lpuppo@fagro.edu.uy

RESUMEN

El riego deficitario, apoyado en termometría infrarroja para monitoreo continuo y no destructivo, permite optimizar el uso del agua en maíz, reduciendo el consumo sin comprometer el rendimiento y favoreciendo una producción más sostenible y rentable frente al cambio climático y la escasez hídrica. El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta térmica y fisiológica del maíz bajo distintos niveles de riego deficitario, analizando la relación entre la temperatura foliar, el estado hídrico del suelo y la fisiología del cultivo. El ensayo se realizó en el Centro Regional Sur, Facultad de Agronomía, bajo un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones y riego localizado (16 mm). Se evaluaron cuatro tratamientos: 100% ETc todo el ciclo; 50% ETc en etapa vegetativa y 100% desde floración a llenado de grano; 80% ETc hasta llenado de grano; y secano. Se midieron conductancia estomática, potencial xilemático e índices térmicos. Se observó una relación cuadrática significativa entre la conductancia estomática y el contenido de agua del suelo (R^2 = 0,7), confirmando la sensibilidad fisiológica al déficit hídrico. Los índices térmicos DANS y DACT permitieron diferenciar los tratamientos y mostraron alto potencial operativo por su simplicidad. Estos resultados destacan el valor de la termometría infrarroja para la gestión del riego en maíz en clima templado y su potencial integración con drones térmicos para el monitoreo a escala de campo.

Palabras clave: *programación del riego, gestión del riego agrícola, uso eficiente del agua*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Teledetección del estrés hídrico en maíz: aplicación de la termometría infrarroja bajo riego deficitario en clima templado

Di Lorenzi, Andrés [(1)], Puppo, Lucía [(2)]

[(1)] Insituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) - Uruguay, Uruguay, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay.

0009-0004-6324-6531, a.dilorenzi@gmail.com.

[(2)] Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay.

0009-0004-3529-8473, lpuppo@fagro.edu.uy.

Resumen: El riego deficitario, apoyado en termometría infrarroja para monitoreo continuo y no destructivo, permite optimizar el uso del agua en maíz, reduciendo el consumo sin comprometer el rendimiento y favoreciendo una producción más sostenible y rentable frente al cambio climático y la escasez hídrica. El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta térmica y fisiológica del maíz bajo distintos niveles de riego deficitario, analizando la relación entre la temperatura foliar, el estado hídrico del suelo y la fisiología del cultivo. El ensayo se realizó en el Centro Regional Sur, Facultad de Agronomía, bajo un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones y riego localizado (16 mm). Se evaluaron cuatro tratamientos: 100% ETc todo el ciclo; 50% ETc en etapa vegetativa y 100% desde floración a llenado de grano; 80% ETc hasta llenado de grano; y secano. Se midieron conductancia estomática, potencial xilemático e índices térmicos. Se observó una relación cuadrática significativa entre la conductancia estomática y el contenido de agua del suelo (R^2 = 0,7), confirmando la sensibilidad fisiológica al déficit hídrico. Los índices térmicos DANS y DACT permitieron diferenciar los tratamientos y mostraron alto potencial operativo por su simplicidad. Estos resultados destacan el valor de la termometría infrarroja para la gestión del riego en maíz en clima templado y su potencial integración con drones térmicos para el monitoreo a escala de campo.

Palabras clave: programación del riego, gestión del riego agrícola, uso eficiente del agua

Remote sensing of water stress in maize: application of infrared thermometry under deficit irrigation in a temperate climate

***Abstract**: Deficit irrigation, supported by infrared thermometry for continuous and non-destructive monitoring, enables optimization of water use in maize, reducing consumption without compromising yield and promoting more sustainable and profitable production under climate change and water scarcity. The objective of this study was to evaluate the thermal and physiological response of maize under different deficit irrigation levels, analyzing the relationship between leaf temperature, soil water status, and crop physiology. The experiment was conducted at the Centro Regional Sur, Faculty of Agronomy, under a randomized block design with four replications and localized irrigation (16 mm). Four treatments were evaluated: 100% ETc throughout the cycle; 50% ETc during the vegetative stage and 100% from flowering to grain filling; 80% ETc until the end of grain filling; and rainfed conditions. Stomatal conductance, stem water potential, and thermal indices were measured. A significant quadratic relationship was found between stomatal conductance and soil water content (R^2 = 0.7), confirming the physiological sensitivity to water deficit. The thermal indices DANS and DACT successfully differentiated treatments and showed high operational potential due to their simplicity. These results highlight the value of infrared thermometry for irrigation management in maize under temperate climates and its potential integration with thermal drones for field-scale monitoring.*

***Keywords**: irrigation scheduling, agricultural water management, water use efficiency*

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay, el maíz se cultiva mayormente en secano, con alta variabilidad de rendimiento y alto riesgo por sequía, por lo que el riego suplementario requiere técnicas más eficientes de programación. La temperatura del dosel medida con radiómetros infrarrojos constituye una herramienta de sensoramiento remoto proximal que permite monitorear el estrés hídrico de forma continua y remota, mediante índices como el CWSI, DANS: diferencia entre la temperatura del dosel del cultivo y la de un cultivo de referencia no estresado

y DACT: diferencia entre la temperatura del dosel del cultivo y un umbral térmico fijo (28 °C), ampliamente evaluados a nivel internacional pero poco estudiados en climas templados. Este enfoque sienta las bases para el uso de drones térmicos como siguiente paso hacia el sensoramiento remoto a escala de campo. Por ello, este estudio evalúa la capacidad de índices térmicos para detectar el estrés hídrico en maíz bajo riego deficitario, analizando su relación con variables fisiológicas (conductancia estomática y potencial xilemático) y el estado hídrico del suelo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo en el Centro Regional Sur (CRS) de la Facultad de Agronomía, ubicado en Progreso, Canelones, Uruguay (34°37' S y 56°13' O). De acuerdo con la clasificación de Köppen y Geiger, el clima corresponde a un templado mesotérmico (Cfa), caracterizado por la ausencia de estación seca y veranos calurosos. La precipitación anual promedio es de 1200 mm, con una alta variabilidad interanual e irregularidad estacional. Durante el período estival, la temperatura media oscila entre 18 y 23 °C, con una radiación diaria de 200-250 Wm^{-2} y una humedad relativa del 72 %. El suelo en el área experimental fue un Brunosol Eútrico típico Lac., clasificado como Argiudol típico (USDA).

Se establecieron cuatro tratamientos de riego: 100 % de la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante todo el ciclo; 80 % de la ETc durante todo el ciclo; 50 % de la ETc en etapa vegetativa (hasta Vt), incrementándose al 100 % desde floración (R1) hasta llenado de grano (R4); y un tratamiento de secano. Estos niveles fueron definidos para generar distintos grados de estrés hídrico, incluyendo condiciones sin limitación y déficits moderados y severos. El riego se programó mediante un balance hídrico diario del suelo, ajustando las láminas aplicadas en función de la ETc estimada y el contenido de agua en el suelo. El diseño experimental utilizado fue en bloques completos al azar (DBCA), con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Las parcelas fueron de 12 x 6 m, con 12 filas separadas por 0,50 m. El experimento se desarrolló durante la campaña 2024-2025.

Se sembró el híbrido de alto potencial DK7210bt3P de Bayer mediante siembra directa, con una densidad objetivo de 100.000 plantas ha^{-1}. Para el control de malezas, se realizaron aplicaciones de herbicidas pre y postsiembra. En función de un análisis de suelo previo, se aplicó fertilización en la siembra y refertilizaciones en V6 y V10 para evitar restricciones nutricionales. El riego se realizó con goteros de 4 L h^{-1} separados por 1,0 m, aplicando láminas brutas de 16 mm (Morales *et al*., 2022). El momento de riego se determinó mediante un balance hídrico diario (BHS), según FAO 56 (Allen *et al*., 1998). Se utilizaron datos climáticos de la estación meteorológica HOBO RX3000 (Onset Computer Corporation, Massachusetts, EE.UU.) instalada en el sitio experimental. La humedad del suelo se midió de 2 a 3 veces por semana con una sonda de capacitancia portátil (FDR, Delta T Devices, PR2), calibrada previamente, con el objetivo de ajustar el BHS si era necesario.

Se instalaron radiómetros térmicos infrarrojos (IRT, modelo SI-421, Apogee Instruments, Inc., Logan, Utah, EE.UU.) en una parcela por tratamiento, para registrar la temperatura del dosel cada 15 minutos con dataloggers ZL6 Meter (EE.UU.). Para garantizar una adecuada captura del dosel, los sensores se montaron en postes telescópicos a 0,6 m sobre el dosel y en un ángulo de 65° hacia el oeste. No se instalaron sensores IRT en el tratamiento 50%/100%.

Se calcularon cuatro indicadores térmicos: 1) índice de estrés hídrico (CWSI) (Jackson *et al*., 1981; Idso, 1982); 2) diferencia entre la temperatura del dosel y la temperatura del aire (Dif Tc-Ta) (DeJonge *et al*., 2015; Jones, H.G., 2018); 3) grados sobre el dosel sin estrés (DANS) (Taghvaeian *et al*., 2014); y 4) grados sobre el umbral del dosel de 28ºC (DACT) (DeJonge *et al*., 2015). Para los cálculos se utilizaron valores de temperatura media del dosel en días con radiación solar superior a 700 W m^{-2} similar a lo propuesto por Dejonge *et al*. (2015), eliminando interferencias de la nubosidad. Se utilizó una cámara térmica HT-19 (HTI-Xintai, China) de alta resolución y precisión para medir la temperatura en cada parcela al mediodía. Se capturaron dos imágenes por parcela a 0,6 m sobre el dosel y en ángulo oblicuo (45°), en días despejados (radiación > 700 W m^2) entre las 12:00 y 15:00 h (Irmak *et al*., 2000; Taghvaeian *et al*., 2012, 2014). Las imágenes se procesaron con IRImageTools. Se seleccionaron 20 hojas por imagen evitando la inclusión de otros órganos o suelo, se calculó la media y desvío por parcela.

Se midió el potencial xilemático con cámara de presión (Scholander) y la conductancia estomática con un porómetro (SC-1, METER Group), en hojas completamente desarrolladas a media altura. Se evaluaron 2–3 hojas por parcela, seleccionadas de plantas representativas dentro del área útil, evitando bordes, entre las 12:30 y 14:30 h.

Se realizó una regresión cuadrática entre la conductancia estomática y el porcentaje de agua disponible a 0,40 m. Para el potencial xilemático y la conductancia estomática se aplicó ANOVA y prueba de Tukey ($p < 0,05$), indicando diferencias significativas entre tratamientos cuando correspondió. Los análisis se realizaron en R (R Core Team, 2024).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observó una clara distinción entre los tratamientos bajo riego y el secano (Figura 1). De manera similar a lo que se encontró en los resultados del contenido de agua del suelo (Figura 3), los tratamientos con riego al 100% de la ETc y al 50%/100% de la ETc no mostraron diferencias significativas entre sí. Este comportamiento indica que ambas estrategias de riego proporcionaron condiciones suficientemente similares para el desarrollo de las plantas en cuanto a la disponibilidad hídrica, al menos durante este periodo de evaluación. Un punto destacado fue la presencia de valores excepcionalmente altos de conductancia estomática en los tratamientos bajo riego en las fechas del 17/01 y 24/01. Estos picos pueden atribuirse a los elevados contenidos de agua en el suelo derivados del riego previo a las mediciones, lo

que probablemente favoreció la apertura estomática en esas fechas (Toro *et al*., 2019).

No se observaron diferencias notables en el potencial xilemático (ψ) entre los tres tratamientos bajo riego.

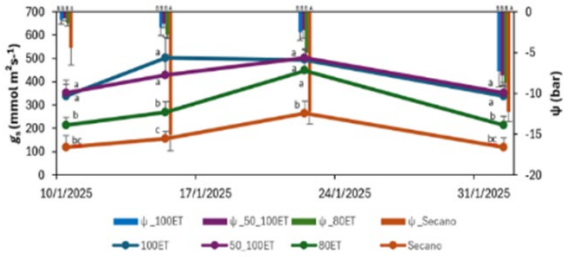


Figura 1. Conductancia estomática (gs, mmol m²s-1) y potencial xilemático (ψ, bar) en diferentes momentos del ciclo del cultivo. Las mediciones fueron hechas durante el mismo momento entre las 12:30 y 14:30 h. Letras diferentes indican diferencias significativas en la misma fecha de evaluación (p < 0,05). Se utilizaron letras mayúsculas para la variable ψ y minúsculas para la variable gs.

Esto sugiere que, a pesar de las distintas estrategias de riego, los contenidos de agua del suelo no fueron lo suficientemente variables como para generar un estrés hídrico considerable. Sin embargo, el secano mostró valores de ψ inferiores a -12 bar, indicando un estrés hídrico en la planta debido al déficit de agua en el suelo.

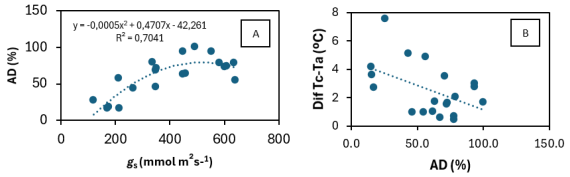


Figura 2. (a) Relación entre la conductancia estomática (gs) y el porcentaje de agua disponible en el suelo a 0,40 m (AD %); (b) evolución de la diferencia de temperatura entre el dosel y el aire (Dif Tc-Ta) en relación con el porcentaje de agua disponible en el suelo a 0,40 m (AD %). Nota: Los datos de temperatura se obtuvieron con cámara HTI.

En la Figura 2a se observó una relación cuadrática significativa ($R2$=0.7041), indicando que la gs aumenta con el contenido de agua en el suelo hasta un umbral, a partir del cual tiende a estabilizarse o disminuir. Este comportamiento sugiere un posible efecto de regulación estomática frente a condiciones de menor disponibilidad hídrica. Al analizar la Dif Tc-Ta medida con la cámara HTI, que ofrece alta precisión en la determinación de la temperatura foliar, se observa una relación inversa con el porcentaje de agua disponible en el suelo (Figura 2b). Cuando el contenido de agua en el suelo desciende por debajo del 50 %, la diferencia Tc-Ta aumenta, alcanzando valores cercanos a 5, con un máximo de 7 (Figura 2b). Cabe señalar que en esta temporada se registraron pocos datos con niveles de agua en el suelo inferiores al 50 %, lo que podría haber limitado la manifestación más clara de esta relación. DeJonge *et al*. (2015) encontraron relaciones entre los térmicos CWSI, DANS, y DACT con el contenido de agua en el suelo con un R^2 que varió entre 0,138 y 0,319.

Los índices térmicos reflejaron el régimen hídrico de los tratamientos (Figura 3a-d). Para su cálculo, se utilizaron valores promedio de temperatura del aire y del cultivo entre las 14:00 y 15:00 h, periodo en el que se evidenciaron mayores diferencias térmicas. En climas áridos y semiáridos, el período óptimo es entre las 12:00 y las 13:00 h, cuando el CWSI alcanza su valor máximo. (Irmak *et al*., 2000; Taghvaeian *et al*., 2012). El CWSI y la Dif Tc-Ta discriminaron claramente entre los tratamientos. En los tratamientos bajo riego, la transpiración mantuvo el dosel más fresco que el aire circundante, alcanzando hasta 4°C de diferencia en el tratamiento 100% ETc. En contraste, en secano, donde la transpiración se reduce por la limitación hídrica, la temperatura del dosel fue superior a la del aire, con valores positivos de Dif Tc-Ta de hasta 5°C (Figura 3a). Se observaron valores levemente negativos de CWSI en el tratamiento 100% ETc, lo que sugiere la necesidad de continuar con más años de evaluación para mejorar su ajuste. Sin embargo, DeJonge *et al*. (2015) demostraron que variaciones repentinas en la velocidad del viento pueden generar valores negativos de CWSI sin cambios en el contenido de agua del suelo. En este sentido, los índices DANS y DACT no reflejan dicha caída, lo que indica una menor sensibilidad a fluctuaciones del viento. Este resultado destaca la sensibilidad de los índices térmicos para detectar cambios en el estado hídrico del cultivo en respuesta a la disponibilidad de agua en el suelo, en concordancia con los patrones analizados previamente en las Figuras 2 a 3 y lo encontrado por Morales-Santos y Nolz (2023), DeJonge *et al*. (2015) y Taghvaeian *et al*. (2012). Algunos autores destacan que el CWSI puede presentar dificultades prácticas debido a su complejidad de cálculo y calibración (Kacira *et al*., 2002), por lo que índices como DANS, DACT, y Dif Tc-Ta podrían representar opciones más prácticas y accesibles para productores y técnicos.

Otro desafío del CWSI es que, en días extremadamente calurosos, incluso un cultivo bien irrigado puede cerrar sus estomas, elevando el índice y sugiriendo una necesidad de riego que podría no ser real. En contraste, DANS no presenta esta limitación. Además, algunos autores destacan las dificultades prácticas del uso del CWSI debido a su complejidad (Kacira *et al*., 2002), sugiriendo que los índices DANS, DACT y Dif Tc-Ta pueden ser opciones más prácticas para productores y técnicos. Finalmente, en nuestro estudio, el índice DANS permitió diferenciar levemente entre los tratamientos bajo riego, mientras que el DACT no mostró esta capacidad (Figura 2c y d). No obstante, ambos índices fueron eficaces para distinguir entre los tratamientos bajo riego y el secano, lo que indica su potencial en condiciones de clima templado.

4. CONCLUSIONES

Los índices térmicos permitieron diferenciar claramente entre el cultivo bajo riego y en secano, confirmando su utilidad para detectar el estrés hídrico en soja en clima templado. Sin embargo, DANS y DACT mostraron menor sensibilidad para discriminar entre tratamientos irrigados, lo que sugiere la necesidad de evaluar estos índices bajo un mayor rango de niveles de estrés hídrico. En conjunto, los resultados demuestran el potencial de

la termometría infrarroja como herramienta para el monitoreo del estado hídrico y la programación del riego en clima templado. No obstante, se requieren evaluaciones adicionales en múltiples temporadas para mejorar la precisión y robustez de estos índices en condiciones climáticas variables.

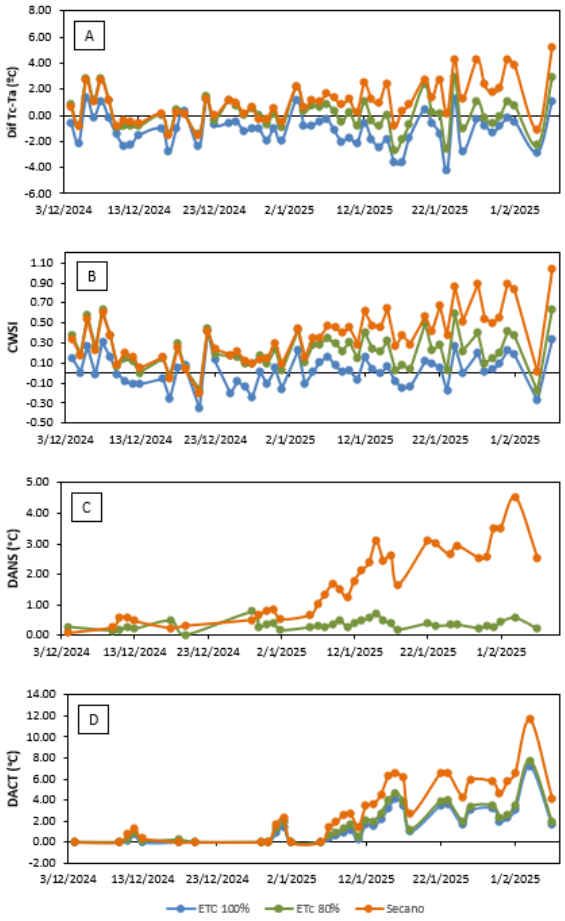


Figura 3. Evolución de: (a) la diferencia de temperatura entre el dosel y el aire (Dif Tc-Ta), (b) el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), (c) los grados por encima de un cultivo sin estrés hídrico (DANS), (d) los grados por encima de un umbral (28ºC) (DACT), durante el ciclo 2024-2025.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Álvaro Otero por su apoyo y orientación, cuyos consejos fueron clave para el desarrollo de este trabajo.

6. REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO.

Burke, J. J. (1996). Personal communication to S. R. Evett from the USDA-ARS, Crop Stress Research Laboratory, Lubbock, TX.

DeJonge, K. C., Taghvaeian, S., Trout, T. J., & Comas, L. H. (2015). Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural Water Management, 156*, 51–62.

Hsiao, T. C. (1973). Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology, 24*(1), 519–570.

Idso, S. B. (1982). Non-water-stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology, 27*, 59–70.

Irmak, S., Haman, D. Z., & Bastug, R. (2000). Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal, 92*(6), 1221–1227.

Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research, 17*(4). https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133

Jones, H. G. (2018). Thermal imaging and infrared sensing in plant ecophysiology. *In Advances in plant ecophysiology techniques* (pp. 135–151).

Kacira, M., Ling, P. P., & Short, T. H. (2002). Establishing crop water stress index (CWSI) threshold values for early, non-contact detection of plant water stress. *Transactions of the ASAE, 45*(3), 775–780.

Kramer, P. J., & Tejada, L. (1974). Relaciones hídricas de suelo y plantas: Una síntesis moderna. CRAT.

Morales, P. M., Blanco, A. B., Prechac, F. G., Gallareta, C. G., & Benito, J. M. T. (2022). Avaliação do desenho e funcionamento dos pivôs centrais instalados no Uruguai. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, 5*(1), 279–294.

Otero, A., & García, C. (2024). Simposio sobre riego: Sensoramiento remoto y manejo eficiente del agua en los sistemas productivos agrícolas (6–7 de marzo de 2024). INIA La Estanzuela, Colonia, Uruguay.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua (Estudio FAO Riego y Drenaje No. 66). FAO.

Taghvaeian, S., Chávez, J. L., & Hansen, N. C. (2012). Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in Northeastern Colorado. *Remote Sensing, 4*(11), 3619–3637.

Taghvaeian, S., Comas, L. H., DeJonge, K. C., & Trout, T. J. (2014). Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower. *Agricultural Water Management, 144*, 69–80.

Toro, G., Flexas, J., & Escalona, J. M. (2019). Contrasting leaf porometer and infra-red gas analyser methodologies: An old paradigm about the stomatal conductance measurement. *Theoretical and Experimental Plant Physiology, 31*, 483–492. https://doi.org/10.1007/s40626-019-00161-x

Zhang, L., Zhang, H., Zhu, Q., & Niu, Y. (2023). Further investigating the performance of crop water stress index for maize from baseline fluctuation, effects of environmental factors, and variation of critical value. Agricultural *Water Management, 285,* 108349.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.178

Productos de teledetección empleados en la gestión de regadíos modernizados en León

Sanchez Hernández, Blanca [1] **Fernández Pesado, Pedro Javier** [2] **Calero Gil, Rodrigo** [3] **Gonzalez-Dugo, Maria P.** [4]

[1] Depto. Teledeteccion,Tragsatec, España

[2] Gerencia León,Tragsa, España

[3] Depto. de Planif. Y Transferencia Tec., Tragsa

[4] Área de Ing. y Tec. Agroalimentaria, IFAPA

ORCID: Sanchez Hernandez 0009-0001-4424-9794 Calero Gil 0009-0006-5247-930X Gonzalez-Dugo 0000-0003-0423-8246

Correspondencia: bsh@tragsa.es pfernand@tragsa.es rcalero@tragsa.es mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es

RESUMEN

Se ha desarrollado un conjunto de productos y servicios para ofrecer información distribuida y periódica derivada de imágenes de satélite de libre acceso. El objetivo es apoyar la toma de decisiones en la agricultura de regadío, tanto de los gestores, en este caso, el equipo de Tragsa en León, encargado de la gestión de diversas zonas regables en la provincia, como de los agricultores. El visor desarrollado proporciona información periódica y distribuida en tres niveles: necesidades hídricas, rendimiento y fertilización. Además, se ofrece información general sobre el estado del cultivo y su fenología, y alertas ante desviaciones considerables respecto de los valores medios en la zona.

Palabras clave: *necesidades hídricas, modelos de biomasa, ciclo fenológico de cultivos, índices nitrogenados y datos hiperespectrales*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Productos de teledetección empleados en la gestión de regadíos modernizados en León

Sanchez Hernandez, Blanca [1], Fernandez Pesado, Pedro Javier [2], Calero Gil, Rodrigo [3], Gonzalez-Dugo, Maria P. [4]

[1] Depto. Teledeteccion, Tragsatec, España.
0009-0001-4424-9794, bsh@tragsa.es

[2] Gerencia León, Tragsa, España.
0000-0000-0000-0001, pfernand@tragsa.es

[3] Depto. de Planif. Y Transferencia Tec., Tragsa.
0009-0006-5247-930X, rcalero@tragsa.es

[4] Área de Ing. y Tec. Agroalimentaria, IFAPA.
0000-0003-0423-8246, mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es

Resumen: Se ha desarrollado un conjunto de productos y servicios para ofrecer información distribuida y periódica derivada de imágenes de satélite de libre acceso. El objetivo es apoyar la toma de decisiones en la agricultura de regadío, tanto de los gestores, en este caso, el equipo de Tragsa en León, encargado de la gestión de diversas zonas regables en la provincia, como de los agricultores. El visor desarrollado proporciona información periódica y distribuida en tres niveles: necesidades hídricas, rendimiento y fertilización. Además, se ofrece información general sobre el estado del cultivo y su fenología, y alertas ante desviaciones considerables respecto de los valores medios en la zona.

Palabras clave: necesidades hídricas, modelos de biomasa, ciclo fenológico de cultivos, índices nitrogenados y datos hiperespectrales

REMOTE SENSING PRODUCTS USED IN THE MANAGEMENT OF MODERNIZED IRRIGATION SYSTEMS IN LEÓN

***Abstract**: This document outlines a range of products and services designed to deliver periodic information derived from freely accessible satellite imagery. The goal is to support decision-making in irrigated agriculture, for irrigation district managers, in this case, the Tragsa team in León, responsible for managing various irrigated areas in the province, and for farmers. The developed viewer provides periodic, distributed information across three levels: water needs, performance, and fertilization. Furthermore, general information on crop growth and phenology, along with alerts for significant deviations from the region's average, is also provided.*

***Keywords**: water needs, biomass models, crop phenological cycle, nitrogen indices, hyperspectral data*

1. INTRODUCCIÓN

Desde 2018 se viene desarrollando una colaboración, dentro del marco de actuaciones I+D+i del Grupo TRAGSA, entre IFAPA (Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria y Pesquera), el departamento de Teledetección de Tragsatec y la oficina de TRAGSA León encargada de la gestión de diversas zonas de regadío de la provincia. El objetivo de esta colaboración es desarrollar y poner a disposición de los usuarios un conjunto de productos obtenidos a partir de datos de teledetección para mejorar la gestión de los cultivos extensivos en regadío de la zona. Esta información se distribuye mediante un visor desarrollado para el regadío denominado VISOREG. Los productos se enfocan hacia tres actividades:

- 1. Mejora de la eficiencia en el uso del agua mediante la estimación de la evapotranspiración real a partir de índices de vegetación e información meteorológica.
- 2. Estimación de producciones potenciales y rendimientos en distintos tipos de cultivo mediante modelos de biomasa basados en la eficiencia en el uso de la luz.
- 3. Determinación de mapas de necesidades de fertilización y su planificación durante el desarrollo de los cultivos mediante el uso de índices nitrogenados basados en datos del satélite Sentinel-2 (S2) y de nuevos satélites hiperespectrales.

La zona de trabajo incluye inicialmente las comunidades de regantes (CCRR) de Porma, Páramo y Payuelos

(Figura 1), aunque actualmente su actividad se ha ampliado a nuevas zonas. La superficie de riego estudiada abarca aproximadamente 70.000 ha.

El artículo describe la sinergia que se produce entre las partes implicadas en el proyecto: IFAPA como asesor científico-técnico, el departamento de Teledetección en la parte productiva y Tragsa León que proporciona los datos de campo necesarios y está en contacto con la realidad del terreno y los regantes.

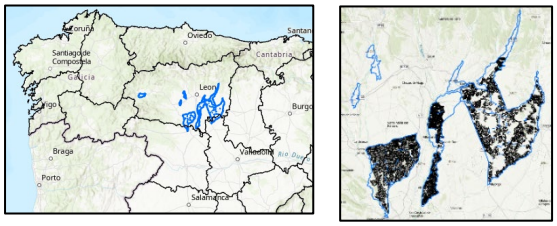


Figura 1. Contorno en azul de las comunidades de regantes gestionadas por Tragsa León y parcelario

2. PRODUCTOS DESARROLLADOS

2.1. Estimación de necesidades hídricas mediante el cálculo de coeficiente de cultivo (Kc)

Entre 2019 y 2021 se evaluaron diversos modelos de cálculo de la evapotranspiración (ET) a partir de imágenes de satélite para estimar las necesidades hídricas de los cultivos de la zona: el modelo NDVI simplificado y el modelo SAVI desarrollado en MinarET (Mateos et al., 2013). Como resultado de la evaluación, se seleccionó el método NDVI simplificado por su mayor facilidad de aplicación, aunque las necesidades hídricas obtenidas con ambos modelos, en comparación con los datos de riego de la zona, resultaron ser similares.

El modelo elegido emplea la metodología FAO-56 para estimar la evapotranspiración de los cultivos (ETc) en función de la evapotranspiración de referencia (ETo) y de un coeficiente de cultivo único (Kc), estimado a partir de una serie temporal de NDVI derivada de imágenes de satélite de Sentinel-2 (Calera et al., 2016). Estas imágenes ofrecen información regular y con suficiente resolución espacial sobre el crecimiento de los cultivos, lo que permite estimar el Kc y las necesidades hídricas, combinando datos meteorológicos de precipitaciones provenientes de la red Siar y estaciones locales en el cálculo.

Entre 2022 y 2025, se aplicó este método en la zona de estudio para estimar el consumo de agua de los cultivos y proporcionar recomendaciones de riego específicas para cada parcela (Figura 2).

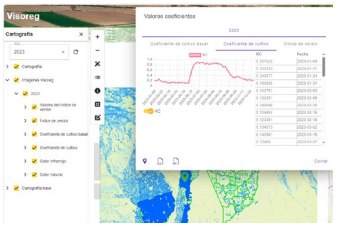


Figura 2. Ejemplo de consulta del coeficiente de cultivo (Kc) para una parcela de la CCRR de la Margen Izquierda del Porma a través de la herramienta Visoreg.

2.1.1 Validación de resultados

La experiencia de los agricultores indicaba que las necesidades calculadas eran inferiores a las reales en algún periodo fenológico (por ejemplo, durante el pleno desarrollo del cultivo de maíz a lo largo del mes de junio). Por ello, para validar las estimaciones se emplearon 10 *sondas Drip and Droll* de la empresa Sentek (Australia) con sensores instalados en los primeros 60 cm del perfil del suelo. Al inicio de la campaña de riego, se instalaron cinco sondas en parcelas de trigo y otras cinco en parcelas de maíz (Fig. 3). Estas sondas recopilaron datos durante toda la campaña de riego (de abril a octubre), lo que ha permitido evaluar el funcionamiento del riego en dichas parcelas y ajustar los modelos de estimación de ET.



Figura 3. Localización de las sondas de humedad instaladas en parcelas de trigo y maíz sobre el parcelario de la comunidad de regantes.

Para el análisis, se calculó el balance completo de agua en el suelo siguiendo el modelo de FAO-56 en las 10 parcelas partiendo de datos de teledetección, datos meteorológicos y los riegos de la campaña y se comparó con las medidas reales de humedad en el suelo proporcionadas por las sondas

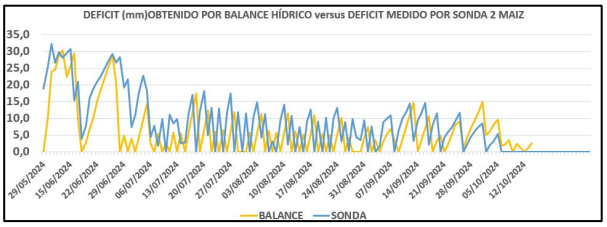


Figura 4. Comparación del déficit hídrico en la zona radicular, medido con sondas con el obtenido en el balance hídrico de la parcela 2 de maíz.

Los resultados de la comparación han reflejado una problemática diversa. En dos parcelas de maíz y una parcela de trigo los valores de déficit calculados por los dos métodos se ajustan durante todo el ciclo de cultivo, en el resto solo hay acuerdo en periodos concretos, con largos intervalos en los que la magnitud de los cambios en el contenido de agua del suelo no coincide entre el modelo y la sonda. Las razones de este desajuste parecen deberse a problemas en la instalación de las sondas, dificultad frecuente en este tipo de sensores y a la alta variabilidad intraparcelaria del suelo. Por ello, se va a continuar con la medición de humedad con sondas en la campaña 2026, instalando dos sondas por parcela para tener datos redundantes, y comprobando las

lecturas iniciales de las sondas con medidas directas de la humedad del suelo usando gravimetría.

Hasta el momento, el análisis de los resultados de la aplicación del modelo de ET ha permitido identificar etapas fenológicas en las que el modelo presenta un ajuste más pobre. Para solucionar este problema se ha propuesto el uso de parámetros para el cálculo del coeficiente de cultivo diferentes en función de la fase fenológica y el desarrollo de una metodología para identificar estas fases usando la información proporcionada por las imágenes de S2.

El seguimiento fenológico de los cultivos se inició en la campaña 2023 en las parcelas de trigo y maíz de las zonas de Porma, Payuelos y Páramo. Analizando la evolución del NDVI y segmentando por puntos de inflexión, se obtuvieron fechas clave fenológicas y grados-día acumulados desde el inicio del cultivo en cada recinto. En un primer momento se trabajó con un amplio número de etapas fenológicas, posteriormente, se limitaron a las fenofases habitualmente incluidas en los estudios de fenología terrestre mediante series temporales de imágenes de satélite. Se propuso la extracción de tres fenométricas concretas: inicio del ciclo (Fecha de siembra), final del ciclo (Fecha de cosecha) y duración del ciclo, que se presentan en la figura 5.

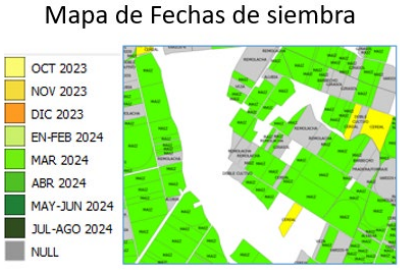


Figura 5. Ejemplo de mapas de fenofases obtenidos para la zona de estudio

Actualmente, el producto de seguimiento fenológico se encuentra en fase de validación con datos de campo.

2.2. Estimación del rendimiento de los cultivos

Se han evaluado dos modelos diferentes para estimar la biomasa producida:

1. Modelo basado en la eficiencia de uso de la luz (LUE). En este modelo la biomasa se estima en función de la radiación diaria absorbida (APAR) desde inicio de crecimiento del cultivo a fecha de maduración:

   Biomasa = ∫ LUE * APAR d(t) (1)

2. Modelo basado en la eficiencia del uso del agua (WUE). La biomasa se estima en función al agua transpirada por la planta (Tc):

   Biomasa = ∫ WUE * Tc d(t) (2)

Ambos utilizan como datos de entrada series temporales de S2 y sus índices derivados (NDVI). El resultado de la aplicación de los modelos proporciona la biomasa acumulada durante el ciclo de crecimiento-maduración del cultivo.

A continuación, rendimiento se obtiene multiplicando la biomasa por un coeficiente (IC: Índice de cosecha):

Rdto. (Kg grano/ha) = Biomasa (Kg MS/ha) * IC (3)

El IC se ha inferido de la relación entre datos de cosecha aportados por cosechadoras de 176 parcelas de la zona y la biomasa calculada con el modelo para esas parcelas. Tiene un valor de 0,35 en el caso del trigo y 0,39 en el maíz.

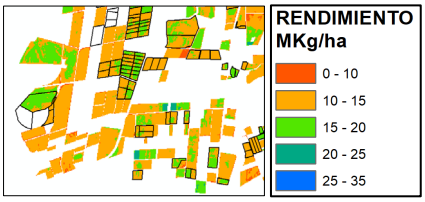


Figura 6. Rendimiento Maíz campaña 2024 (Mkg/ha)

El modelo de rendimiento basado en la eficiencia del uso de la luz para trigo y maíz fue seleccionado por ofrecer una mejor correlación con los datos de cosechadoras de precisión disponibles. La comparativa se hizo con datos a nivel de pixel y de parcela. La gráfica de correlación a nivel de parcela se muestra en la figura 7.

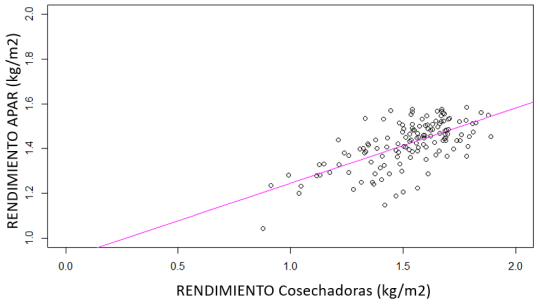


Figura 7. Comparación de estimaciones de modelo LUE con las observaciones derivadas de cosechadoras a nivel de parcelas

Los coeficientes de correlación se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de correlación entre rdto. de modelo/ rdto. real

Pearson	Spearman	TAU Kendall	R2
0,65	0,6	0,42	0,42

Muestran un ajuste moderado que permite que se pueda trabajar con mapas de variabilidad rendimientos de la zona pero no son suficientemente precisos para estimaciones absolutas exactas.

Dentro de este apartado, también se ha desarrollado un segundo producto de alerta sobre la previsión de bajos rendimientos para el maíz en fechas clave (final de junio y de julio) que permiten mejoras en la gestión del cultivo. Se agrupan las parcelas de las que se dispone de datos de campo en tres categorías según su rendimiento (alto/medio/bajo) y para cada pixel se compara la relación de grados-día acumulados y evolución del índice vegetativo del cultivo (NDVI) con las medias obtenidas para estas categorías.

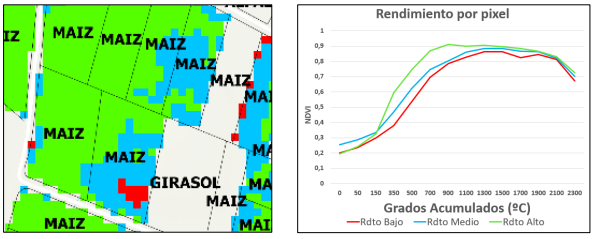


Figura 8. Producto de alerta de previsión de bajos rendimientos

2.3. Información para manejo de fertilización basada en índices nitrogenados

Se ha evaluado la relación del Índice de Diferencia Normalizada usando la banda verde (GNDVI) y de la propia banda del verde de S2, con datos de fertilización, pero dada la escasa información de campo disponible sobre fertilización a escala de parcela en la zona de trabajo, de momento los resultados no resultan concluyentes. Por ello, se ha optado por utilizar los mapas de rendimiento calculados en el apartado anterior para ajustar las recomendaciones de fertilización nitrogenada de forma operativa mientras se alcance el objetivo de obtener índices con resultados contrastados en el tema de fertilización.



Figura 9. Parcelas con datos de fertilización 23-24

Con la zonificación obtenida a partir del rendimiento estimado en el apartado 2.2 se han derivado los requerimientos de fertilizante usando datos de varias campañas. Esto permitiría a los agricultores que hacen agricultura de precisión aplicar una fertilización nitrogenada de dosis variable para optimizar el aprovechamiento del fertilizante.

Como alternativa a la información obtenida a través de S2, se ha comenzado a explorar opciones de uso de datos de nuevos satélites, con el objetivo de obtener índices, productos o aplicaciones que aporten mayor fiabilidad sobre el contenido de nitrógeno en hoja. Para ello, se ha evaluado el uso de dos satélites hiperespectrales actualmente disponibles: ENMAP (*Environmental Mapping and Analysis Program*) y PRISMA (*Hyperspectral Precursor of the Application Mission*). Ambos satélites ofrecen información hiperespectral en las regiones del VNIR y del SWIR, con una resolución espacial de 30 metros, una escala adecuada para el seguimiento de cultivos extensivos en parcelas de tamaño medio. La principal dificultad para el uso de estas imágenes es su escasa disponibilidad en la zona, especialmente teniendo en cuenta los requisitos de resolución temporal que esta aplicación requeriría. De forma exploratoria, se han usado datos de ENMAP para seguimiento de la variación del borde del rojo (REIP: Red Edge Inflection Point):

$$REIP = 700 + 40\ ((R_{670}+R_{780})/2-R_{700}))/(R_{740}-R_{700}) \quad (4)$$

siendo R la reflectancia en las diferentes longitudes de onda indicadas por los subíndices.

La variación del REIP muestra teóricamente un distinto comportamiento según el estado nutricional del cultivo del maíz, como se muestra en la Figura 10. Actualmente se está pendiente de tener mayor disponibilidad de datos de satélite en la zona para aplicar este procedimiento a la fertilización del maíz.

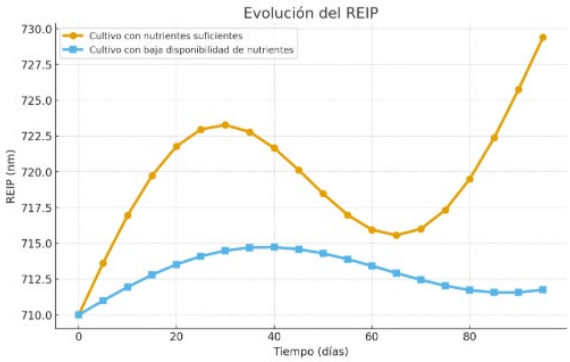


Figura 10. Variación del punto de inflexión del red Edge en cultivos de maíz con diferente nivel de nutrientes

3. REFERENCIAS

Basso B., C. Fiorentino, D. Cammarano, U. Schulthess, Variable rate nitrogen fertilizer response in wheat using remote sensing. 2015, Springer. *Vol. 17. Precision Agriculture.*

Calera A, I. Campos, J. Garrido. Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales. CENTER. 2016

Eklundh, L., Jönson, P. TIMESAT: A Software Package for Time-Series Processing and Assessment of Vegetation Dynamics. *Comp Science.* 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15967-6_7

Gabriel JL , Pablo J. Zarco-Tejada , P. Juan Lopez-Herrera ,Enrique Perez-Martın , Maria Alonso-Ayuso , Miguel Quemada, 2017. Airborne and ground level sensors for monitoring nitrogen status in a maize crop. *Biosyst Eng. Volume 160*. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.003

Gao F, X Zhang, Mapping Crop Phenology in Near Real-Time Using Satellite Remote Sensing: Challenges and Opportunities. *J. Rem Sens V. 2021* https://doi.org/10.34133/2021/8379391

Kuenzer, C., Dech, S., Wagner, W. (eds) Remote Sensing Time Series. *Remote Sensing and Digital Image Processing, 2015, vol 22*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15967-6_7.

L. Mateos, González-Dugo M.P, S. Escuin, F. Cano, V. Cifuentes, F.L.M. Padilla, J.L. Tirado, N. Oyonarte, P. Fernandez, Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. II. Application on basin scale. *Agric Water Manage. Volume 125*, July 2013. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.03.024

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.203

Evaluación comparativa de EnMAP y Sentinel-2 para la estimación de rasgos biofísicos en los cultivos de arroz del Bajo Guadalquivir

Arlanzón, Daniel [1] **Rodríguez-Galiano, Víctor** [1] **Canero, Francisco M.** [1] **Cárdenas-Martínez, Aarón** [1]

[1] Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla, 41004 Sevilla, España

ORCID: Arlanzón 0000-0001-5305-8415 Rodríguez-Galiano 0000-0002-5422-8305 Canero 0000-0002-7813-1487 Cárdenas-Martínez 0000-0003-1649-7720

Correspondencia: darlanzon@us.es vrgaliano@us.es fcanero@us.es acardenasm@us.es

RESUMEN

Las nuevas misiones hiperespectrales permiten identificar rasgos de absorción sutiles esenciales para el monitoreo agrícola avanzado. Este estudio compara la capacidad del sensor hiperespectral EnMAP y el multiespectral Sentinel-2 en la estimación de rasgos biofísicos en el cultivo de arroz del Bajo Guadalquivir. Se empleó un enfoque híbrido basado en PROSAIL-PRO y algoritmos de Machine Learning (ML), optimizados mediante Active Learning (AL) para mitigar la redundancia espectral. Los resultados demuestran la mayor capacidad de EnMAP en la caracterización bioquímica foliar, alcanzando valores de R2 de 0,93 para carotenoides (CAR) y de 0,92 para nitrógeno foliar (LNC). En comparación, Sentinel-2 mostró correlaciones más moderadas, con R2 inferiores a 0,90 en todos los rasgos y limitaciones críticas en parámetros estructurales como el índice de área foliar (LAI) y la clorofila a nivel de dosel (CCC). Esta diferencia sugiere que la resolución espectral de EnMAP es clave para diferenciar las señales bioquímicas y la estructura del dosel. La eficacia de la tecnología hiperespectral frente a la multiespectral sienta las bases para que la misión europea CHIME se consolide como una herramienta esencial para la toma de decisiones en el sector agrario.

Palabras clave: *EnMAP, rasgos biofísicos, arrozales, Machine Learning, agricultura*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación comparativa de EnMAP y Sentinel-2 para la estimación de rasgos biofísicos en los cultivos de arroz del Bajo Guadalquivir

Arlanzón, Daniel [(1)], Rodríguez-Galiano, Víctor [(1)], Canero, Francisco M. [(1)], Cárdenas-Martínez, Aarón [(1)]

[(1)] Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla Sevilla, España.

0000-0001-5305-8415, darlanzon@us.es ; 0000-0002-5422-8305, vrgaliano@us.es

0000-0002-7813-1487, fcanero@us.es ; 0000-0003-1649-7720, acardenasm@us.es

Resumen: Las nuevas misiones hiperespectrales permiten identificar rasgos de absorción sutiles esenciales para el monitoreo agrícola avanzado. Este estudio compara la capacidad del sensor hiperespectral EnMAP y el multiespectral Sentinel-2 en la estimación de rasgos biofísicos en el cultivo de arroz del Bajo Guadalquivir. Se empleó un enfoque híbrido basado en PROSAIL-PRO y algoritmos de *Machine Learning* (ML), optimizados mediante *Active Learning* (AL) para mitigar la redundancia espectral. Los resultados demuestran la mayor capacidad de EnMAP en la caracterización bioquímica foliar, alcanzando valores de R^2 de 0,93 para carotenoides (CAR) y de 0,92 para nitrógeno foliar (LNC). En comparación, Sentinel-2 mostró correlaciones más moderadas, con R^2 inferiores a 0,90 en todos los rasgos y limitaciones críticas en parámetros estructurales como el índice de área foliar (LAI) y la clorofila a nivel de dosel (CCC). Esta diferencia sugiere que la resolución espectral de EnMAP es clave para diferenciar las señales bioquímicas y la estructura del dosel. La eficacia de la tecnología hiperespectral frente a la multiespectral sienta las bases para que la misión europea CHIME se consolide como una herramienta esencial para la toma de decisiones en el sector agrario.

Palabras clave: EnMAP, rasgos biofísicos, arrozales, Machine Learning, agricultura

A comparative assessment of EnMAP and Sentinel-2 for the retrieval of biophysical traits in the rice crops of the Lower Guadalquivir region

Abstract: *New hyperspectral missions enable the identification of subtle absorption features essential for advanced agricultural monitoring. This study compares the performance of the EnMAP hyperspectral and Sentinel-2 multispectral sensors in estimating biophysical traits in rice crops in the Lower Guadalquivir region. A hybrid approach based on PROSAIL-PRO and Machine Learning (ML) algorithms was employed, optimized through Active Learning (AL) to mitigate spectral redundancy. The results demonstrate the superior capacity of EnMAP for leaf biochemical characterization, achieving R^2 values of 0.93 for carotenoids (CAR) and 0.92 for leaf nitrogen content (LNC). In comparison, Sentinel-2 showed more moderate correlations, with R^2 values below 0.90 across all traits and critical limitations in structural parameters such as Leaf Area Index (LAI) and canopy chlorophyll content (CCC). This difference suggests that EnMAP's spectral resolution is key to distinguishing biochemical signals from canopy structure. The efficacy of hyperspectral technology over multispectral alternatives sets the stage for the European CHIME mission to become a key tool for decision-making in the agricultural sector.*

Keywords*: EnMAP, biophysical traits, rice paddies, Machine Learning, agriculture*

1. INTRODUCCIÓN

La alta resolución de los sensores hiperespectrales (400–2.500 nm) posibilita la identificación de rasgos de absorción sutiles que son inaccesibles para los sensores multiespectrales de bandas discretas (Lu *et al*., 2020). Mientras que misiones como Sentinel-2 han estandarizado el uso de bandas en el infrarrojo cercano y de onda corta para el monitoreo agrícola, las misiones italiana PRISMA y alemana EnMAP ofrecen una resolución espectral superior a 200 bandas que permite una discriminación más precisa de rasgos bioquímicos y estructurales, sentando además las bases operativas para la futura misión CHIME (Nieke & Rast, 2018). Evaluar la sinergia y el valor añadido de estas plataformas hiperespectrales frente a los estándares

multiespectrales es hoy una prioridad para la teledetección avanzada aplicada a la agricultura.

Este avance tecnológico es crucial para el monitoreo de cultivos como el arroz (*Oryza sativa* L.), piedra angular de la seguridad alimentaria global y fuente calórica primaria para más de la mitad de la población mundial. Se estima que la producción global de este cereal deberá crecer hasta alcanzar los 598 millones de toneladas en 2034 para satisfacer la demanda creciente (OECD/FAO, 2025). En España, las marismas del Bajo Guadalquivir representan un agroecosistema estratégico para su producción. No obstante, estas áreas son especialmente vulnerables al cambio climático y a eventos extremos como las sequías. En este escenario, un monitoreo preciso y oportuno del estado del cultivo es esencial para optimizar las prácticas de manejo y asegurar la estabilidad del rendimiento.

La caracterización de rasgos biofísicos permite evaluar el estado fisiológico del arroz de manera integral. A nivel foliar, el contenido de clorofila (LCC) y carotenoides (CAR) son indicadores clave de la capacidad fotosintética y los mecanismos de fotoprotección (Sims & Gamon, 2002). El nitrógeno foliar (LNC) es un *proxy* fundamental de la capacidad metabólica y el estado nutricional; su estimación a través de proteínas es una de las vías más prometedoras mediante sensores hiperespectrales (Berger *et al*., 2020). Por su parte, el contenido en agua (LWC) informa sobre el estado hídrico, posibilitando abordar una mejor gestión del agua. Finalmente, el índice de área foliar (LAI) es el parámetro estructural necesario para el escalado de estas propiedades al nivel de dosel, particularmente la clorofila (CCC) y el nitrógeno (CNC), de especial interés agronómico (Jay *et al*., 2017).

Los enfoques híbridos han sido aplicados con éxito en la estimación de los rasgos de cultivo, combinando la base física de los modelos de transferencia radiativa (RTM) con la eficiencia de los algoritmos de *Machine Learning* (Verrelst *et al*., 2019). Para gestionar la redundancia espectral de las más de 200 bandas de los sensores hiperespectrales, se han empleado técnicas de muestreo inteligente como el *Active Learning* (AL), que optimiza el entrenamiento de los modelos centrándose en las características espectrales más representativas (Berger *et al*., 2021).

Este estudio evalúa y compara el rendimiento de Sentinel-2 y EnMAP para la estimación de rasgos biofísicos mencionados en el cultivo de arroz. Para ello, se analiza la capacidad predictiva de los siguientes algoritmos: regresión por procesos gaussianos (*Gaussian Process Regression,* GPR), *Random Forest* (RF), redes neuronales (*Neural Networks*, NN), regresión de vectores de soporte (*Support Vector Regression,* SVR) y regresión por mínimos cuadrados parciales (*Partial Least Squares Regression,* PLSR). Los objetivos específicos son: (i) analizar la capacidad de ambos sensores en la estimación de cada rasgo; y (ii) evaluar la coherencia espacial de los productos generados, analizando la capacidad de ambas plataformas para capturar la variabilidad del cultivo en la región arrocera.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La zona de estudio se localiza en las marismas del Guadalquivir (Sevilla), una llanura de sedimentos cuaternarios de gran importancia ecológica y agrícola, al ser la principal zona productora de arroz de España. El área presenta un clima mediterráneo con veranos secos y cielos despejados, ideales para la teledetección óptica. No obstante, el periodo 2023-2025 ha estado marcado por una fuerte variabilidad hidrológica: desde una sequía extrema en 2023, donde apenas se sembró el 2,5% de la superficie (debido a la incursión de agua salina por el bajo caudal del río), hasta la recuperación total de la disponibilidad hídrica en 2025, con el 99% del área cultivada (Fig. 1). Esta fluctuación nos permitió muestrear una variada gama de estados vegetativos y condiciones de estrés hídrico y salino.

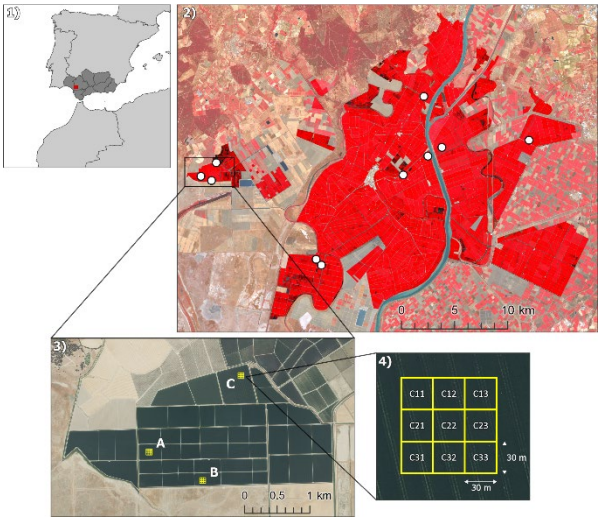


Figura 1. (1) Localización del área de estudio; (2) composición a falso color de Sentinel-2 de los arrozales en verano de 2025 y parcelas de muestreo; (3) detalle de la finca Hato Blanco; y (4) ESUs de la parcela C.

2.2. Datos

Durante los veranos de 2023 y 2024, se obtuvieron imágenes hiperespectrales de la misión EnMAP del Centro Aeroespacial Alemán (DLR), con 30 m de resolución espacial. Tras eliminar las bandas ruidosas y de absorción de vapor de agua atmosférico, se utilizaron las 191 bandas restantes de EnMAP. Todas las imágenes fueron adquiridas georreferenciadas y en reflectancia de superficie. Simultáneamente, se adquirieron imágenes multiespectrales de Sentinel-2, seleccionando las 10 bandas de 10 y 20 m de resolución espacial.

Para la validación de los productos, se realizaron campañas de campo durante las campañas agrícolas de 2023, 2024 y 2025, sincronizando el muestreo con las fechas de adquisición de ambos sensores. Se definieron unidades de muestreo elementales (*Elementary Sampling Unit*, ESU) de 30×30 m, coincidentes con el píxel hiperespectral. A nivel foliar, se determinó LCC y CAR mediante extracción bioquímica y espectrofotometría (2023-24) y mediante regresión con medidas de SPAD (*Soil and Plant Analysis Development*) *in situ*

(2025). LNC se obtuvo por el método Dumas y LWC por diferencia de peso fresco y seco. Para poder trabajar con variables a nivel de dosel, se midió LAI con un analizador LAI-2200C.

2.3. Métodos

La metodología empleada se basa en un enfoque híbrido que combina RTM y algoritmos de ML. Para el modelado se utilizó PROSAIL-PRO, que acopla el modelo PROSPECT-PRO de hoja y 4SAIL de dosel (Jacquemoud *et al*., 2009). Este permite obtener directamente el contenido de nitrógeno al distinguir entre proteínas (C_p) y constituyentes basados en carbono (CBC). Para el entrenamiento, se generó una *Look-Up Table* (LUT) de 2.000 espectros de reflectancia simulada. Este tamaño se definió como un compromiso óptimo entre la eficiencia computacional y la representatividad de la variabilidad de los rasgos, siendo un volumen habitual en la literatura para enfoques híbridos (Féret *et al*., 2021, Tagliabue *et al*., 2022). Los parámetros de entrada —rangos y distribuciones— se ajustaron a partir de dicha bibliografía y de los valores observados en las campañas de campo de 2023-2024.

Para gestionar la redundancia espectral y evitar combinaciones de parámetros poco realistas, se aplicaron técnicas de AL para cada rasgo biofísico. Se entrenó un modelo de GPR partiendo del 2% de la LUT, al que se añadieron muestras de forma iterativa (Estévez *et al*., 2022). Cada muestra se mantuvo únicamente si su incorporación reducía el error cuadrático medio (RMSE) frente a los datos de campo. Complementariamente, en los modelos hiperespectrales se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA) para mitigar la colinealidad de sus 191 bandas espectrales, mientras que para Sentinel-2 se emplearon las 10 bandas. La vinculación con el dato de campo se realizó promediando los píxeles de Sentinel-2 contenidos en cada ESU mediante el vecino más próximo.

A partir del conjunto de muestras más representativas, se entrenaron cinco algoritmos: GPR, RF, NN, SVR y PLSR. La exactitud se evaluó mediante un test independiente con las mediciones de campo de 2023 y 2024 y sus espectros asociados de EnMAP y Sentinel-2. Finalmente, se realizó la estimación espacial de cada rasgo con imágenes satélite de agosto de 2024, cuando se cultivó el 67% de la superficie arrocera. Se mantuvieron las resoluciones nativas de cada sensor en la predicción espacial.

3. RESULTADOS

El análisis comparativo mostró un mejor ajuste estadístico de los modelos basados en EnMAP frente a Sentinel-2 (Fig. 2). Con EnMAP, todos los rasgos alcanzaron un R^2 superior a 0,60 en sus mejores modelos por rasgo, destacando especialmente el CAR (R^2 = 0,93) y el LNC (R^2 = 0,92) mediante GPR, así como el LWC con NN (R^2 = 0,90) y el LCC con SVR (R^2 = 0,87). Los rasgos dependientes de la estructura, como el LAI (R^2 = 0,71), el CNC (R^2 = 0,69) y el CCC (R^2 = 0,64), mostraron un ajuste moderado, posiblemente debido a la complejidad de la medición de LAI en campo.

En contraste, Sentinel-2 presentó exactitudes inferiores en CAR (PLSR, R^2 = 0,60) y algo más cercanas a EnMAP en LNC (R^2 = 0,87) y LAI (R^2 = 0,67), ambas con GPR. Además, mostró limitaciones críticas en la estimación de CCC, donde el mejor algoritmo fue NN con R^2 = 0,20. Esta diferencia subraya que la mayor resolución espectral de EnMAP es determinante para desacoplar las señales bioquímicas de la estructura del dosel. La capacidad de ambas misiones para capturar la variabilidad fenológica y nutricional de la zona se detalla en la Figura 3, donde se comparan las predicciones espaciales de una selección de rasgos biofísicos.

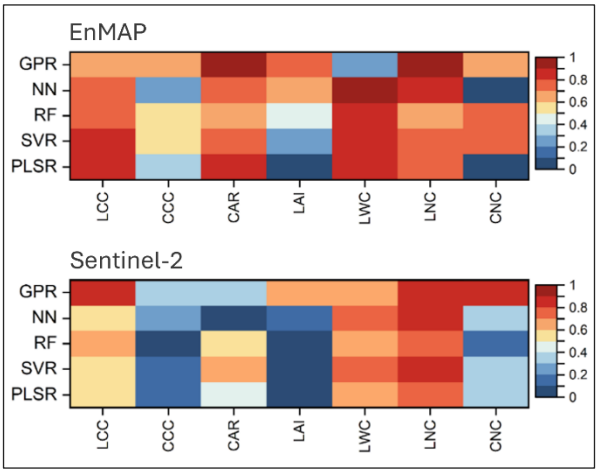


Figura 2. Mapa de calor del ajuste (R^2) de los modelos según sensor, algoritmo y rasgo biofísico.

4. CONCLUSIONES

Este estudio evidencia el mayor potencial de la misión EnMAP frente a Sentinel-2 para el monitoreo biofísico del arroz en el Bajo Guadalquivir. La metodología híbrida, basada en el modelo físico PROSAIL-PRO y optimizada mediante AL, permitió obtener estimaciones exactas de rasgos clave como el nitrógeno foliar y los carotenoides (R^2 > 0,90). La resolución hiperespectral resulta determinante para discriminar las señales bioquímicas de la estructura del dosel, superando las limitaciones observadas en las bandas multiespectrales de Sentinel-2 para parámetros como el LAI. La coherencia espacial de los productos generados valida la operatividad de estos modelos para una agricultura de precisión autónoma. Estos hallazgos sientan las bases para la futura misión CHIME dentro del programa Copernicus, que deberá facilitar una gestión hídrica y nutricional más eficiente en agroecosistemas estratégicos y vulnerables.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta contribución se ha desarrollado en el marco del proyecto "HiProEstres: Desarrollo de productos basados en los nuevos sensores satelitales hiperespectrales europeos e IA para la caracterización de estresores en tierras de cultivo" (PID2023-152656OB-I00), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación dentro del Plan Estatal 2021-2023. El primer autor es beneficiario de un contrato FPU del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (FPU23/00564).

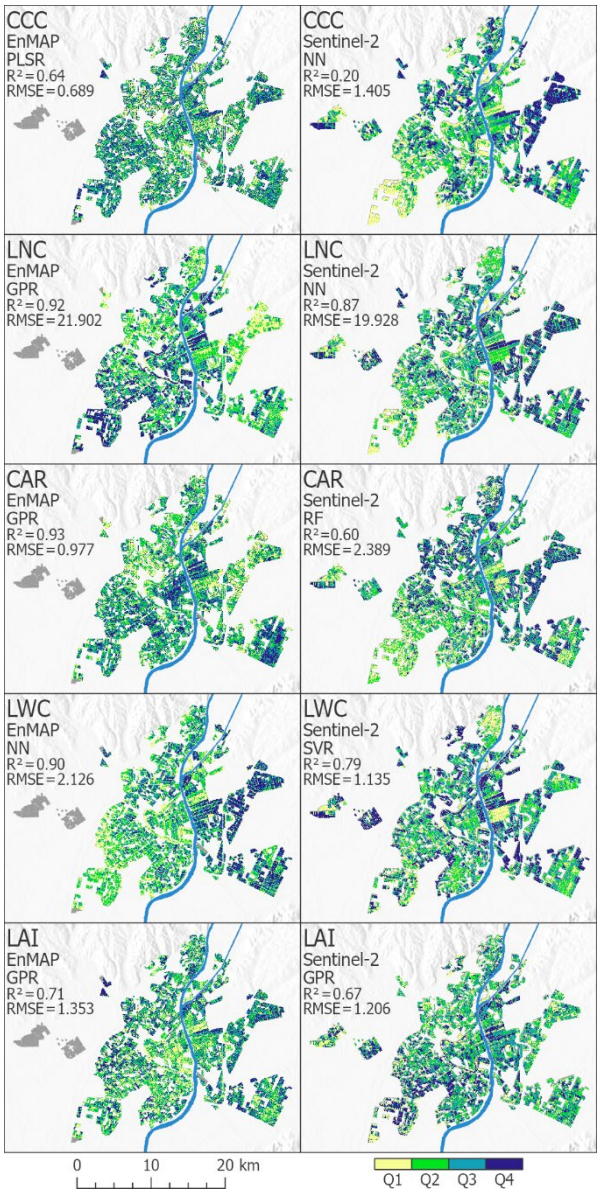


Figura 3. Predicciones espaciales de una selección de variables para los sensores EnMAP (izquierda) y Sentinel-2 (derecha). Las áreas en gris representan parcelas que se encuentran fuera de la huella de la imagen satelital utilizada.

6. REFERENCIAS

Berger, K., Rivera Caicedo, J. P., Martino, L., Wocher, M., Hank, T., & Verrelst, J. (2021). A Survey of Active Learning for Quantifying Vegetation Traits from Terrestrial Earth Observation Data. *Remote Sensing*, *13*(2), 287. https://www.mdpi.com/2072-4292/13/2/287

Berger, K., Verrelst, J., Féret, J. B., Wang, Z., Wocher, M., Strathmann, M., Danner, M., Mauser, W., & Hank, T. (2020). Crop nitrogen monitoring: Recent progress and principal developments in the context of imaging spectroscopy missions. *Remote Sensing of Environment*, *242*, Article 111758. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111758

Estévez, J., Salinero-Delgado, M., Berger, K., Pipia, L., Rivera-Caicedo, J. P., Wocher, M., Reyes-Muñoz, P., Tagliabue, G., Boschetti, M., & Verrelst, J. (2022). Gaussian processes retrieval of crop traits in Google Earth Engine based on Sentinel-2 top-of-atmosphere data. *Remote Sensing of Environment*, *273*, Article 112958. https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112958

Féret, J. B., Berger, K., de Boissieu, F., & Malenovský, Z. (2021). PROSPECT-PRO for estimating content of nitrogen-containing leaf proteins and other carbon-based constituents. *Remote Sensing of Environment*, *252*, Article 112173. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112173

Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P. J., Asner, G. P., François, C., & Ustin, S. L. (2009). PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, *113*(SUPPL. 1), S56-S66. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.026

Jay, S., Maupas, F., Bendoula, R., & Gorretta, N. (2017). Retrieving LAI, chlorophyll and nitrogen contents in sugar beet crops from multi-angular optical remote sensing: Comparison of vegetation indices and PROSAIL inversion for field phenotyping. *Field Crops Research*, *210*, 33-46. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.005

Lu, B., Dao, P. D., Liu, J., He, Y., & Shang, J. (2020). Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture. *Remote Sensing*, *12*(16), Article 2659. https://doi.org/10.3390/RS12162659

Nieke, J., & Rast, M. (2018). Towards the copernicus hyperspectral imaging mission for the environment (CHIME). International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 157-159. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518384

OECD/FAO. (2025). *OECD-FAO agricultural outlook 2025–2034*. FAO Paris, France. https://doi.org/10.1787/601276cd-en

Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, *81*(2-3), 337-354. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X

Tagliabue, G., Boschetti, M., Bramati, G., Candiani, G., Colombo, R., Nutini, F., Pompilio, L., Rivera-Caicedo, J. P., Rossi, M., Rossini, M., Verrelst, J., & Panigada, C. (2022). Hybrid retrieval of crop traits from multi-temporal PRISMA hyperspectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *187*, 362-377. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.014

Verrelst, J., Malenovský, Z., Van der Tol, C., Camps-Valls, G., Gastellu-Etchegorry, J. P., Lewis, P., North, P., & Moreno, J. (2019). Quantifying Vegetation Biophysical Variables from Imaging Spectroscopy Data: A Review on Retrieval Methods. *Surveys in Geophysics*, *40*(3), 589-629. https://doi.org/10.1007/s10712-018-9478-y

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.206

Cartografía precisa de viñedos mediante U-Net y datos multimodales PNOA

Mederos Barrera, Antonio Ramón [1] **Marcello Ruiz, Francisco Javier** [1] **Eugenio González, Francisco** [1]

[1] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), España

ORCID: Mederos Barrera 0000-0003-1680-0726 Marcello Ruiz 0000-0002-9646-1017 Eugenio González 0000-0002-0010-4024

Correspondencia: mederosbarrera.antonio@gmail.com javier.marcello@ulpgc.es francisco.eugenio@ulpgc.es

RESUMEN

La identificación y mapeo de los viñedos en islas volcánicas presenta una elevada complejidad debido a la fuerte variabilidad topográfica, la fragmentación de las parcelas y la coexistencia de múltiples sistemas de cultivo tradicionales. En este contexto, la teledetección y las técnicas de Deep Learning constituyen herramientas prometedoras para mejorar la monitorización agrícola. El presente estudio evalúa el rendimiento del modelo U-Net para la segmentación de viñedos utilizando datos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de 2021, combinando información espectral (RGB y NIR) y datos derivados de LiDAR (DEM y CHM). Se entrenaron cuatro configuraciones del modelo U-Net con distintas combinaciones de datos de entrada con el fin de analizar el impacto de cada fuente de información. Los resultados muestran que todas las configuraciones alcanzan métricas bastante robustas (F1-Score >71%, IoU >55%). Sin embargo, la integración de datos multimodales mejora sistemáticamente la segmentación. La mejor combinación (RGB + NIR + DEM + CHM) obtuvo un F1-Score del 75.32% y una IoU del 60.41%, evidenciando el impacto de incorporar información topográfica y de estructura de la vegetación. Este trabajo demuestra el potencial de la fusión de datos espectrales y LiDAR junto con modelos U-Net para la detección y monitorización precisa de viñedos en entornos agrícolas heterogéneos.

Palabras clave: *Cartografía de viñedos, Deep Learning, U-Net, Datos multimodales, PNOA*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Cartografía precisa de viñedos mediante U-Net y datos multimodales PNOA

Mederos Barrera, Antonio Ramón [(1)], Marcello Ruiz, Francisco Javier [(1)], Eugenio González, Francisco [(1)]

[(1)] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), España.

0000-0003-1680-0726, mederosbarrera.antonio@gmail.com

0000-0002-9646-1017, javier.marcello@ulpgc.es

0000-0002-0010-4024, francisco.eugenio@ulpgc.es

Resumen: La identificación y mapeo de los viñedos en islas volcánicas presenta una elevada complejidad debido a la fuerte variabilidad topográfica, la fragmentación de las parcelas y la coexistencia de múltiples sistemas de cultivo tradicionales. En este contexto, la teledetección y las técnicas de *Deep Learning* constituyen herramientas prometedoras para mejorar la monitorización agrícola. El presente estudio evalúa el rendimiento del modelo U-Net para la segmentación de viñedos utilizando datos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de 2021, combinando información espectral (RGB y NIR) y datos derivados de LiDAR (DEM y CHM). Se entrenaron cuatro configuraciones del modelo U-Net con distintas combinaciones de datos de entrada con el fin de analizar el impacto de cada fuente de información. Los resultados muestran que todas las configuraciones alcanzan métricas bastante robustas (F1-Score >71%, IoU >55%). Sin embargo, la integración de datos multimodales mejora sistemáticamente la segmentación. La mejor combinación (RGB + NIR + DEM + CHM) obtuvo un F1-Score del 75.32% y una IoU del 60.41%, evidenciando el impacto de incorporar información topográfica y de estructura de la vegetación. Este trabajo demuestra el potencial de la fusión de datos espectrales y LiDAR junto con modelos U-Net para la detección y monitorización precisa de viñedos en entornos agrícolas heterogéneos.

Palabras clave: Cartografía de viñedos, Deep Learning, U-Net, Datos multimodales, PNOA.

Precise vineyard mapping using U-Net and PNOA multimodal data

***Abstract**: The identification and mapping of vineyards on volcanic islands is highly complex due to strong topographic variability, parcel fragmentation, and the coexistence of multiple traditional cultivation systems. In this context, remote sensing and Deep Learning techniques represent promising tools to improve agricultural monitoring. This study evaluates the performance of the U-Net model for vineyard segmentation using data from Spain's 2021 National Plan for Aerial Orthophotography (PNOA), combining spectral information (RGB and NIR) and LiDAR-derived data (DEM and CHM). Four U-Net configurations were trained with different combinations of input data to analyze the contribution of each information source. The results show that all configurations achieve robust metrics (F1-Score > 71%, IoU > 55%). However, integrating multimodal data consistently improves segmentation. The best combination (RGB + NIR + DEM + CHM) achieved an F1-Score of 75.32% and an IoU of 60.41%, highlighting the impact of incorporating topographic and vegetation-structure information. This work demonstrates the potential of fusing spectral and LiDAR data together with U-Net models for accurate vineyard detection and monitoring in heterogeneous agricultural environments.*

***Keywords**: Vineyard Mapping, Deep Learning, U-Net, Multimodal data, PNOA.*

1. INTRODUCCIÓN

La viticultura constituye una actividad agrícola de gran relevancia económica, cultural y paisajística en las Islas Canarias, especialmente en la isla de Tenerife, donde la elevada pendiente, la orografía compleja y la fragmentación parcelaria dan lugar a sistemas vitícolas heterogéneos y de difícil monitorización (García-Verdugo, 2020). Tradicionalmente, la identificación y cartografía de cultivos se ha basado en trabajos de campo o fotointerpretación manual, procesos costosos en tiempo y recursos. En este contexto, la teledetección se presenta como una alternativa eficiente para la monitorización agrícola (Khosravi, 2025).

Las técnicas convencionales de *Machine Learning* basadas en píxel, que explotan principalmente la información espectral, presentan limitaciones en entornos complejos como el de Tenerife, debido a la variabilidad espacial, la mezcla de cubiertas y la influencia del relieve. Sin embargo, el avance de las técnicas de *Deep Learning* ha permitido mejorar significativamente los resultados en tareas de segmentación semántica mediante la integración conjunta de información espectral y espacial (Barros *et al*., 2022). Estudios recientes han mostrado el potencial del *Deep Learning* para la segmentación agrícola y, específicamente, para la detección de viñedos mediante imágenes RGB y multiespectrales. Asimismo, revisiones recientes subrayan la creciente relevancia de la segmentación profunda en agricultura (Barros *et al*., 2022).

En este contexto, y dado que la información disponible por las Administraciones no siempre está actualizada ni presenta el detalle requerido, este trabajo aborda la identificación y segmentación de viñedos en Tenerife mediante el modelo U-Net y datos PNOA 2021. A diferencia de estudios previos centrados principalmente en imágenes UAV RGB o multiespectrales para segmentación de viñedo, esta contribución analiza, sobre datos PNOA de cobertura regional y en un entorno volcánico altamente fragmentado, el efecto incremental de combinar información espectral (RGB y NIR) y variables derivadas de LiDAR (DEM y CHM) dentro de una misma arquitectura de segmentación. En particular, se evalúa qué combinación de datos de entrada ofrece el mejor compromiso para la cartografía precisa de viñedos en entornos agrícolas complejos.

El principal objetivo de este estudio es evaluar la capacidad del modelo U-Net para segmentar viñedos en un entorno agrícola complejo, analizando el potencial de la fusión de datos multimodales en la mejora de los resultados. Especialmente, se realiza un estudio de la mejor combinación de datos de entrada para la identificación de viñedos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la isla de Tenerife (Islas Canarias, España), caracterizada por una orografía compleja, con fuertes pendientes, elevada variabilidad altitudinal y una marcada fragmentación del territorio, contemplando un rango de alturas de 0 a 3715 metros en un área de 2034 km^2. En Tenerife, la viticultura se distribuye principalmente en zonas de medianías (de 300 a más de 1000 metros aproximadamente), y presenta una gran heterogeneidad espacial, con parcelas de reducido tamaño y sistemas de cultivo tradicionales (García-Verdugo, 2020), como bancales o terrazas, lo que dificulta su identificación mediante métodos convencionales. En concreto, el área elegida se encuentra al norte de la isla de Tenerife (Figura 1), con una elevada presencia de diferentes parcelas de viñedos, y famosa por la Denominación de Origen (D.O.) Tacoronte-Acentejo.

2.2. Datos

Para el desarrollo del presente estudio se han empleado datos procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) correspondientes al año 2021. En concreto, se han utilizado ortofotografías aéreas con información RGB y NIR a 20 cm de resolución, que proporcionan información espectral para la discriminación de cubiertas vegetadas. Adicionalmente, se han utilizado los datos de las nubes de puntos LiDAR PNOA (3ª cobertura), para la generación del Modelo Digital de Elevaciones (DEM) y el Modelo de Altura de Dosel (CHM), útiles como información topográfica y de altura de la vegetación.

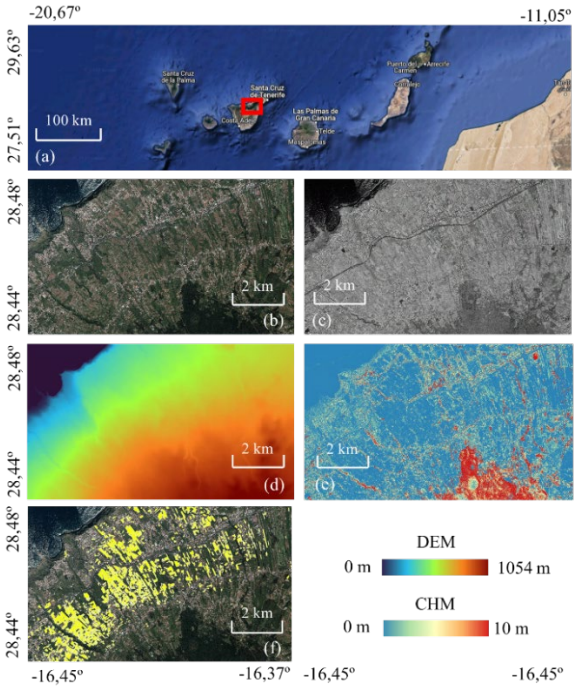


Figura 1. Zona de estudio y datos. (a) Zona de estudio en la isla de Tenerife remarcada en rojo. (b) Imagen RGB PNOA 2021. (c) Imagen NIR PNOA 2021. (d) DEM generado con datos LiDAR PNOA. (e) CHM generado con datos LiDAR PNOA. (f) Parcelas de viñedos en amarillo del Gobierno de Canarias 2021.

2.3. Metodología

2.3.1. Preprocesado LiDAR

Inicialmente, se implementó una etapa de preprocesado LiDAR. En este caso, los datos RGB y NIR se obtienen preprocesados. Respecto a los datos LiDAR se generaron los modelos DEM y CHM a 20 cm de resolución, a partir de la nube de datos PNOA. La nube LiDAR PNOA (3ª cobertura) se procesó en LiDAR360 y en el sistema de referencia común a todas las imágenes REGCAN95 / UTM zona 28N (EPSG:4083), con una densidad media aproximada de 5 puntos/m^2. El empleo de *Kriging* para interpolar DEM y DSM se adoptó para obtener superficies continuas y suavizadas, coherentes con la resolución espacial de la ortofoto PNOA (20 cm), minimizando artefactos locales de interpolación.

Para la generación del DEM se utilizó el método *Kriging* con los parámetros: radio variable, distancia de 40 píxeles, utilizando 12 puntos y con un buffer de 15 píxeles. Posteriormente, se generó el Modelo Digital de Superficie (*Digital Surface Model*; DSM), con el modelo *Kriging* y los mismos parámetros anteriores. Finalmente, se obtuvo el CHM mediante la resta del DSM y el DEM.

2.3.2. Datos de entrenamiento y validación

Seguidamente, se obtuvieron los datos para el entrenamiento y validación. Para ello, se emplearon los datos de cultivos del Gobierno de Canarias de 2021. En concreto, se obtuvo una máscara binaria de la zona con la presencia de viñedos. Se unieron las zonas de monocultivo, así como de asociación de vid y otros suelos (barbecho, cítricos, hortaliza, huerta limpia, papa, templados y tunera).

Posteriormente, se unieron las imágenes (RGB, NIR, DEM, CHM) y máscara de referencia, y se realizó una teselación en parches de 1024x1024 píxeles (512x512 metros) sin solape. Estos parches son los utilizados para el entrenamiento y validación del modelo *Deep Learning* U-Net. En total, se generaron 836 teselas, de las cuales 444 tienen la presencia de vid, y 392 no presentan vid. Se puede observar que, a nivel de tesela, existe un balanceo. A su vez, se dividió cada grupo (con/sin vid) en 80/20% para el entrenamiento y validación, uniendo cada agrupación. Esto resultó en un dataset de 668 parches de entrenamiento y 168 de validación. Además, cabe mencionar que se utilizó *Data Augmentation* para evitar sobreajustes. En concreto, se emplearon rotaciones de 90º y volteos horizontales y verticales aleatorios en el 50% de las imágenes, solamente en el conjunto de entrenamiento.

2.3.3. Modelo de segmentación U-Net

Para la segmentación de los viñedos, se empleó un modelo U-Net (Ronneberger *et al*., 2015), con 4 etapas de reducción de escala. Cabe mencionar que la base de kernels es de 64, multiplicando por 2 en cada reducción de escala (*downscaling*). Respecto al bloque convolutivo, se empleó una doble etapa. Cada etapa consiste en una convolución, normalización por grupo y la aplicación de una ReLU. También se utilizó una regularización por abandono (*dropout*) del 20% al final del bloque convolutivo durante el entrenamiento.

Respecto al entrenamiento del modelo U-Net, se optó por un optimizador AdamW (con una tasa de aprendizaje de $3 \cdot 10^{-3}$ y un decaimiento de peso de 10^{-4}), así como un programador de la tasa de aprendizaje *Reduce on Plateau* (utilizando el valor máximo, un factor de 0.5 y una paciencia de 7 épocas). Adicionalmente, es de especial interés la función de pérdida implementada, consistente en una combinación de la Entropía Cruzada Binaria (*Binary Cross Entropy*; BCE) y la función Tversky (Salehi *et al*., 2017):

$$Loss = \lambda \cdot BCE + (1 - \lambda) \cdot Tversky, \quad (1)$$

donde λ es el parámetro que controla el impacto de cada función de pérdida. En este caso se eligió un valor de 0.3. En concreto, BCE penaliza a nivel de píxel, y ayuda en la estabilidad y convergencia del entrenamiento, mientras que Tversky se emplea para mitigar el sesgo derivado del desbalanceo y controlar la penalización de FP y FN. Las imágenes con presencia de viñedos poseen un 20-40% de píxeles con la clase. Tversky ayuda a controlar los Falsos Positivos (FP) frente a los Falsos Negativos (FN), así como los Positivos Verdaderos (*True Positives*; TP):

$$Tversky = \frac{TP}{TP + \alpha FN + \beta FP}, \quad (2)$$

donde α y β controlan los FN y FP. En este caso, se eligen valores de 0.55 y 0.44 respectivamente, por lo que se penalizan en mayor medida los FN para no perder viñedos, a la vez que se penalizan los viñedos detectados que no existen (FP).

Cabe mencionar que, para observar el impacto de diferentes fuentes de datos, se entrena el modelo U-Net con diferentes combinaciones de entradas: RGB (3 canales), RGB+NIR (4 canales), RGB+DEM+CHM (5 canales) y RGB+NIR+DEM+CHM (6 canales). Además, los experimentos se implementaron en PyTorch, con un tamaño de lote de 8 imágenes, durante 150 épocas, y se entrenaron en una GPU NVIDIA GeForce RTX 4080 SUPER.

2.3.4. Métricas de evaluación

Finalmente, respecto a las métricas de evaluación de los modelos, se optó por F1-Score e Intersección sobre Unión (*Intersection over Union*; IoU):

$$F1 = \frac{2TP}{2TP + FN + FP}, \qquad IoU = \frac{TP}{TP + FN + FP}. \quad (3)$$

F1-Score es útil para analizar la capacidad de detección y en casos de desbalanceo de clases, e IoU es de interés en la evaluación de la precisión y coincidencia espacial de las parcelas segmentadas.

3. RESULTADOS

Respecto a los resultados, se presentan las métricas obtenidas con el modelo U-Net para cada combinación de entrada (Tabla 1). Se puede observar que las métricas obtenidas son bastante robustas utilizando cualquier combinación de datos de entrada (F1-Scores > 71% e IoU > 55%). Además, los resultados muestran una mejora progresiva del rendimiento a medida que se incorporan nuevas fuentes de información. Mientras que el uso exclusivo de datos RGB proporciona un rendimiento base razonable, la incorporación de datos NIR o LiDAR (DEM y CHM) mejoran las métricas, tanto en F1-Score como en IoU. Se destaca que las métricas son superiores añadiendo los datos DEM y CHM (datos LiDAR), que con el uso de NIR. La diferencia absoluta entre ambos es de 1.4% y 1.7% en F1-Score e IoU respectivamente. No obstante, la mejor combinación se obtiene al integrar todos los datos de entrada (RGB + NIR + DEM + CHM), alcanzando un F1-Score del 75.32% y una IoU del 60.41%, lo que evidencia la importancia de la fusión de datos multimodales para la segmentación de viñedos en entornos agrícolas complejos.

Tabla 1. Análisis del uso de diferentes combinaciones de entradas en la segmentación de viñedos con el modelo U-Net.

Datos de entrada	F1-Score (%) ↑	IoU (%) ↑
RGB	71.06	55.10
RGB + NIR	72.12	56.40
RGB + DEM + CHM	73.51	58.12
RGB + NIR + DEM + CHM	***75.32***	***60.41***

Por otro lado, en la Figura 2 se presenta un ejemplo de segmentación de un parche. Cualitativamente, también se observa que el uso de todos los datos multimodales mejora el resultado. No obstante, el uso exclusivo de la imagen RGB también ofrece un resultado adecuado.

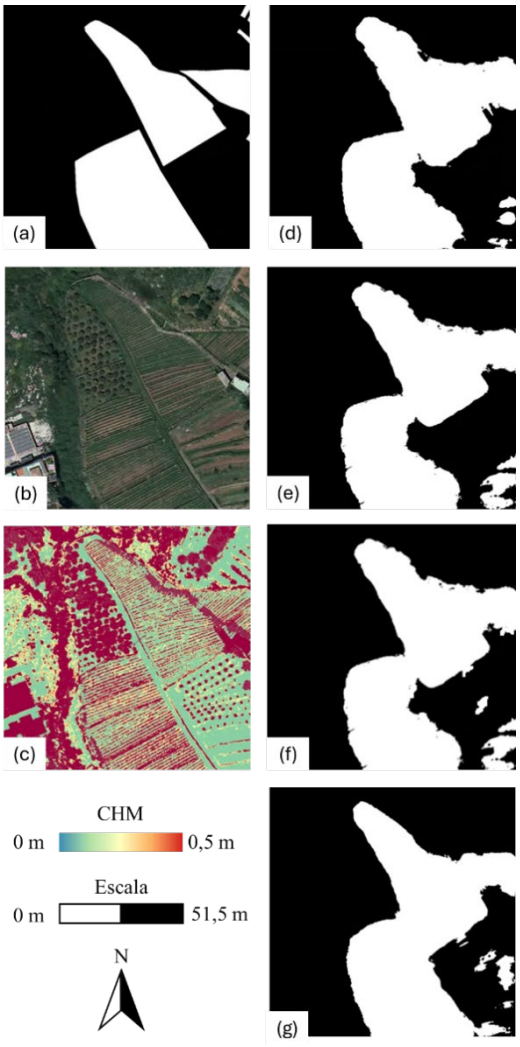


Figura 2. Ejemplo de segmentación U-Net: (a) Máscara binaria de referencia (en blanco los viñedos). (b) Imagen RGB. (c) Modelo CHM. (d) Resultado con RGB. (e) Resultado con RGB y NIR. (f) Resultado con RGB, DEM y CHM. (g) Resultado con RGB, NIR, DEM y CHM.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado el uso del modelo de *Deep Learning* U-Net para la segmentación de viñedos en la isla de Tenerife a partir de datos PNOA, demostrando su robustez en un entorno agrícola caracterizado por una elevada complejidad. Los resultados obtenidos muestran que, aunque el uso exclusivo de imágenes RGB proporciona un rendimiento satisfactorio, la incorporación progresiva de información adicional mejora de forma consistente la segmentación. En particular, la integración de datos LiDAR (DEM y CHM) aporta información clave sobre el relieve y la estructura de la vegetación, superando incluso la mejora obtenida mediante el uso del canal NIR de forma aislada. La mejor configuración, basada en la fusión de datos espectrales y topográficos (RGB + NIR + DEM + CHM), alcanza un F1-Score del 75.32% y una IoU del 60.41%, evidenciando el valor de la fusión multimodal para la identificación precisa de viñedos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto "Agricultura de precisión para el control del estrés hídrico y la prevención de enfermedades en cultivos de vid y olivo" (Convenio CC 25/63), de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Soberanía Alimentaria del Gobierno de Canarias. La participación en el congreso ha sido financiada por el Organismo Autónomo Parques Nacionales (Proyecto SPIP2022-02897). Adicionalmente, también agradecemos la disponibilidad de los datos LiDAR y ortofotos del PNOA, y el Mapa de Cultivos de Canarias del Gobierno de Canarias.

REFERENCIAS

Barros, T., Conde, P., Gonçalves, G., Premebida, C., Monteiro, M., Ferreira, C. S. S., & Nunes, U. J. (2022). Multispectral vineyard segmentation: A deep learning comparison study. *Computers and Electronics in Agriculture, 195*, 106782. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106782

García-Verdugo, D. L. (2020). Diagnóstico de la Viticultura en Canarias. Gobierno de Canarias: Santa Cruz de Tenerife, Spain. https://www.gobiernodecanarias.org/agricultura/detalle/Diagnostico-de-la-viticultura-en-Canarias/

Khosravi, I. (2025). Advancements in crop mapping through remote sensing: A comprehensive review of concept, data sources, and procedures over four decades. *Remote Sensing Applications: Society and Environment, 38*, 101527. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101527

Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In International *Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention* (pp. 234-241). Cham: Springer international publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Salehi, S. S. M., Erdogmus, D., & Gholipour, A. (2017). Tversky loss function for image segmentation using 3D fully convolutional deep networks. In *International workshop on machine learning in medical imaging* (pp. 379-387). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67389-9_44

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.218

Sat4Carbon: Integración de teledetección térmica y modelos mecanísticos para la cuantificación de flujos de carbono en ecosistemas silvopastorales

Olalla, Adrián [1,3] **Sierra, Sergio** [2] **Mary, Benjamin** [3] **Nieto, Héctor** [3]

[1] Universidad de Alcalá, Grupo de Investigación de Teledetección Ambiental, Colegios 2, Alcalá de Henares 28801, España

[2] Complutum Tecnologías de la Información Geográfica, España

[3] Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC)

ORCID: Olalla 0000-0003-0456-0745 Sierra 0000-0002-0247-2904 Mary 0000-0001-7199-2885 Nieto 0000-0003-4250-6424

Correspondencia: adrian.olalla@edu.uah.es sergio.sierra@complutig.com benjamin.mary@ica.csic.es hector.nieto@ica.csic.es

RESUMEN

El seguimiento preciso del ciclo del carbono en ecosistemas agroforestales es un reto crítico frente al cambio climático. Este trabajo presenta una metodología innovadora que integra modelos mecanísticos de fotosíntesis con teledetección multiespectral y térmica del Programa Copernicus (Sentinel-2/3 y Landsat). A diferencia de los modelos tradicionales de eficiencia en el uso de la luz (LUE) basados en ajustes estadísticos, esta aproximación incorpora estimaciones de conductancia estomática derivada de modelos de balance de energía como variable crítica, permitiendo capturar con precisión el impacto del estrés hídrico en la fijación de carbono. La metodología se aplicó en una parcela piloto silvopastoral en Cantabria. Se empleó el modelo de balance energético de dos fuentes (TSEB) con el fin de separar la transpiración de la evaporación y derivar así la conductancia estomática como indicador del estado fisiológico. Este parámetro alimentó un modelo de fotosíntesis basado en Farquhar para calcular flujos diarios de carbono, obteniendo indicadores como la Productividad Primaria Bruta (GPP) y el Intercambio Neto del Ecosistema (NEE). Los resultados de 2024 revelaron variaciones significativas en la fijación de carbono según la densidad vegetal y la humedad del suelo, permitiendo clasificar las parcelas como sumideros o fuentes de CO2.

Palabras clave: *TSEB, Producción Primaria Bruta, Sentinel-2, Sentinel-3, Landsat*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Sat4Carbon: Integración de teledetección térmica y modelos mecanísticos para la cuantificación de flujos de carbono en ecosistemas silvopastorales

Olalla, Adrián [1], Sierra, Sergio [2], Mary, Benjamin [3], Nieto, Héctor [4]

[1] Universidad de Alcalá, Grupo de Investigación de Teledetección Ambiental. Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC), España, 0000-0003-0456-0745, adrian.olalla@edu.uah.es.

[2] Complutum Tecnologías de la Información Geográfica, España, 0000-0002-0247-2904, sergio.sierra@complutig.com.

[3] Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC), 0000-0001-7199-2885, benjamin.mary@ica.csic.es.

[4] Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC), 0000-0003-4250-6424, hector.nieto@ica.csic.es.

Resumen: El seguimiento preciso del ciclo del carbono en ecosistemas agroforestales es un reto crítico frente al cambio climático. Este trabajo presenta una metodología innovadora que integra modelos mecanísticos de fotosíntesis con teledetección multiespectral y térmica del Programa Copernicus (Sentinel-2/3 y Landsat). A diferencia de los modelos tradicionales de eficiencia en el uso de la luz (LUE) basados en ajustes estadísticos, esta aproximación incorpora estimaciones de conductancia estomática derivada de modelos de balance de energía como variable crítica, permitiendo capturar con precisión el impacto del estrés hídrico en la fijación de carbono. La metodología se aplicó en una parcela piloto silvopastoral en Cantabria. Se empleó el modelo de balance energético de dos fuentes (TSEB) con el fin de separar la transpiración de la evaporación y derivar así la conductancia estomática como indicador del estado fisiológico. Este parámetro alimentó un modelo de fotosíntesis basado en Farquhar para calcular flujos diarios y anuales de carbono, obteniendo indicadores como la Productividad Primaria Bruta (GPP) y el Intercambio Neto del Ecosistema (NEE). Los resultados de 2024 revelaron variaciones significativas en la fijación de carbono según la densidad vegetal y la humedad del suelo, permitiendo clasificar las parcelas como sumideros o fuentes de CO_2.

Palabras clave: TSEB, Producción Primaria Bruta, Sentinel-2, Sentinel-3, Landsat

Sat4Carbon: Integration of Thermal Remote Sensing and Mechanistic Models for Carbon Flux Quantification in Silvopastoral Ecosystems

***Abstract**: Accurate monitoring of the carbon cycle in agroforestry ecosystems is a critical challenge in the face of climate change. This work presents an innovative methodology that integrates process-based photosynthesis models with multispectral and thermal remote sensing from the Copernicus Programme (Sentinel-2/3 and Landsat). Unlike traditional empirical Light Use Efficiency (LUE) models, this approach incorporates stomatal conductance from energy balance models as a critical variable, allowing for the precise capture of water stress effects on carbon uptake. The methodology was validated in one silvopastoral pilot plot located in Cantabria. The Two-Source Energy Balance (TSEB) model was used to partition transpiration from evaporation and then derive stomatal conductance as an indicator of physiological status. This parameter was fed into a Farquhar-based photosynthesis model to calculate daily and annually carbon fluxes, obtaining key indicators such as Gross Primary Productivity (GPP) and Net Ecosystem Exchange (NEE). The 2024 results revealed significant variations in carbon fixation depending on vegetation density and soil moisture, allowing the plots to be classified as either carbon sinks or sources.*

***Keywords**: TSEB, GPP, Sentinel-2, Sentinel-3, Landsat*

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial y la consecuente demanda de alimentos, fibras y combustibles han intensificado las prácticas de producción agrícola y forestal, ejerciendo una presión sin precedentes sobre los recursos naturales en un contexto de cambio climático. A pesar de que los ecosistemas agroforestales poseen un enorme potencial para el secuestro de carbono y el mantenimiento de la biodiversidad, existe una falta de conocimiento preciso que limita la evaluación de su impacto real en la dinámica del ciclo del carbono. Los pastizales de montaña, por ejemplo, son tanto una actividad productiva como una fuente crítica de fijación de carbono atmosférico (Miglietta *et al.,* 2006).

En la actualidad, las directrices del IPCC proporcionan un marco básico para informes de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006). Por otro lado, aunque las estimaciones *in situ* mediante torres de flujo "Eddy Covariance" (EC) son altamente precisas, su elevado coste de mantenimiento limita su despliegue a estudios científicos puntuales, lo que dificulta la generalización de sus datos en grandes extensiones de terreno o en formaciones vegetales sin instrumentación cercana (Miglietta *et al.,* 2006). Un enfoque prometedor para superar estas limitaciones es el uso de modelos de producción primaria basados en teledetección, que aprovechan la capacidad de los sensores espaciales para ofrecer una cobertura sinóptica, sistemática y objetiva de la superficie terrestre. Tradicionalmente, estos modelos se han basado en el concepto de eficiencia en el uso de la luz (LUE) que establece relaciones semi-empíricas entre la radiación absorbida por la vegetación y la asimilación de CO_2 (Liu *et al.,* 2018), Sin embargo, los modelos LUE dependen fuertemente de medidas de campo para su calibración, lo que restringe su aplicación a las regiones donde han sido validados y supone una barrera en áreas deficientes en torres EC (Liu *et al.,* 2018). Como alternativa, los modelos mecanísticos de fotosíntesis (basados en el modelo de Farquhar *et al.,* 1980) ofrecen una aproximación más física al simular la actividad enzimática de las hojas. Aunque son más complejos, su base físico-química les otorga un mayor potencial de generalización y escalabilidad (Farquhar *et al.,* 1980; Liu *et al.,* 2018). No obstante, su principal limitación actual es que suelen alimentarse solo con datos de teledetección en el espectro de onda corta, ignorando el grado de apertura o cierre estomático en condiciones de estrés hídrico. En regiones como la Mediterránea, el estrés hídrico provoca el cierre de estomas para conservar agua, lo que reduce drásticamente la fijación de carbono (Tuzet *et al.,* 2003).

Investigaciones recientes han demostrado que la teledetección térmica permite no solo monitorear la evapotranspiración mediante modelos de balance energético como TSEB (Norman *et al*. 1995) sino también obtener estimaciones directas de la conductancia estomática (Nieto *et al.,* 2022). Esta variable puede integrarse en funciones de suministro de CO_2 para calcular de forma más robusta la fijación de carbono, incluso bajo condiciones de estrés hídrico (Farquhar *et al*., 1980; Tuzet *et al*., 2003). A pesar de estos avances, existe aún una brecha en la aplicación operativa de estos productos de base física en la gestión agronómica (Guzinski *et al*. 2023).

El programa Copernicus ha mejorado la disponibilidad de datos de alta resolución temporal y espacial (Sentinel-2), pero persisten retos en la resolución de las imágenes térmicas necesarias para detectar el estrés hídrico (Guzinski *et al*. 2023). Por tanto, los objetivos principales del estudio son, (1) desarrollar una metodología sólida, estandarizada y escalable que permita realizar el seguimiento de la fijación de carbono a largo plazo en diversas regiones y a diferentes escalas espaciales mediante (2) la integración de la teledetección térmica en modelos mecanísticos para obtener estimaciones directas de la conductancia estomática y (3) aplicarlo en una parcela piloto de ecosistema silvopastoral para poder apoyar la gestión sostenible y las políticas de mitigación.

2. MÉTODOS

Se ha seleccionado una parcela piloto en la Mancomunidad de Campoo-Cabuerniga (Cantabria). Se ha priorizado el ecosistema silvopastoral debido a su papel crucial en la captura de carbono y su resiliencia ante eventos climáticos extremos. Asimismo, la elección de esta zona facilita la evaluación de los beneficios de una gestión sostenible del territorio, tales como el uso de ganadería extensiva y la reducción de la carga de combustible para prevenir incendios, asegurando que la parcela sirva como laboratorio operativo para cuantificar la fijación de carbono en biomasa y suelo.

El modelo de balance energético de dos fuentes (TSEB) propuesto por Norman *et al.,* (1995) se integra con variables biofísicas y la temperatura radiométrica de la superficie. Mas específicamente, se obtienen variables clave como el Índice de Área Foliar (LAI), su fracción verde y el albedo mediante Sentinel-2, las cuales se combinan con la temperatura superficial de Sentinel-3 y Landsat (Guzinski *et al.* 2023). El modelo TSEB particiona dicha temperatura en componentes de suelo y vegetación, estimando los flujos de calor latente y sensible (Norman *et al.* 1995) y su reparto entre el suelo y el dosel vegetal. La transferencia de calor se regula mediante un conjunto de resistencias en serie, que modula el transporte turbulento de calor y agua. Con esas resistencias aerodinámicas y estimaciones de transpiración derivadas con TSEB, permiten derivar la conductancia estomática, facilitando la cuantificación precisa de la asimilación de carbono (Tuzet *et al.,* 2003).

La metodología para la estimación de los flujos de carbono diarios (Fig. 1) se fundamenta en el modelo mecanístico de fotosíntesis de Farquhar *et al*., (1980), acoplado a las mismas variables biofísicas utilizadas en TSEB y las estimaciones de conductancia estomática obtenidas anteriormente.

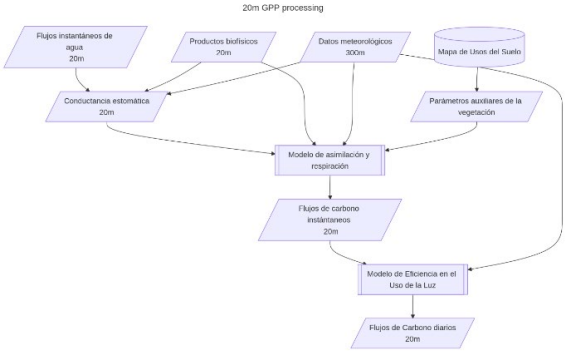


Figura 1. Flujo de trabajo del modelo de balance de carbono.

Finalmente, se calculan los mapas de productividad primaria bruta (GPP) mediante la integración de flujos instantáneos y se incorporan modelos de respiración del suelo planteados en Lloyd & Taylor (1994) para

determinar el intercambio neto del ecosistema (NEE). El escalado de datos instantáneos de GPP a diarios (gC m^{-2} $día^{-1}$) se realiza bajo la premisa de que la eficiencia en el uso de la luz (LUE) se mantiene constante durante todo el fotoperiodo diario.

3. RESULTADOS

En un primer lugar, se realizó una evaluación cuantitativa preliminar del desempeño del modelo mecanístico de asimilación de carbono utilizando datos de torres *Eddy Covariance* (EC) procedentes de la base de datos ICOS "Warm Winter 2020". Para ello se utilizaron como fuentes de entrada los productos biofísicos de Sentinel-2 y datos in situ de temperatura de superficie estimados a partir de radiómetros del sistema EC. A escala anual, a partir de datos interpolados y agregados, el modelo mantiene un buen rendimiento, con r = 0.72, RMSE = 352 gC m^{-2} $año^{-1}$) y una infraestimación promedio de 101 gC m^{-2} $año^{-1}$ (figura 2).

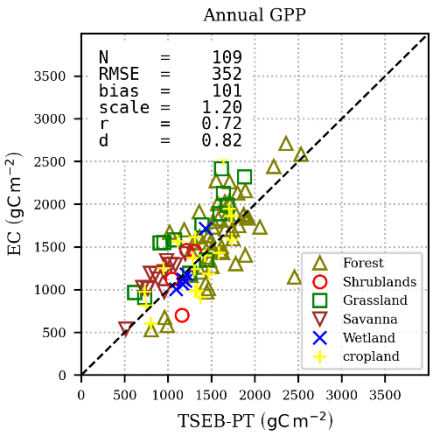


Figura 2. Validación preliminar del modelo mecanístico de asimilación de carbono combinando datos *in situ* y de Sentinel-2 agregados anualmente.

Con respecto a los resultados específicos en la zona de estudio se observa que la cantidad total de carbono fijado varía significativamente de forma intra-parcelaria, condicionada por la heterogeneidad de la cobertura vegetal local (Figura 3). Los valores más elevados de GPP se concentran en los sectores con una mayor densidad de vegetación fotosintéticamente activa, lo que evidencia una capacidad superior de captación de CO_2. Por el contrario, la parcela presenta zonas con una asimilación de carbono reducida, asociadas a sectores con ausencia de vegetación funcional. Esta variabilidad espacial subraya la importancia de utilizar sensores de alta resolución como Sentinel-2 para capturar con precisión los contrastes en la productividad primaria bruta dentro de un mismo ecosistema silvopastoral.

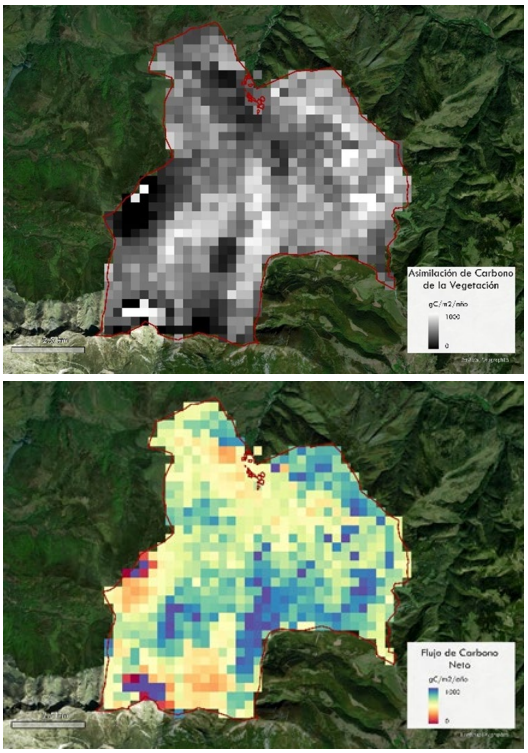


Figura 3. Producción primaria anual neta (gC$m^{-2}$$año^{-1}$) (superior) y flujo de carbono anual neto (gC$m^{-2}$$año^{-1}$) en la parcela de estudio (inferior) para el año 2024.

Los resultados de 2024 permitieron clasificar los diferentes sectores según su función ecológica específica. Debido a la heterogeneidad del terreno, se identificaron áreas que actuaron como sumideros de carbono (NEE negativo). Por el contrario, en aquellos puntos de la parcela con asimilación nula, el balance resultó en una función de fuente de carbono (NEE positivo), ya que las pérdidas por respiración no fueron compensadas por ninguna captura fotosintética activa.

4. CONCLUSIONES

Se ha presentado un método operativo que integra modelos mecanísticos y teledetección térmica, lo cual representa un avance fundamental frente a las limitaciones de los modelos de eficiencia en el uso de la luz (LUE). De hecho, la teledetección térmica permite proporcionar estimaciones directas del estrés hídrico y la conductancia estomática mediante modelos de balance energético como TSEB, lo cual es esencial para modelar con robustez la fijación de carbono bajo condiciones de estrés hídrico. La eficacia de esta metodología que combina datos de onda corta y datos térmicos con algoritmos acoplados de fotosíntesis y transpiración, optimiza la cuantificación de flujos diarios y anuales frente a productos globales de menor resolución. No obstante, esta evaluación cualitativa debe complementarse con una validación cuantitativa frente a datos *in situ*. Dada la falta de datos EC en las zonas de estudio, la siguiente línea de trabajo se centrará en validar el modelo en zonas climáticas y ecosistemas similares dentro de la red ICOS europea.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a las Ayudas para la realización de doctorados industriales en la Comunidad de Madrid (IND2024/AMB-34867) y al Grupo Operativo Sat4Carbon, Proyecto financiado por el Plan Estratégico de la PAC – FEDER.

B.M. cuenta con el apoyo de la ayuda "RyC2023-045040-I", financiada por el MICIU/AEI (ayuda nº 10.13039/501100011033) y el FSE.

6. REFERENCIAS

Farquhar, G. D., von Caemmerer, S., & Berry, J. A. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO2 assimilation in leaves of C3 species. *Planta, 149*(1), 78–90. https://doi.org/10.1007/BF00386231

Guzinski, R., Nieto, H., Sánchez, R. R., Sánchez, J. M., Jomaa, I., Zitouna-Chebbi, R., Roupsard, O., & López-Urrea, R. (2023). Improving field-scale crop actual evapotranspiration monitoring with Sentinel-3, Sentinel-2, and Landsat data fusion. International *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 125*, 103587. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103587

IPCC. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. (H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds.). Institute for Global Environmental Strategies (IGES).

Liu, Z., Hu, M., Hu, Y., & Wang, G. (2018). Estimation of net primary productivity of forests by modified CASA models and remotely sensed data. International *Journal of Remote Sensing, 39*(4), 1092–1116. https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1381352

Lloyd, J., & Taylor, J. A. (1994). On the temperature dependence of soil respiration. Functional *Ecology*, 315–323.

Miglietta, F., Gioli, B., Hutjes, R. W. A., & Reichstein, M. (2006). Net regional ecosystem CO2 exchange from airborne and ground-based eddy covariance, land-use maps and weather observations. *Global Change Biology, 13*(3), 548–560. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01219.x

Nieto, H., Alsina, M.M., Kustas,W.P., García-Tejera, O., Chen, F., Bambach, N., Gao, F., Alfieri, J.G., Hipps, L.E., Prueger, J.H., McKee, L.G., Zahn, E., Bou-Zeid, E., McElrone, A.J., Castro, S.J., Dokoozlian, N., (2022). Evaluating different metrics from the thermal-based two-source energy balance model for monitoring grapevine water stress. *Irrigation Science 40*, 697–713. doi:10.1007/s00271-022-00790-2.

Norman, J. M., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology, 77*(3-4), 263–293. https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y

Tuzet, A., Perrier, A., & Leuning, R. (2003). A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell & Environment, 26*(7), 1097–1116. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01035.x

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.223

Estimación del diámetro en olivos jóvenes mediante LiDAR móvil terrestre y RTK para su aplicación en modelos de biomasa

Tarraga Martinez, Gema [1] **Oñate Tevar, Juan Miguel** [1] **Belenguer Ballester, José** [1]

[1] Ainia, España

ORCID: Tarraga Martinez 0009-0004-7259-4327 Oñate Tevar 0009-0003-7266-5722 Belenguer Ballester 0000-0002-5724-7894

Correspondencia: gtarraga@ainia.es jmonate@ainia.es jbelenguer@ainia.es

RESUMEN

Este estudio evalúa una metodología de reconstrucción 3D híbrida basada en datos RGB, LiDAR móvil y georreferenciación RTK para estimar el diámetro de olivos jóvenes. Las cinco campañas iniciales permitieron analizar la coherencia geométrica del sistema, obteniéndose desviaciones pequeñas frente a patrones de referencia, con un RMSE global de 0,98 mm en el plano XY y 0,22 mm en el eje Z. En la estimación del diámetro del tronco, las comparaciones con calibre digital mostraron precisiones submilimétricas en varias campañas, con RMSE entre 0,76 mm y 0,08 mm en adquisiciones aceptadas. Estos resultados confirman la viabilidad del método como opción precisa para su futura integración en ecuaciones alométricas de biomasa.

Palabras clave: *teledetección de proximidad, LiDAR móvil terrestre, RTK, biomasa aérea, sistemas agroforestales.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Estimación del diámetro en olivos jóvenes mediante LiDAR móvil terrestre y RTK para su aplicación en modelos de biomasa

Tarraga Martinez, Gema [(1)], Oñate Tevar, Juan Miguel [(1)], Belenguer Ballester, José [(1)]

[(1)] Ainia, España.

0009-0004-7259-4327, gtarraga@ainia.es ; 0009-0003-7266-5722, jmonate@ainia.es

0000-0002-5724-7894, jbelenguer@ainia.es.

Resumen: Este estudio evalúa una metodología de reconstrucción 3D híbrida basada en datos RGB, LiDAR móvil y georreferenciación RTK para estimar el diámetro de olivos jóvenes. Las cinco campañas iniciales permitieron analizar la coherencia geométrica del sistema, obteniéndose desviaciones pequeñas frente a patrones de referencia, con un RMSE global de 0,98 mm en el plano XY y 0,22 mm en el eje Z. En la estimación del diámetro del tronco, las comparaciones con calibre digital mostraron precisiones submilimétricas en varias campañas, con RMSE entre 0,76 mm y 0,08 mm en adquisiciones aceptadas. Estos resultados confirman la viabilidad del método como opción precisa para su futura integración en ecuaciones alométricas de biomasa.

Palabras clave: teledetección de proximidad, LiDAR móvil terrestre, RTK, biomasa aérea, sistemas agroforestales.

Diameter estimation in young olive trees using terrestrial mobile LiDAR and RTK for application in biomass models

***Abstract**: This study evaluates a hybrid 3D reconstruction methodology combining RGB data, mobile LiDAR and RTK georeferencing for estimating the diameter of young olive trees. Across the first five field campaigns, geometric coherence was assessed against calibrated reference patterns, yielding small deviations with a global RMSE of 0.98 mm in the XY plane and 0.22 mm along the Z axis. For trunk diameter estimation, comparisons with digital calliper measurements showed sub-millimetre accuracy in several campaigns, with RMSE values ranging from 0.76 mm down to 0.08 mm in accepted acquisitions. These results confirm the feasibility of the method as a precise approach suitable for future integration into allometric biomass equations.*

***Keywords**: proximity remote sensing, terrestrial mobile LiDAR, RTK, above-ground biomass, agroforestry systems.*

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroforestales contribuyen significativamente a la mitigación del cambio climático gracias a su capacidad de secuestro de carbono en la biomasa aérea y subterránea. Para avanzar en su cuantificación, el proyecto europeo "*Nature-Based Business Model and Emerging INNOvations to enhance Carbon Farming Initiatives (CFIs) while preserving Biodiversity, Water Security and Soil Health*" (INNO4CFIs) integra tecnologías avanzadas aplicadas en campos de experimentación (*living hubs*) con elevada complejidad estructural (Conti *et al*., 2025).

La estimación de la biomasa aérea (AGB, *Above-Ground Biomass*) depende de ecuaciones alométricas donde el diámetro del tronco —medido como DBH (del inglés, *Diameter at Breast Height*) a 1,3 m— es el predictor más robusto. Sin embargo, los inventarios manuales y los métodos destructivos tradicionales continúan siendo costosos y difíciles de aplicar a gran escala (Conti *et al*., 2025; M. I. Disney *et al*., 2018; Hackenberg *et al*., 2014).

Las técnicas de teledetección de proximidad han evolucionado desde el LiDAR (del inglés, *Light Detection And Ranging*) terrestre estático hacia sistemas móviles y de mano capaces de generar nubes de puntos 3D precisas (M. Disney, 2019; Howie & De Stefano, 2024). La incorporación de sensores LiDAR en dispositivos móviles, junto con posicionamiento RTK (del inglés, *Real Time Kinematic*), permite obtener reconstrucciones georreferenciadas con buena consistencia y detectar rasgos estructurales finos (Gao *et al*., 2025; Hackenberg *et al*., 2014; Howie & De Stefano, 2024; Sun *et al*., 2025).

Pese a estos avances, sigue siendo necesario validar protocolos de escaneo adaptados a árboles jóvenes, cuya morfología presenta desafíos de oclusión y ruido (Gao *et al*., 2025). Este estudio valida una metodología híbrida RGB–LiDAR–RTK para estimar el diámetro en olivos jóvenes mediante la comparación entre

reconstrucciones 3D y mediciones *in situ* con un calibre digital, presentando los resultados de las cinco primeras campañas del proyecto en curso.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La fase experimental se llevó a cabo en Rancho Guareña (Castrillo de la Guareña, Zamora), una explotación mixta de producción lechera con 300 ha de cultivo. En la parcela seleccionada (Fig. 1), se realizó una plantación de *Olea europaea* L. 'Arbequina' en hileras y con riego por goteo subterráneo.



Figura 1. Ortofoto de la parcela obtenida con la composición de imágenes adquiridas con un dron DJI Mavic 3M.

2.2. Instrumentación

Se empleó un teléfono móvil iPhone 15 Pro Max (Apple Inc., EE. UU.) (Fig. 2), que combina imágenes RGB de alta resolución con información de profundidad obtenida con un sensor LiDAR de tiempo de vuelo. Ambas fuentes se fusionan en un único flujo en la aplicación Pix4Dcatch (Pix4D SA, Suiza) para mejorar la estabilidad geométrica del modelo 3D resultante.

La georreferenciación absoluta se obtuvo mediante una configuración RTK compuesta por una estación base Emlid Reach RS2+ y un receptor *rover* Emlid RX (Emlid Tech Kft., Hungría). La base se alineó al sistema oficial de referencia recibiendo correcciones mediante NTRIP (del inglés, *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) desde la estación permanente El Carpio de la Red de Estaciones Permanentes de Castilla y León. Posteriormente, transmitió correcciones RTCM (del inglés, *Radio Technical Commission for Maritime Services*) al *rover* RX. Este, a su vez, se vinculó al dispositivo móvil — vía *Bluetooth*— proporcionando una solución fija (FIX) en tiempo real durante la adquisición.



Figura 2. Sistema móvil de captura de datos integrado por un iPhone 15 Pro Max y un receptor Emlid Reach RX.

2.3. Protocolo experimental

Se realizaron 17 adquisiciones sobre cuatro olivos jóvenes a lo largo de cinco meses; tras la muerte de uno de ellos, el seguimiento continuó con los tres restantes. En cada campaña, se colocaron las referencias calibradas del kit móvil de Pix4D y se registraron coordenadas UTM (del inglés, *Universal Transverse Mercator*) mediante Emlid Flow 360 (Emlid Tech Kft., Hungría), verificando así la coherencia geométrica y la precisión de la geolocalización. Para el plano XY se midieron las marcas impresas en cada modelo 3D; para el eje Z se obtuvieron los diámetros aparentes —de los tutores rígidos de 8 mm de las plantas— en tres alturas.

La medición de cada olivo siguió un protocolo reproducible: primero, se confirmó la estabilidad de la señal RTK FIX en el receptor *rover*; luego, el técnico se situó a 0,5 m del tronco, con el iPhone y el *rover* RX en posición vertical a ~1 m de altura; finalmente, se midió cada árbol siguiendo una órbita circular durante 30 s con un 90 % de solape entre imágenes.

Para validar la estimación del diámetro se tomaron dos medidas con calibre digital (Meterk, China) por debajo del primer nudo (Fig. 3), donde el fuste es homogéneo, asegurando la comparabilidad entre campañas. Esta variable es esencial tanto para evaluar la fiabilidad del modelo 3D híbrido como por su papel en ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono almacenado (Conti et al., 2025; Disney et al., 2018).



Figura 3. Estimación de la medida del tronco de un olivo mediante el modelo 3D y con el calibre.

2.4. Procesado de las nubes de puntos

2.4.1. Generación y preprocesado de las nubes de puntos

Los proyectos adquiridos con Pix4Dcatch se procesaron íntegramente en Pix4Dmatic (Pix4D SA, Suiza). Se ejecutó una calibración automática conjunta de los datos RGB y LiDAR a partir la cual se generaron dos nubes intermedias: una nube densa fotogramétrica y una nube de profundidad derivada del LiDAR.

Se aplicaron diversos filtros predefinidos a ambas nubes para supresión de ruido, *deghosting* y eliminación de artefactos derivados de la fusión RGB–LiDAR. A continuación, se unificaron las dos nubes en una única solución 3D (Fig. 4) sobre la que se hicieron las medidas.

Debido al pequeño tamaño de los árboles y a la ausencia de rugosidades relevantes en la superficie del tronco, se optó por no generar una malla suavizada.

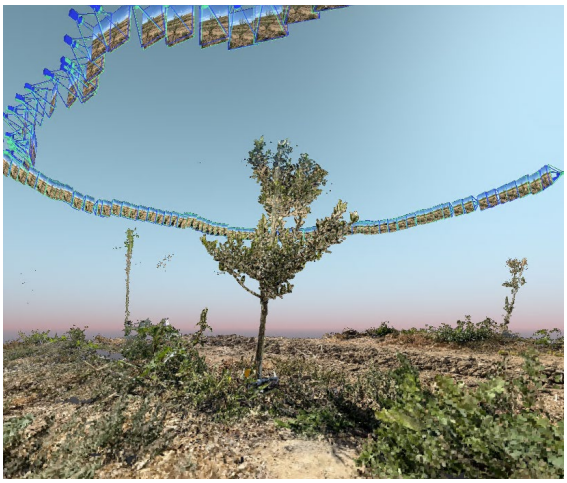


Figura 4. Generación de la nube de puntos en Pix4Dmatic.

2.4.2. Delimitación del tronco y generación de secciones transversales

Las nubes de puntos resultantes se exportaron y procesaron en Global Mapper v26 (Blue Marble Geographics, EE. UU.). Para cada olivo, se generó un búfer de 0.5 m a partir de sus coordenadas UTM. Este búfer se usó posteriormente para recortar la nube de puntos y así evitar incluir suelo o elementos ajenos al individuo estudiado (Fig. 5).



Figura 5. Nube de puntos recortada por el buffer de 0,5 m de uno de los olivos del estudio.

En paralelo, se evaluaron también búferes de menor tamaño para eliminar más elementos externos. Sin embargo, debido a la ligera inclinación y torsión de los troncos, propia de la edad fenológica de los olivos, estos búferes reducidos provocaron la pérdida parcial de las copas o distorsiones en la delimitación. Por ello, se adoptó el valor de 0,5 m como compromiso óptimo entre limpieza y completitud del modelo.

2.5. Análisis estadístico y métricas

Para evaluar la consistencia geométrica de las reconstrucciones 3D y la precisión de las estimaciones de diámetro, se aplicaron tres tipos de análisis sobre las nubes de puntos generadas.

2.5.1. Coherencia en el plano XY

Se midieron las distancias entre las marcas calibradas del patrón de referencia empleado en Pix4Dcatch. Para cada campaña y adquisición se calcularon métricas de error basadas en la comparación entre las distancias medidas en el modelo 3D y sus valores nominales. La métrica principal utilizada fue el error cuadrático medio (RMSE, del inglés *Root-Mean-Square Error*), acompañado del cálculo del sesgo como media de la diferencia entre las distancias observadas y esperadas.

2.5.2. Coherencia en el eje Z

Se extrajeron secciones horizontales de los tutores de diámetro conocido de 8 mm para analizar la estabilidad vertical del modelo. Cada sección se evaluó a través de la comparación entre el diámetro nominal del tutor y el diámetro reconstruido a partir de la nube de puntos. Para estas evaluaciones se calcularon el RMSE y la desviación estándar de los errores entre los diámetros de las secciones.

2.5.3. Estimación del diámetro del tronco

En la zona de medición de campo se generaron perfiles transversales a partir de la nube de puntos de cada individuo. Cada perfil se ajustó mediante una circunferencia obtenida por mínimos cuadrados, a partir de la cual se derivó el diámetro estimado (Fig. 6). La precisión de estas estimaciones se evaluó mediante el RMSE, el error absoluto medio (MAE, del inglés *Mean Absolute Error*) y el sesgo con respecto a las medidas de referencia tomadas con el calibre.

Además, se definieron criterios de aceptación y exclusión basados en los valores obtenidos en la calibración en el plano horizontal, la estabilidad en el eje vertical y la calidad de la nube de puntos (densidad, presencia de artefactos o deformaciones), con el fin de garantizar la comparabilidad entre campañas.

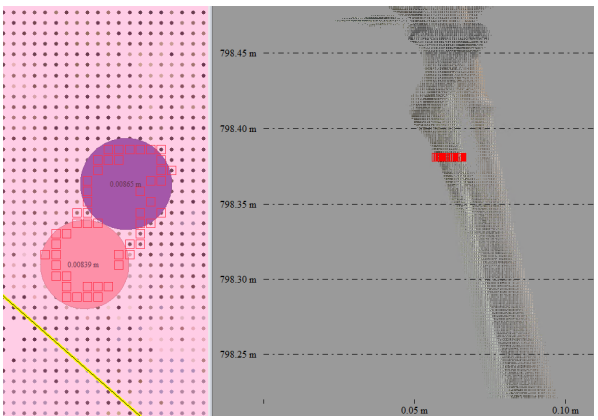


Figura 6. Medición de diámetros mediante la selección de puntos y ajuste geométrico a una circunferencia de un olivo.

3. RESULTADOS

3.1. Coherencia geométrica en el plano XY

La evaluación de la coherencia XY comparó las distancias nominales del patrón calibrado y las distancias reconstruidas en los modelos 3D. La Tabla 1 resume los estadísticos globales de todas las campañas aceptadas por control de calidad.

Tabla 1. Estadísticos globales de coherencia XY.

Distancia nominal (mm)	Distancia reconstruida media (mm)	RMSE (mm)	Sesgo (mm)
33,25	32,65	0,98	+0,60

3.2. Coherencia vertical (eje Z)

La estabilidad vertical se evaluó a través del análisis de tres secciones horizontales de los tutores de diámetro nominal conocido. La Tabla 2 muestra los estadísticos agregados para todas las alturas y campañas aceptadas.

Tabla 2. Estadísticos de coherencia vertical (eje Z).

Diámetro nominal (mm)	Diámetro reconstruido medio (mm)	RMSE (mm)	SD (mm)
8,00	8,22	0,22	0,55

3.3. Estimación del diámetro del tronco

La precisión en la estimación del diámetro del tronco se evaluó comparando las mediciones obtenidas mediante el modelo 3D y las medidas realizadas en campo con el calibre digital. La Tabla 3 y la 7 Figura muestran, respectivamente, los estadísticos incluidos por campaña y un diagrama de dispersión de los diámetros estimados por el modelo frente a los medidos con el calibre.

Tabla 3. Estadísticos de la estimación del diámetro del tronco por campaña.

Campaña	N.º olivos	RMSE (mm)	MAE (mm)	Sesgo (mm)
I	2	0,76	1,14	-0,76
II	2	0,75	0,75	-0,75
III	4	0,60	0,80	-0,60
IV	4	0,35	0,58	-0,35
V	4	0,08	0,55	-0,08

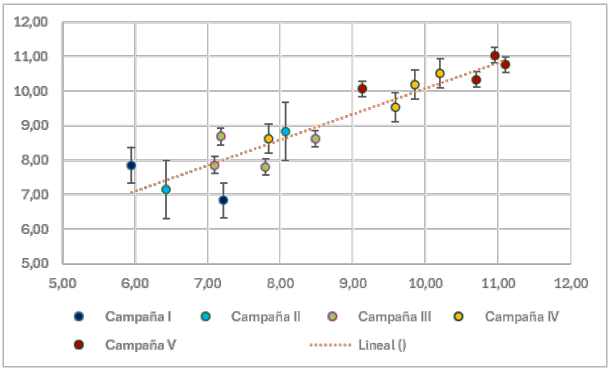


Figura 7. Relación entre diámetros medidos con calibre y diámetros estimados.

Estos resultados sostienen la validez de la metodología propuesta para olivos jóvenes. Asimismo, confirman su capacidad para proporcionar diámetros comparables entre campañas y para derivar información sobre la tasa de crecimiento a nivel individual.

Las siguientes campañas del proyecto INNO4CFIs permitirán ampliar la serie temporal, consolidar la precisión, afinar umbrales de control de calidad y evaluar la transferibilidad de las medidas a ecuaciones alométricas para estimación de biomasa y carbono.

4. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado dentro del proyecto INNO4CFIs, el cual ha recibido financiación de la Comisión Europea en el marco de las Inversiones Interregionales en Innovación (I3) del Fondo Europeo de Desarrollo Regional, con acuerdo de subvención n.º 101115156. Las opiniones y los puntos de vista expresados en este artículo son exclusivamente los de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea. Ni la Unión Europea ni la autoridad que concede la subvención se responsabilizan de ellas.

5. REFERENCIAS

Conti, N., Della Rocca, G., Franciamore, F., Marra, E., Nigro, F., Nigrone, E., Ramadhan, R., Paris, P., Tárraga-Martínez, G., Belenguer-Ballester, J., Scatena, L., Lombardi, E., & Garosi, C. (2025). Tree Biomass Estimation in Agroforestry for Carbon Farming: A Comparative Analysis of Timing, Costs, and Methods. *In Forests (Vol. 16, Number 8)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/f16081287

Disney, M. (2019). Terrestrial LiDAR: a three-dimensional revolution in how we look at trees. In *New Phytologist (Vol. 222, Number 4, pp. 1736–1741)*. Blackwell Publishing Ltd. https://doi.org/10.1111/nph.15517

Disney, M. I., Boni Vicari, M., Burt, A., Calders, K., Lewis, S. L., Raumonen, P., & Wilkes, P. (2018). Weighing trees with lasers: Advances, challenges and opportunities. *Interface Focus, 8*(2). https://doi.org/10.1098/rsfs.2017.0048

Gao, J., Tang, L., Su, H., Chen, J., & Yuan, Y. (2025). Extraction of tree branch skeletons from terrestrial LiDAR point clouds. *Ecological Informatics, 85*(1), 102960. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102960

Hackenberg, J., Morhart, C., Sheppard, J., Spiecker, H., & Disney, M. (2014). Highly Accurate Tree Models Derived from Terrestrial Laser Scan Data: A Method Description. *Forests, 5*(5), 1069–1105. https://doi.org/10.3390/f5051069

Howie, N. A., & De Stefano, A. (2024). Measuring Tree Diameter Using LiDAR Equipped iPad: An Evaluation of ForestScanner and Arboreal Forest Applications. *Forest Science, 70*(4), 304–310. https://doi.org/10.1093/forsci/fxae017

Sun, A., Su, R., Ma, J., & Lin, J. (2025). Individual Trunk Segmentation and Diameter at Breast Height Estimation Using Mobile LiDAR Scanning. *Forests, 16*(4). https://doi.org/10.3390/f16040582

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.232

Uso de sensores para estimar el potencial productivo y la fenología en genotipos de trigo

Arencibia Pérez, Nuria [1] **Quemada, Miguel** [1] **Tarquis, Ana M.** [1] **de Castro, Ana** [1] **Ruiz, Magdalena** [1] **San Juan, Raúl** [1] **Gabriel, José Luis** [1]

[1] Universidad Politécnica de Madrid, España

ORCID: Arencibia Pérez 0009-0000-5021-2157 Quemada 0000-0001-5793-2835 Tarquis 0000-0003-2336-5371 de Castro 0000-0002-6699-2204 Ruiz 0000-0003-3901-703X San Juan 0009-0000-4468-2750 Gabriel 0000-0002-5508-4120

Correspondencia: nuria.arencibiap@upm.es miguel.quemada@upm.es anamaria.tarquis@upm.es ana.decastro@csic.es mruiz@inia.csic.es raul.sanjuan@inia.csic.es gabriel.jose@inia.csic.es

RESUMEN

El empleo de imágenes y sensores remotos pueden ser un apoyo importante para el fenotipado de cultivos. El objetivo de este estudio fue explorar la capacidad de medidas proximales y remotas para estimar la estimación de rendimiento y las diferencias en fenología de 57 genotipos de trigo procedentes de diversos países europeos. Para ello se seleccionaron 57 variedades de un ensayo que se llevó a cabo durante dos campañas de cultivo en Alcalá de Henares (Madrid). De cada variedad se determinaron las fechas de espigado, floración y maduración, así como el rendimiento en cosecha. Igualmente se tomaron medidas con un sensor de proximidad para calcular los índices NDVI, NDRE y CCCI así como imágenes de campo para obtener la cubierta vegetal en tres fechas. La altura del cultivo se obtuvo a partir de imágenes aéreas adquiridas con un UAV. La variable que mostró mayor capacidad para estimar el rendimiento fue la cubierta vegetal que, al incluir la altura estimada del dosel, permitió alcanzar un R^2 de 0,53 y un RMSE de 990 kg/ha. Al analizar las variedades según su origen, se observó que las mejoras más significativas correspondieron a las variedades españolas y suizas, con valores de R^2 de 0,43 y 0,53, respectivamente. En cuanto a la fecha de adquisición, la variable que mejor estimó el momento de espigado fue el índice CCCI, con un error del 47 %. Asimismo, los índices espectrales y los rasgos estructurales del cultivo aportaron información complementaria para explicar el rendimiento. Como alternativa basada en teledetección, se propone el uso de modelos texturales o geométricos del cultivo y técnicas de inteligencia artificial, que han demostrado ser eficaces en la estimación de la maduración de frutos y en la identificación de malas hierbas.

Palabras clave: *sensores remotos, sensores próximos, fenotipado, rendimiento potencial, cereales.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Uso de sensores para estimar el potencial productivo y la fenología en genotipos de trigo

Arencibia Pérez, Nuria [(1)], Quemada, Miguel [(1)], Tarquis, Ana M. [(1)], de Castro, Ana [(1)], Ruiz, Magdalena [(1)], San Juan, Raúl [(1)], Gabriel, José Luis [(1)]

[(1)] Universidad Politécnica de Madrid, España.

0009-0000-5021-2157, nuria.arencibiap@upm.es ; 0000-0001-5793-2835, miguel.quemada@upm.es

0000-0003-2336-5371, anamaria.tarquis@upm.es ; 0000-0002-6699-2204, ana.decastro@csic.es

0000-0003-3901-703X, mruiz@inia.csic.es ; 0009-0000-4468-2750, raul.sanjuan@inia.csic.es

0000-0002-5508-4120, gabriel.jose@inia.csic.es

Resumen: El empleo de imágenes y sensores remotos pueden ser un apoyo importante para el fenotipado de cultivos. El objetivo de este estudio fue explorar la capacidad de medidas proximales y remotas para estimar la estimación de rendimiento y las diferencias en fenología de 57 genotipos de trigo procedentes de diversos países europeos. Para ello se seleccionaron 57 variedades de un ensayo que se llevó a cabo durante dos campañas de cultivo en Alcalá de Henares (Madrid). De cada variedad se determinaron las fechas de espigado, floración y maduración, así como el rendimiento en cosecha. Igualmente se tomaron medidas con un sensor de proximidad para calcular los índices NDVI, NDRE y CCCI así como imágenes de campo para obtener la cubierta vegetal en tres fechas. La altura del cultivo se obtuvo a partir de imágenes aéreas adquiridas con un UAV. La variable que mostró mayor capacidad para estimar el rendimiento fue la cubierta vegetal que, al incluir la altura estimada del dosel, permitió alcanzar un R^2 de 0,53 y un RMSE de 990 kg/ha. Al analizar las variedades según su origen, se observó que las mejoras más significativas correspondieron a las variedades españolas y suizas, con valores de R^2 de 0,43 y 0,53, respectivamente. En cuanto a la fecha de adquisición, la variable que mejor estimó el momento de espigado fue el índice CCCI, con un error del 47 %. Asimismo, los índices espectrales y los rasgos estructurales del cultivo aportaron información complementaria para explicar el rendimiento. Como alternativa basada en teledetección, se propone el uso de modelos texturales o geométricos del cultivo y técnicas de inteligencia artificial, que han demostrado ser eficaces en la estimación de la maduración de frutos y en la identificación de malas hierbas.

Palabras clave: sensores remotos, sensores próximos, fenotipado, rendimiento potencial, cereales.

Use of sensors to estimate yield potential and phenology in wheat genotypes

***Abstract**: The use of images and remote sensors can be an important aid in the phenotyping of crop genotypes. The objective of this study was to explore the ability of proximal and remote measurements to estimate the productive potential and differences in phenology of 57 wheat genotypes from various European countries. To this end, 57 varieties were selected from a trial carried out over two growing seasons in Alcalá de Henares (Madrid). For each variety, the dates of heading, flowering, and maturation were determined, as well as the harvest yield. Measurements were also taken with a proximity sensor to calculate the NDVI, NDRE, and CCCI, and digital images were taken to obtain the vegetation cover on three dates. Crop height was obtained from an aerial image acquired with a UAV. The variable that showed the greatest ability to estimate yield was vegetation cover, which, when including the estimated canopy height, achieved an R^2 of 0.53 and an RMSE of 990 kg/ha. When analyzing the varieties according to their origin, it was observed that the most significant improvements corresponded to the Spanish and Swiss varieties, with R^2 values of 0.40 and 0.58, respectively. Regarding the acquisition date, the variable that best estimated the moment of heading was the CCCI index, with an error of 47%. Likewise, spectral indices and structural traits of the crop provided complementary information to explain yield. As an alternative based on remote sensing, the use of textural or geometric models of the crop and artificial intelligence techniques is proposed, which have proven effective in estimating fruit ripeness and identifying weeds.*

***Keywords**: remote sensors, proximal sensors, phenotyping, yield potential, cereals.*

1. INTRODUCCIÓN

La teledetección se ha convertido en una herramienta clave para el estudio de cultivos, al permitir la obtención rápida y no destructiva de información fenológica y fisiológica a partir de sensores remotos (Okyere *et al*., 2024). En agronomía, esta tecnología facilita la monitorización del estado del cultivo a lo largo del ciclo, proporcionando indicadores del vigor y el estrés que complementan las medidas tradicionales de campo empleando múltiples índices de vegetación como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de vegetación normalizado de borde rojo (NDRE) que se han utilizado con éxito para caracterizar el comportamiento de diferentes genotipos de cultivo en distintas condiciones de crecimiento.

Este ensayo se centrará en la caracterización de la respuesta de varios genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) en secano para comprender su capacidad de adaptación en escenarios de estrés hídrico. Se compararán tanto *landraces,* variedades autóctonas de cada país, que han mostrado una mayor resiliencia frente a la sequía, como variedades comerciales. Los genotipos comparados provienen de varios países europeos e incluyen unos controles comunes (Checks) que permiten reflejar una variedad de respuestas diversas para el estudio y la mejora del cultivo en ambientes limitantes. Partimos de la hipótesis de que la integración de información fenológica y agronómica es esencial para identificar materiales con potencial para sistemas más resilientes.

El presente estudio tiene por objetivos explorar la capacidad de medias proximales y remotas para estimar: (1) la estimación de rendimiento de los trigos cultivados en secano basándose en medidas adquiridas durante el desarrollo del trigo y (2) las diferencias en fenología existentes entre *landraces* y variedades comerciales de trigo. Para ello, se utilizaron variables derivadas de imágenes como el NDVI, el NDRE, la cubierta vegetal y la altura del cultivo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Material Vegetal y diseño experimental

Los ensayos de campo se llevaron a cabo durante las campañas 2022-2023 (Año 1) y 2023-2024 (Año 2) en la finca experimental La Canaleja (INIA-CSIC), Alcalá de Henares, Madrid.

El ensayo incluía 290 variedades de trigo de las que se seleccionaron un total de 57 representativas entre las que se encontraban *landraces europeas* (Suiza, Chequia, Italia, Polonia y España), variedades comerciales y Checks comunes europeos. Las seleccionadas eran 8 variedades de Chequía, 10 de Suiza, 10 de España, 7 de Italia, 9 Checks y por último 13 de Polonia. El diseño utilizado fue un Alpha-lattice con plots de 3.3 x 1.2m (Fig. 1). En el Año 1 se dispuso de una repetición por tratamiento, mientras que en el Año 2 se incluyeron dos repeticiones. Todas las variedades de trigo se sembraron en noviembre (11/11/2022; 16/11/2023).

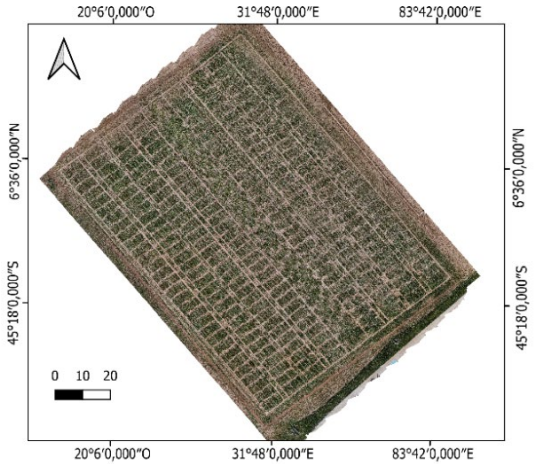


Figura 1. Ortofoto del ensayo.

2.2. Adquisición y procesamiento de datos

En cada parcela se registraron las siguientes variables agronómicas: fenología (fecha de espigado, floración y madurez) y rendimiento de grano (kg/ha) al 14% de humedad. Los datos meteorológicos fueron registrados a lo largo de todo el ciclo en ambas campañas.

En tres momentos del año (diciembre, febrero y abril) se adquirieron los índices espectrales mediante el sensor proximal RapidScan CS-45 (Holland Scientific, Lincoln, NE, EE. UU.). La metodología consistió en realizar un barrido del sensor sobre la parcela, obteniéndose una media de la medición representativa en cada fecha. Se trata de un sensor activo de radiación que permite la medición directa de reflectancias en bandas roja (670 nm), infrarroja cercana (780 nm) y borde rojo (730 nm). A partir de estas mediciones se calcularon los índices NDVI y NDRE:

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo} \quad (1)$$

$$NDRE = \frac{NIR - Borde\ rojo}{NIR + Borde\ rojo} \quad (2)$$

En estas fechas se midió la cubierta vegetal a partir de tres imágenes de campo por variedad, tomadas en la zona central de cada subparcela con el fin de evitar efectos de borde. Las imágenes nadir se adquirieron situando la cámara a 1 m por encima del dosel del cultivo para mantener una distancia de muestreo uniforme independientemente de la altura de las plantas. Estas imágenes se utilizaron posteriormente para cuantificar el porcentaje de suelo cubierto por vegetación utilizando el programa Canopeo (Patrignani *et al*., 2015).

Las imágenes remotas fueron adquiridas con el sensor visible DJI Zenmuse acoplados a un dron DJI Matrice 300-RTK volando a 15 m de altura. Las imágenes individuales se ortomosaicaron con el programa Agisoft Metashape, siguiendo el protocolo descrito en de Castro *et al*. (2018) que consiste en tres pasos: alineado de imágenes, construcción del modelo 3D y generación de ortofotos con resolución espacial de 1,5 cm/píxel de las cuales se extrajo la altura.

2.3. Cálculo índices y búsqueda de relaciones

A partir de los índices de vegetación NDVI y NDRE, se estudió el Índice de Contenido de Clorofila del Dosel (CCCI), empleando su formulación estándar basada en la relación entre ambos índices.

$$NDRE_{mínimo} = 0.32 * NDVI \quad (3)$$

$$NDRE_{máximo} = 0.48 * NDVI \quad (4)$$

$$CCCI = \frac{NDRE_{medido} - NDRE_{mínimo}}{NDRE_{mínimo} + NDRE_{máximo}} \quad (5)$$

Para explorar la relación entre las variables ópticas medidas y el rendimiento, se generaron gráficos de dispersión y regresiones entre los índices espectrales (NDVI, NDRE y CCCI), la Cubierta y el Rendimiento de grano. Con el objetivo de evaluar la influencia de la arquitectura de la planta en estas relaciones, se ajustó un modelo lineal múltiple incorporando la altura de planta (Altura) como covariable. El modelo, implementado en RStudio, se expresó de la siguiente forma:

$$Rendimiento = \beta_0 + \beta_1 * Indice + \beta_2 * Altura + \varepsilon \quad (6)$$

Donde β_0 es el coeficiente de intercepto y β_1 y β_2 son los coeficientes de regresión asociados al índice espectral y a la altura de la planta respectivamente, y ε es el término de error.

3. RESULTADOS

3.1. Estimación de rendimiento

La fecha de adquisición de las medidas en la que se obtuvo la mejor estimación para todas las variables ópticas empleadas como indicadores fue abril. La variable que mejor estimó el rendimiento fue la cubierta vegetal estimada a partir de las imágenes digitales adquiridas en campo (Fig. 2). Incluir la altura de la cubierta estimada a partir de las imágenes aéreas mejoró la estimación del rendimiento en todas las variables, y en el caso de la cubierta permitió alcanzar un coeficiente de determinación (R^2) de 0.53 y un RMSE de 990 kg/ha (Fig. 2B).

Cuando se analizaron las variedades separadas por su origen, se observó una asociación positiva y consistente en todos los orígenes alcanzando R^2 entre 0,18 y 0,59 (Tabla 2). Al incorporar altura como covariable el ajuste mejoró en todos los casos (R^2 entre 0,22 y 0,59), aunque la ganancia de R^2 fue modesta en algunos orígenes (Checks, Italia, Chequia, Polonia) y marcada en aquellos en los que la variabilidad de la altura era elevada (España, Suiza).

En el caso de las variedades españolas, la pendiente de cubierta se redujo fuertemente de +70,41 a +15,00 (≈−78,7 %), mientras que altura aportó +41 kg ha^{-1} por cm (≈**+410 kg ha^{-1}** por +10 cm). Esto se debió probablemente a que el coeficiente de variación de las variedades españolas fue muy elevado (117%) frente al de los otros orígenes que fue menor (22-27%).

En las variedades suizas el R^2 se incrementó de 0,43 a 0,53 al incluir la altura. En los orígenes con mejoras más discretas como son los Checks, Italia, Chequia y Polonia la incorporación de la altura produjo aumentos pequeños en el R^2 (en todos ellos inferiores a 0,02). En este grupo, la altura añadió efectos modestos, desde apenas +1 a +7 kg ha^{-1} por cm, lo que confirma que su contribución estructural es limitada en comparación con otros orígenes, aunque suficiente para mejorar ligeramente el ajuste.

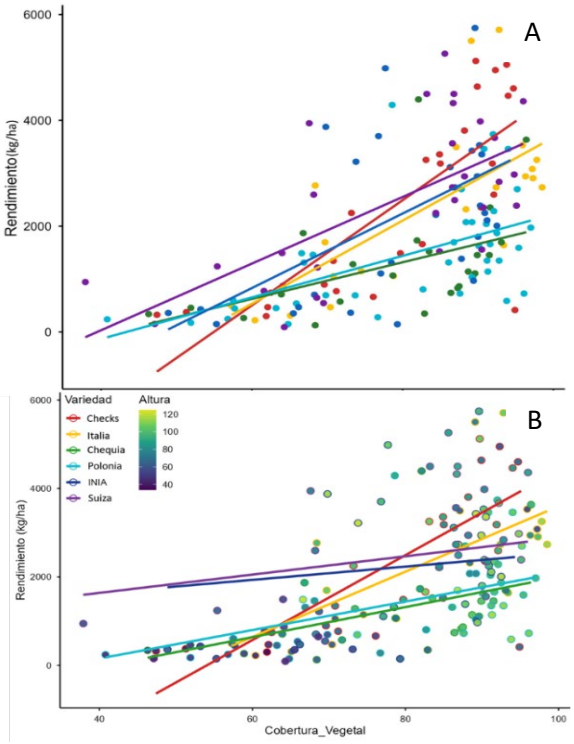


Figura 2. Relación entre el rendimiento y A) la cubierta vegetal estimada mediante imágenes digitales en abril y B) la Cubierta combinada con la altura estimada de la cubierta

Tabla 2. Valores estadísticos de la relación lineal entre Cubierta y Rendimiento para los distintos orígenes de las variedades sin aplicar y aplicando la corrección de altura

	f(Cubierta)		f(Cubierta&Altura)	
Origen	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Chequia	0.18	896	0.22	890
Suiza	0.43	1085	0.53	990
España	0.30	1345	0.43	1210
Italia	0.49	1067	0.51	1059
Checks	0.59	1134	0.59	1134
Polonia	0.31	831	0.32	825

3.2. Estimación del estadio fenológico

La fecha de adquisición de las medidas en la que se obtuvo la mejor estimación del estadio de espigado para todas las variables ópticas empleadas como indicadores fue abril. La variable que mejor estimó la fecha en la que se produjo el espigado fue CCCI. Los modelos múltiples que añadieron las otras variables no supusieron una gran mejora.

Se clasificaron las variedades en tres categorías: tempranas, medias y tardías. Estableciendo una Tbase (T_b) como 2ºC, las variedades medias son aquellas cuyos grados días acumulados (*GDA)* hasta floración fue 1218±40, las tempranas < 1178 y las tardías >1258. La

T_b se determinó seleccionando el error que minimizó el error entre campañas, calculando los *GDA* como:

$$GDA = \sum_{i=1}^{n}(T_i - T_b) \quad (7)$$

Siendo T_i la temperatura media diaria.

En general, el error cometido por los distintos índices para distinguir el grupo en el que se clasifican las diferentes variedades fue elevado, siendo el menor 47%, cometido por el CCCI en la fecha de abril (Fig. 3).

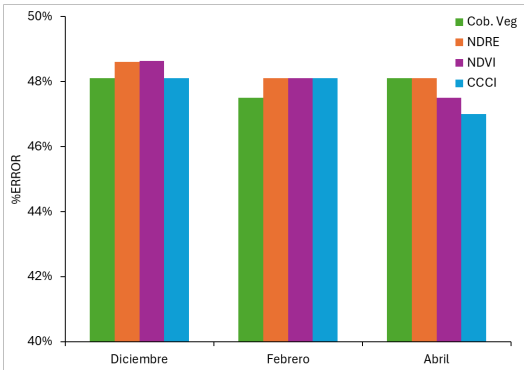


Figura 3. Error cometido por las distintas variables indicadoras en la estimación del tipo de variedad de trigo (temprana, media, tardía).

4. DISCUSIÓN

Los resultados confirman que los índices espectrales y los rasgos estructurales del cultivo aportan información complementaria para explicar el rendimiento, con variaciones según la arquitectura de los genotipos. La altura mejoró particularmente el ajuste de los modelos cuando la variabilidad de esta variable entre genotipos era elevada, en línea con trabajos que muestran que añadir variables estructurales incrementa la capacidad predictiva cuando los índices pueden saturarse o están condicionados por fenología y arquitectura del dosel (Gracia-Romero *et al*., 2023).

Se observó variabilidad marcada entre *landraces* y variedades comerciales en rendimiento y rasgos estructurales/funcionales; algunas *landraces* mostraron mayor estabilidad fenológica, mientras que ciertos materiales comerciales alcanzaron máximos cuando presentaron una arquitectura de dosel favorable. En conjunto, y de forma consistente con otros sistemas, la combinación de la altura de la planta (derivada de LiDAR/UAV) con índices espectrales mejora la precisión y transferibilidad de los modelos frente a enfoques espectrales aislados.

La estimación del estadio fenológico fue deficiente, ya que el menor error cometido en distinguir variedades tempranas, medias y tardías por un indicador derivado de los sensores ópticos fue del 47%. La relación entre la temperatura del aire y el desarrollo de las plantas, expresada mediante el concepto de grados día, constituye un elemento central para predecir las fases fenológicas, mientras que factores como el fotoperiodo también modulan estas respuestas en muchas especies (Paredes *et al*., 2025). Una alternativa basada en teledetección sería el empleo de modelos texturales o geométricos del cultivo y de inteligencia artificial, como han sido empleados con éxito para estimación de maduración de frutos e identificación de malas hierbas (de Castro *et al*., 2018).

5. CONCLUSIONES

La cubierta vegetal estimada a partir de imágenes digitales adquiridas en abril fue la variable que mejor estimó la estimación de rendimiento de los genotipos de trigo. Combinándola con la altura mejoró la estimación, particularmente cuando el conjunto de *landraces* y variedades comerciales tuvieron alturas muy diferentes, como fue el caso de las provenientes de España. La estimación del estadio fenológico basada exclusivamente en las medidas de los sensores ópticos fue deficiente. El mejor indicador fue el CCCI que logró distinguir entre variedades tempranas, medias y tardías con un 47% de error. Por ello se aconseja apoyarse en modelos basados en datos climáticos o en medidas texturales de la planta para la caracterización fenológica.

6. AGRADECIMIENTOS

Proyecto (PID2021-124041OB-C21/C22) financiado por la Agencia Estatal de Investigación, Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033/).

7. REFERENCIAS

de Castro, A. I., Jiménez-Brenes, F. M., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Borra-Serrano, I., & López-Granados, F. (2018). 3-D characterization of vineyards using a novel UAV imagery-based OBIA procedure for precision viticulture applications. *Remote Sensing*, *10*(4). https://doi.org/10.3390/rs10040584

Gracia-Romero, A., Rufo, R., Gómez-Candón, D., Soriano, J. M., Bellvert, J., Yannam, V. R. R., Gulino, D., & Lopes, M. S. (2023). Improving in-season wheat yield prediction using remote sensing and additional agronomic traits as predictors. *Frontiers in Plant Science*, *14*. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1063983

Okyere, F. G., Cudjoe, D. K., Virlet, N., Castle, M., Riche, A. B., Greche, L., Mohareb, F., Simms, D., Mhada, M., & Hawkesford, M. J. (2024). Hyperspectral Imaging for Phenotyping Plant Drought Stress and Nitrogen Interactions Using Multivariate Modeling and Machine Learning Techniques in Wheat. *Remote Sensing*, *16*(18). https://doi.org/10.3390/rs16183446

Paredes, P., López-Urrea, R., Martínez-Romero, Á., Petry, M. T., Cameira, M. do R., Montoya, F., Almeida, W., Salman, M., & Pereira, L. S. (2025). Base and upper temperature thresholds to support the calculation of growing degree days aiming at their use with the FAO56rev crop coefficients curve: A review. In *Agricultural Water Management* (Vol. 319). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109755

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.244

Clasificación de cultivos mediante series temporales Sentinel-1: contribución de observables pseudo-polarimétricas

Sanz Cano, Judit [1] **González-Audícana, María** [1] **Álvarez-Mozos, Jesús** [1]

[1] Universidad Pública de Navarra, España

ORCID: Sanz Cano 0009-0000-4104-5545 González-Audícana 0000-0002-2430-3853 Álvarez-Mozos 0000-0002-6518-2533

Correspondencia: judit.sanz@unavarra.es maria.audicana@unavarra.es jesus.alvarez@unavarra.es

RESUMEN

La utilización de imágenes radar para la clasificación de cultivos se presenta como una alternativa eficaz a las imágenes ópticas, especialmente en regiones con alta nubosidad. Este estudio evalúa el potencial de series temporales de coeficientes de retrodispersión VH y VV de Sentinel-1 para la clasificación de cultivos en una zona agrícola heterogénea y analiza cómo repercute en la fiabilidad de los resultados la incorporación de distintas observables pseudo-polarimétricas propuestas en la literatura (HV/VV, RVI, DpRVI, DpRBI, DpRSI, P_(d-l), P_(s-l), P_(r), Hc , θ_c y mc). Los resultados mostraron que ciertas observables, como DpRVI, Hc y RVI están fuertemente correlacionadas mientras que P_(d-l) y DpRBI aportan información complementaria. Los modelos de Random Forest alcanzaron una fiabilidad global superior al 80 % y valores de F1 similares, con diferencias mínimas respecto al modelo base VH y VV. Ninguna observable pseudo-polarimétrica mejoró la clasificación global. Los principales cultivos de verano y la mayoría de los de invierno, como cebada, trigo y guisante, se clasificaron con alto desempeño (F1 ≥0.9). Sin embargo, los cultivos minoritarios, los permanentes y las mezclas de cultivos se clasificaron peor. En conclusión, las series temporales de coeficiente de retrodispersión de Sentinel-1 en las polarizaciones VV y VH son suficientes para una clasificación robusta y precisa de la mayoría de cultivos. Las observables pseudo-polarimétricas generadas a partir de estas observaciones ofrecen un beneficio limitado para la clasificación de cultivos.

Palabras clave: *Radar, Random Forest, RVI, fiabilidad, F1score*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Clasificación de cultivos mediante series temporales Sentinel-1: contribución de observables pseudo-polarimétricas

Sanz-Cano, Judit [1], González-Audícana, María [1], Álvarez-Mozos, Jesús [1]

[1] Institute for Sustainability & Food Chain Innovation (IS-FOOD), Dpto. Ingeniería, Universidad Pública de Navarra.

0009-0000-4104-5545, judit.sanz@unavarra.es ; 0000-0002-6518-2533, jesus.alvarez@unavarra.es, 0000-0002-2430-3853, maria.audicana@unavarra.es

Resumen: La utilización de imágenes radar para la clasificación de cultivos se presenta como una alternativa eficaz a las imágenes ópticas, especialmente en regiones con alta nubosidad. Este estudio evalúa el potencial de series temporales de coeficientes de retrodispersión VH y VV de Sentinel-1 para la clasificación de cultivos en una zona agrícola heterogénea y analiza cómo repercute en la fiabilidad de los resultados la incorporación de distintas observables pseudo-polarimétricas propuestas en la literatura (HV/VV, RVI, DpRVI, DpRBI, DpRSI, P_{d-l}, P_{s-l}, P_r, H_c, θ_c y m_c). Los resultados mostraron que ciertas observables, como DpRVI, H_c y RVI están fuertemente correlacionadas mientras que P_{d-l} y DpRBI aportan información complementaria. Los modelos de Random Forest alcanzaron una fiabilidad global superior al 80 % y valores de F1 similares, con diferencias mínimas respecto al modelo base VH y VV. Ninguna observable pseudo-polarimétrica mejoró la clasificación global. Los principales cultivos de verano y la mayoría de los de invierno, como cebada, trigo y guisante, se clasificaron con alto desempeño (F1 ≥0.9). Sin embargo, los cultivos minoritarios, los permanentes y las mezclas de cultivos se clasificaron peor. En conclusión, las series temporales de coeficiente de retrodispersión de Sentinel-1 en las polarizaciones VV y VH son suficientes para una clasificación robusta y precisa de la mayoría de cultivos. Las observables pseudo-polarimétricas generadas a partir de estas observaciones ofrecen un beneficio limitado para la clasificación de cultivos.

Palabras clave: Radar, Random Forest, RVI, fiabilidad, F1score

Crop classification using Sentinel-1 time series: contribution of pseudo-polarimetric observables

***Abstract**: The use of radar imagery for crop classification represents an effective alternative to optical imagery, particularly in regions with high cloud cover. This study evaluates the potential of time series of Sentinel-1 VH and VV backscatter coefficients for crop classification in a heterogeneous agricultural area, and analyzes how the inclusion of various pseudo-polarimetric observables proposed in the literature (HV/VV, RVI, DpRVI, DpRBI, DpRSI, P_{d-l}, P_{s-l}, P_r, Hc , θ_c and m_c) affects the accuracy of the results. The results showed that certain observables, such as DpRVI, como DpRVI, H_c y RVI, are strongly correlated, while P_{d-l} and DpRBI provide complementary information. Random Forest models achieved overall accuracy values above 80% and similar F1-scores, with minimal differences compared to the baseline VH and VV model. None of the pseudo-polarimetric observables improved the overall classification performance. Major summer crops and most winter crops, such as barley, wheat, and pea, were classified with high performance (F1 ≥ 0.9), whereas minor crops, permanent crops, and crop mixtures were classified with lower accuracy. In conclusion, time series of Sentinel-1 backscatter coefficients in VV and VH polarizations are sufficient for robust and accurate classification of most crops, and pseudo-polarimetric observables derived from these measurements provide limited benefit for crop classification.*

***Keywords**: Radar, Random Forest, RVI, reliability, F1score.*

1. INTRODUCCIÓN

La clasificación de cultivos mediante teledetección se ha consolidado como una herramienta clave para la planificación y gestión de políticas agrícolas. Esta tecnología proporciona información sobre la distribución espacial de los cultivos y su evolución campaña a campaña, lo que facilita la toma de decisiones y mejora la capacidad de respuesta frente a escenarios ambientales y comerciales cada vez más inciertos. En los últimos años, la investigación en clasificación de cultivos ha priorizado el uso combinado de sensores ópticos y radar (o SAR del

inglés *Synthetic Aperture Radar*), junto con la aplicación creciente de algoritmos de *machine learning* y *deep learning* (Pluto-Kossakowska, 2021). La amplia disponibilidad de imágenes SAR, especialmente de Sentinel-1, ha impulsado el interés en desarrollar enfoques basados exclusivamente en esta tecnología. Sentinel-1 ofrece observaciones en la banda C, con polarización doble VH-VV y con una frecuencia de revisita de unos 6 días (dependiendo de la región), lo que permite generar series temporales densas. Esta alta frecuencia de adquisición compensa en parte las limitaciones inherentes a la polarización doble frente a la polarimetría completa y permite un seguimiento continuo del desarrollo vegetal y fenología de los cultivos (Yin *et al*., 2025). En este contexto, Sentinel-1 se ha consolidado como una alternativa viable incluso como sensor único en la clasificación de cultivos (Arias *et al*., 2020).

La mayoría de los estudios de clasificación de cultivos con imágenes SAR se han basado en el coeficiente de retrodispersión (o intensidad) en las polarizaciones directa (VV o HH) y/o cruzada (VH o HV) como variables de entrada al clasificador. No obstante, en los últimos años se han propuesto otras observables SAR, incluyendo índices y descriptores pseudo-polarimétricos, que proporcionan características adicionales sobre el comportamiento retrodispersivo de las cubiertas observadas sin la complejidad propia de la polarimetría completa. Estas observables han mostrado resultados prometedores para el seguimiento de distintos cultivos (Bhogapurapu *et al*., 2021, 2022; Nasirzadehdizaji *et al*., 2019; Verma *et al*., 2024). El objetivo de este trabajo es evaluar el rendimiento de un modelo de clasificación de cultivos basado en Random Forest (RF) utilizando datos Sentinel-1 (intensidad en VV y VH), y analizar si la incorporación de observables pseudo-polarimétricas aporta información adicional relevante que mejore la precisión de la clasificación.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio está situada en el suroeste de la Comunidad Foral de Navarra (España) y se corresponde con la comarca agraria VI-Ribera Alta de Aragón. En esta zona, el clima es mediterráneo, con una precipitación media anual de ~350 mm y una temperatura media de 14 °C. La altitud oscila entre 259 y 652 m s. n. m. Se trata de una de las zonas con mayor diversidad de cultivos de Navarra, destinándose alrededor del 70 % de su superficie al uso agrícola.

2.2. Imágenes satelitales

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron todas las imágenes Sentinel-1 A y B adquiridas entre el 1/09/2016 al 31/12/2017. Las imágenes se descargaron en modo *Interferometric Wide Swath* (IW) dual-pol VV-VH, como productos de nivel 1 *Ground Range Detected* (GRD). En total se utilizaron 78 imágenes de la órbita 8DESC. Los ángulos de incidencia local en la zona de estudio fueron entre 43 y 45° y la hora de adquisición de las imágenes en torno a las ~6:00 UTC.

Todas las imágenes se procesaron utilizando el *Graph Processing Toolbox* (GPT) de *SNAP Sentinel-1 Toolbox*, aplicando los siguientes pasos (Arias *et al*., 2020); 1) eliminación de ruido térmico; 2) ensamblaje de cortes; 3) actualización de órbitas; 4) calibración a β^0; 5) filtrado de moteado (Gamma-MAP 3×3); 6) corrección topográfica a γ_{TF}^0 (TF del inglés *Terrain Flattening*) y 7) Ortorrectificación. Como variables de salida se obtuvieron las imágenes coeficiente de retrodispersión γ_{TF}^0 en las polarizaciones VV y VH para un tamaño de píxel de 20 m.

2.3. Observables pseudo-polarimétricas

A partir de la imágenes Sentinel-1 ya procesadas se calcularon las observables pseudo-polarimétricas propuestas en la literatura (Tabla 1).

Tabla 1. Observables pseudo-polarimétricas.

Símbolo	Nombre	Referencia
VH/VV	Ratio de polarización cruzada	
RVI	Radar Vegetation Index	(Nasirzadehdizaji et al., 2019)
DpRVI	Dual-pol Radar Vegetation Index	(Bhogapurapu et al., 2022)
DpRBI	Dual-polarimetric Radar Built-up Index	(Verma et al., 2024)
DpRSI	Dual-polarimetric Radar Surface Index	
$\boldsymbol{P_{d-l}}$	Dihedral-like scattering power	
$\boldsymbol{P_{s-l}}$	Surface-like scattering power	
$\boldsymbol{P_r}$	Residue scattering power	
Hc	Pseudo scattering entropy	(Bhogapurapu et al., 2021)
$\boldsymbol{\theta_c}$	Pseudo scattering-angle	
mc	Co-pol purity parameter	

2.4. Datos de entrenamiento y validación

Para entrenar y validar el algoritmo de clasificación se empleó una base de datos geográfica proporcionada por Gobierno de Navarra, que incluye las declaraciones PAC correspondientes a la campaña agrícola 2016-2017, así como las inspecciones de campo realizadas en dicha campaña.

El conjunto de entrenamiento se generó a partir de una selección de parcelas representativas de cada cultivo, 36903 parcelas, según el procedimiento descrito por González-Audícana *et al*. (2020). Como conjunto de validación se utilizaron las 3687 parcelas inspeccionadas en campo, lo que permitió evaluar los resultados de la clasificación con datos no incluidos en el entrenamiento. Las parcelas de validación suponen aproximadamente el 9% de la superficie agrícola total de la comarca de estudio y se corresponden con los siguientes cultivos (indicándose entre paréntesis el número de parcelas por cultivo): avena (53), cebada (1210), trigo (502), veza (9), guisante (23), mezclas con cereal (30), arroz (105), maíz (194), tomate (33), girasol (15), alfalfa (87), espárragos (18), almendros (26), frutales (89), olivar (79), viña (185), pastos (531), superficies forestales (7) y barbecho (491).

2.5. Extracción y análisis de datos

Para cada parcela del conjunto de entrenamiento y validación se extrajeron las series temporales completas correspondientes a todas las observables analizadas. Posteriormente, se calcularon las series temporales promedio por cultivo con el fin de evaluar la correlación temporal entre observables mediante el coeficiente de correlación de Spearman (ρ).

2.6. Clasificación RF

En primer lugar, se implementó un modelo base utilizando como variables de entrada únicamente los coeficientes de retrodispersión VH y VV. Posteriormente, se generaron 11 modelos adicionales incorporando de manera individual cada observable al modelo base, con el fin de evaluar su contribución específica a la clasificación. El clasificador RF se configuró con una profundidad máxima de 40 niveles y un número de 300 estimadores, siguiendo las recomendaciones del proyecto Sen4CAP (Bontemps *et al*., 2024). Para equilibrar el número de parcelas de entrenamiento entre clases, se aplicó el método de balanceo SMOTE-Tomek (Batista *et al*., 2003). Para evaluar el rendimiento de los modelos se calcularon las métricas de fiabilidad global (FG) y el F1-score por cultivo para el conjunto de validación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Correlación entre observables

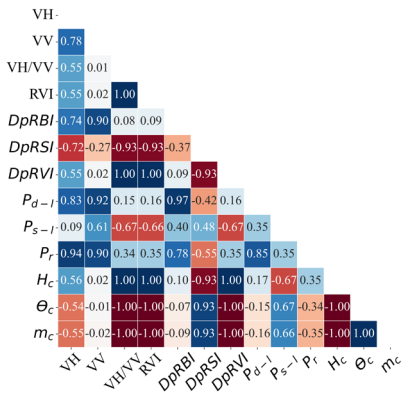


Figura 1. Matriz de correlación de Spearman.

A nivel general, la matriz de correlación (Figura 1) revela la existencia de agrupaciones de observables radar con un comportamiento muy similar o incluso idéntico. Se observan correlaciones perfectas positivas o negativas (1 o -1) entre VH/VV, RVI, DpRVI, H_c, θ_c y m_c, lo que indica redundancia en la información temporal recogida por estas observables, que básicamente aportan la misma información. Por otro lado, las observables P_r , P_{d-l} y DpRBI presentan fuertes correlaciones positivas con las intensidades VH (0.94, 0.83 y 0.74) y VV (≥ 0.9). En contraste con el resto de observables, P_{s-l} y DpRBI, presentan correlaciones promedio más bajas, indicando patrones de relación diferentes y pudiendo aportar información complementaria y menos redundante al modelo base de clasificación. Las demás observables tienen correlaciones intermedias entre ellas, en el rango de 0.5–0.7. La intensidad en VV mostró la correlación promedio más débil de todo el conjunto global.

3.2. Resultados de la clasificación RF

Tabla 2. Resultados de fiabilidad global (FG) de las clasificaciones, y su diferencial respecto al modelo base (ΔFG)

Modelo	FG	ΔFG	Modelo	FG	ΔFG
VV, VH	82.89	-	P_{d-l}	82.89	0.00
VH/VV	82.59	-0.30	P_{s-l}	82.40	-0.49
RVI	82.70	-0.19	P_r	82.42	-0.47
DpRVI	82.21	-0.68	H_c	82.42	-0.47
DpRBI	82.75	-0.14	θ_c	82.42	-0.47
DpRSI	82.56	-0.33	m_c	82.67	-0.22

Los resultados obtenidos por el modelo base (VV, VH) fueron muy positivos con una FG de casi el 83% (Tabla 2), en comparación con el 70% reportado por Eisfelder *et al*. (2024). La adición de observables pseudo-polarimétricas a este modelo base no produjo mejoras en el rendimiento del modelo de referencia, mostrando variaciones mínimas que indican un comportamiento prácticamente equivalente o ligeramente inferior. Estos resultados muestran que la información contenida en las series temporales de intensidad en VV y VH ya captura la mayor parte del poder discriminante necesario para la clasificación. El modelo que incluyó P_{d-l} fue el que obtuvo mejores resultados, manteniendo la misma FG que el modelo de referencia. Por el contrario, DpRVI mostró la mayor caída en el rendimiento (ΔFG = -0.68)

3.3. Resultados específicos por cultivo

La mayoría de los cultivos alcanzaron un alto desempeño con el modelo base, con F1 ≥ 0.8. Tomate y arroz lograron F1 = 1.00, mientras que maíz, girasol y cebada presentaron valores entre 0.91 y 0.93. Otros cultivos, como trigo y guisante, tuvieron F1 de 0.86, respectivamente, mientras que barbecho, pastos, viña y alfalfa mostraron valores moderados (entre 0.76 y 0.79). Algunos cultivos, como la veza, olivar, espárrago, frutales y avena, presentaron rendimientos bajos (F1 = 0.37, 0.49, 0.56, 0.60 y 0.63) así como las superficies forestales, con F1 de 0.14, almendros y mezclas con cereal obtuvieron valores nulos. Tendencias similares se observaron para la mayoría de cultivos en otros estudios (Arias *et al*., 2020; Ioannidou *et al*., 2022). En general, el modelo de referencia mostró un alto nivel de desempeño en la identificación de la mayoría de los cultivos principales. La Figura 2 muestra que los cultivos de invierno, particularmente avena y veza, alcanzaron mejoras moderadas respecto al modelo base al incluir alguna de las observables pseudo-polarimétricas. La veza presentó los mayores incrementos con θ_c (0.20) y RVI o H_c (0.11), mientras que la avena mostró su principal mejora con DpRVI (0.11). En contraste, almendros, guisante y mezclas con cereal únicamente evidencian incrementos puntuales en algunos modelos P_{d-l}, P_r y θ_c respectivamente, mostrando en general diferencias mínimas con respecto al modelo base. Por el

contrario, algunos cultivos mostraron descensos más acusados al incorporar determinadas observables pseudo-polarimétricas. En particular, los guisantes presentaron las mayores reducciones de rendimiento especialmente con DpRVI (-0.14), VH/VV y RVI (-0.11), y con H_c (-0.10). La veza también evidenció ligeras disminuciones en varios modelos (-0.07) como DpRBI y P_{d-l}. Estos resultados sugieren que la contribución de cada observable pseudo-polarimétrica a la clasificación depende en gran medida del tipo de cultivo y de cómo este interactúa con la señal radar.

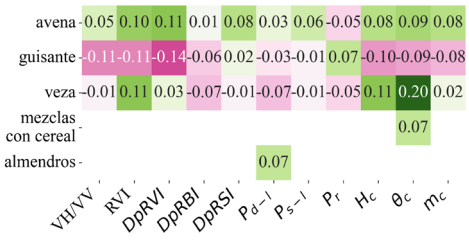


Figura 2. ΔF1-score por cultivo respecto al modelo base (VH y VV). Solo se incluyen cultivos con mejoras ≥ 0.05.

4. CONCLUSIÓN

Los resultados demuestran el potencial de las series temporales de los coeficientes de retrodispersión VV y VH de Sentinel-1 para la clasificación de cultivos, ya que estas polarizaciones contienen la mayor parte de la información discriminante. La señal principal de VH y VV es suficiente para lograr una clasificación robusta y precisa, con un rendimiento superior al 80 % utilizando RF. Las observables pseudo-polarimétricas derivadas, que se generan a partir de VH y VV, aportan un valor limitado para la clasificación, sin mejorar la fiabilidad global ni el F1-score, dado que esencialmente contienen información ya presente en las polarizaciones originales. No obstante, estas observables adicionales pueden contribuir puntualmente a una mejor detección de algunos cultivos concretos, como veza, avena, almendros o guisante, ofreciendo información complementaria aunque con un impacto reducido en términos globales.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PID2019-107386RB-I00 y PID2023-152885OB-I00 / AEI / 10.13039/501100011033 y el contrato predoctoral FPI PRE2020-092161.

6. REFERENCIAS

Arias, M., Campo-Bescós, M. Á., & Álvarez-Mozos, J. (2020). Crop Classification Based on Temporal Signatures of Sentinel-1 Observations over Navarre Province, Spain. *Remote Sensing*, *12*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/rs12020278

Batista, G., L. C. Bazzan, A., & Monard, M. C. (2003). *Balancing training data for automated annotation of keywords: A case study*. 10-18.

Bhogapurapu, N., Dey, S., Bhattacharya, A., Mandal, D., Lopez-Sanchez, J. M., McNairn, H., López-Martínez, C., & Rao, Y. S. (2021). Dual-polarimetric descriptors from Sentinel-1 GRD SAR data for crop growth assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *178*, 20-35. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.013

Bhogapurapu, N., Dey, S., Mandal, D., Bhattacharya, A., Karthikeyan, L., McNairn, H., & Rao, Y. S. (2022). Soil moisture retrieval over croplands using dual-pol L-band GRD SAR data. *Remote Sensing of Environment*, *271*, 112900. https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112900

Bontemps, S., Bajec, K., Cara, C., Defourny, P., De Vendictis, L., Heymans, D., Kucera, L., Malcorps, P., Milcinski, G., Nicola, L., Slacikova, J., Taymans, M., Tutunaru, F., & Udroiu, C. (2024). *Sen4CAP - Sentinels for Common Agricultural Policy System Software User Manual (Sen4CAP_SUM_v4.0)* (Ref Issue 4.0). ESA. http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

Eisfelder, C., Boemke, B., Gessner, U., Sogno, P., Alemu, G., Hailu, R., Mesmer, C., & Huth, J. (2024). Cropland and Crop Type Classification with Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series Using Google Earth Engine for Agricultural Monitoring in Ethiopia. *Remote Sensing*, *16*(5), 866. https://doi.org/10.3390/rs16050866

González-Audícana, M., López, S., Sola, I., & Álvarez-Mozos, J. (2020). Estrategia para la verificación de declaraciones PAC a partir de imágenes Sentinel-2 en Navarra. *Revista de Teledetección*, (56), 69. https://doi.org/10.4995/raet.2020.14128

Ioannidou, M., Koukos, A., Sitokonstantinou, V., Papoutsis, I., & Kontoes, C. (2022). Assessing the Added Value of Sentinel-1 PolSAR Data for Crop Classification. *Remote Sensing*, *14*(22), 5739. https://doi.org/10.3390/rs14225739

Nasirzadehdizaji, R., Balik Sanli, F., Abdikan, S., Cakir, Z., Sekertekin, A., & Ustuner, M. (2019). Sensitivity Analysis of Multi-Temporal Sentinel-1 SAR Parameters to Crop Height and Canopy Coverage. *Applied Sciences*, *9*(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/app9040655

Pluto-Kossakowska, J. (2021). Review on Multitemporal Classification Methods of Satellite Images for Crop and Arable Land Recognition. *Agriculture*, *11*(10), 999. https://doi.org/10.3390/agriculture11100999

Verma, A., Bhattacharya, A., Dey, S., López-Martínez, C., & Gamba, P. (2024). Rice Crop Monitoring Using Dual-Pol Sentinel-1 SLC and GRD Scattering Power Components. *IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 10826-10829. https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10641403

Yin, Q., Du, Y., Li, F., Zhou, Y., & Zhang, F. (2025). Multi-Temporal Dual Polarimetric SAR Crop Classification Based on Spatial Information Comprehensive Utilization. *Remote Sensing*, *17*(13), 2304. https://doi.org/10.3390/rs17132304

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.247

Influencia de la variabilidad varietal del arroz en la clasificación de niveles de nitrógeno mediante teledetección

Della Bellver, Fàtima [1] **Franch Gras, Belen** [1,2] **Tarin Mestre, Javier** [1] **Guerrero Benavent, Cesar José** [1] **Domingo Carrasco, Concha** [3] **Català Forner, Mar** [4] **Martí, Karen** [4] **Marqués, Luis** [5]

[1] Global Change Unit, IPL, Universitat de València, Paterna, 46980 Valencia, España

[2] Department of Geographical Sciences, University of Maryland, College Park, MD, USA

[3] Institut Valencià d'Investigacions Agràries (IVIA), Moncada, 46113 Valencia, España

[4] Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA), Amposta, 43870, Tarragona, España

[5] COPSEMAR, Sueca, 46410 Valencia, España

ORCID: Franch Gras 0000-0003-0593-7874 Català Forner 0000-0002-1026-7097

Correspondencia: fatima.della@uv.es belen.franch@uv.es tamesja@uv.es cesar.guerrero@uv.es domingo_concar@gva.es Mar.Catala@irta.cat karen.marti@irta.cat luismarques@copsemar.com

RESUMEN

El arroz (Oryza sativa L.) es un cultivo básico a nivel mundial, siendo España el segundo productor europeo. Sin embargo, el sector afronta importantes retos ambientales derivados del cambio climático y la creciente demanda de agua. Aunque la teledetección ofrece herramientas para optimizar insumos como el nitrógeno (N), muchos modelos actuales están calibrados para variedades específicas, lo que limita su aplicabilidad. Este estudio evalúa la transferibilidad de modelos de RS para monitorizar el estado de fertilización nitrogenada en un conjunto altamente heterogéneo de genotipos, localizaciones y campañas. Se realizaron ensayos en seis sitios experimentales de Valencia y Tarragona durante 2022 y 2023, incluyendo más de 170 variedades comerciales y otras en desarrollo, bajo dos dosis de N (100 y 200 kg N/ha). Las imágenes multiespectrales de UAV (MAIA S2) se utilizaron para entrenar clasificadores Random Forest, con el fin de diferenciar entre dosis de N. Los clasificadores lograron más del 85% de exactitud en varias localizaciones, mostrando que las bandas del visible son más relevantes en etapas tempranas, mientras que el infrarrojo cercano y el red-edge son clave durante todo el ciclo. El 82% de las variedades mostró alta compatibilidad con el modelo global de N. En conclusión, la monitorización del nivel de nitrógeno mediante clasificadores RF y teledetección con UAVs es robusta frente a la variabilidad genética.

Palabras clave: *Variedades de arroz, clasificación de nitrógeno, Random Forest*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 20 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Influencia de la variabilidad varietal del arroz en la clasificación de niveles de nitrógeno mediante teledetección

Della Bellver, Fàtima [(1)], Franch Gras, Belen [(1,2)], Tarin Mestre, Javier [(1)], Guerrero Benavent, Cesar José [(1)], Domingo Carrasco, Concha [(3)], Català Forner, Mar [(4)], Martí, Karen [(4)], Marqués, Luis [(5)]

[(1)] Global Change Unit, IPL, Universitat de València, Paterna Valencia, España.
fatima.della@uv.es; tamesja@uv.es ; cesar.guerrero@uv.es

[(2)] Department of Geographical Sciences, University of Maryland, USA.
0000-0003-0593-7874, belen.franch@uv.es

[(3)] Institut Valencià d'Investigacions Agràries (IVIA), Moncada Valencia, España.
domingo_concar@gva.es

[(4)] Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA), Amposta, España.
0000-0002-1026-7097, Mar.Catala@irta.cat ; karen.marti@irta.cat

[(5)] COPSEMAR, Sueca Valencia, España.
luismarques@copsemar.com

Resumen: El arroz (*Oryza sativa L.*) es un cultivo básico a nivel mundial, siendo España el segundo productor europeo. Sin embargo, el sector afronta importantes retos ambientales derivados del cambio climático y la creciente demanda de agua. Aunque la teledetección ofrece herramientas para optimizar insumos como el nitrógeno (N), muchos modelos actuales están calibrados para variedades específicas, lo que limita su aplicabilidad. Este estudio evalúa la transferibilidad de modelos de RS para monitorizar el estado de fertilización nitrogenada en un conjunto altamente heterogéneo de genotipos, localizaciones y campañas. Se realizaron ensayos en seis sitios experimentales de Valencia y Tarragona durante 2022 y 2023, incluyendo más de 170 variedades comerciales y otras en desarrollo, bajo dos dosis de N (100 y 200 kg N/ha). Las imágenes multiespectrales de UAV (MAIA S2) se utilizaron para entrenar clasificadores Random Forest, con el fin de diferenciar entre dosis de N. Los clasificadores lograron más del 85% de exactitud en varias localizaciones, mostrando que las bandas del visible son más relevantes en etapas tempranas, mientras que el infrarrojo cercano y el *red-edge* son clave durante todo el ciclo. El 82% de las variedades mostró alta compatibilidad con el modelo global de N. En conclusión, la monitorización del nivel de nitrógeno mediante clasificadores RF y teledetección con UAVs es robusta frente a la variabilidad genética.

Palabras clave: Arroz, fertilización, nitrógeno, Random Forest, UAV

Influence of rice varietal variability on nitrogen level classification using remote sensing

***Abstract**: Rice (Oryza sativa L.) is a globally important staple crop, and Spain is the second-largest producer in Europe. However, the sector faces significant environmental challenges driven by climate change and increasing water demand. Although remote sensing provides tools to optimize inputs such as nitrogen (N), many current models are calibrated for specific varieties, limiting their applicability. This study evaluates the transferability of RS-based models to monitor nitrogen fertilization status across a highly heterogeneous dataset of genotypes, locations, and seasons. Field trials were conducted at six experimental sites in Valencia and Tarragona during the 2022 and 2023 seasons, including more than 170 commercial cultivars and other on-development lines, under two N rates (100 and 200 kg N/ha). Multispectral UAV imagery (MAIA S2) was used to train Random Forest classifiers, that were applied to discriminate N rates. The classifiers achieved over 85% accuracy at several locations, showing that visible bands are more relevant at early growth stages, while near-infrared and red-edge bands remain key throughout the crop cycle. Overall, 82% of the varieties showed high compatibility with the global N classification model. In conclusion, RS-based nitrogen level monitoring is robust to genetic variability.*

***Keywords**: Rice, fertilization, Nitrogen, Random Forest, UAV*

1. INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa* L.) es un cultivo básico de importancia global. España se situó como el segundo mayor productor de la UE en 2025, con un 26% del total (Comisión Europea, 2026). El cambio climático está impactando la producción arrocera (Farooq *et al*., 2023), lo que exige sistemas más resilientes, adaptativos y tecnológicamente avanzados que usen, entre otras tecnologías, la teledetección (Shukla *et al*., 2025). En arroz, los estudios de fertilización y nutrición suelen emplear teledetección hiperespectral mediante drones (Yang *et al*., 2025), aunque también se emplean sensores multiespectrales para estos fines (Xu *et al*., 2023). La mayoría de los trabajos se centran en una variedad única, y es que varios estudios demuestran la influencia de la variedad de arroz al modelizar datos espectrales (Franch *et al*., 2021).

En este contexto, durante el proyecto BestRice, se realizó un estudio sin precedentes que incluyó 170 genotipos, principalmente japónicos, junto con otras 170 variedades en desarrollo (MAGIC) evaluadas por el IVIA. El diseño experimental implicó someter diversas parcelas a déficits y excedentes de nitrógeno (N) para evaluar las respuestas fenotípicas y las similitudes genéticas. Este artículo busca aprovechar dicho esfuerzo para estudiar los problemas de la diferenciación de la tasa de N y la predicción del rendimiento mediante teledetección, considerando a su vez la influencia de la diversidad genética del arroz y comprendiendo la transferibilidad de los modelos entre variedades. En particular, se entrena un clasificador de *Random Forest* (RF) para categorizar los campos según su nivel de fertilización y posteriormente se analiza qué variedades pueden ser englobadas en dicho clasificador general.

Se abordan las siguientes cuestiones científicas:

- ¿Se puede utilizar un clasificador RF único para monitorear el nivel de fertilización de diferentes variedades de arroz? De no ser así, ¿cuántas variedades puede capturar?

En respuesta, se proponen la siguiente hipótesis:

- Los clasificadores de niveles de fertilización serán transferibles entre variedades, ya que clasifican rangos (bajo/alto) y, además, se aplican en fases tempranas donde la respuesta al N es relativamente universal.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.1. Zona de estudio

El estudio se realizó en tres sitios experimentales en España: dos en Sueca (Valencia), gestionados por el *Institut Valencià d'Investigacions Agràries* (IVIA) y la cooperativa COPSEMAR.SL, y uno en Amposta (Tarragona), gestionado por el *Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries* (IRTA). Se evaluaron las campañas 2022 y 2023 en IRTA e IVIA, y 2023 en COPSEMAR. Los ensayos consistieron en parcelas compactas con 30 plantas trasplantadas en estado BBCH 14 (~20 DAS), bajo inundación constante (5–10 cm), con variedades replicadas a dosis de N bajo (LND) (100 kg N ha^{-1}) y alto (HND) (200 kg N ha^{-1}). El diseño contó con dos variedades testigo (*JSendra* y *Argila*), repetidas con mayor frecuencia. En IRTA y COPSEMAR se utilizaron las mismas 170 variedades comerciales, mientras que en IVIA se analizaron 170 variedades experimentales MAGIC en fase prototipo. La colección de variedades comerciales se organizó en distintos grupos genéticos (*Long grain* (LG), *Spanish* II (S-II), *American/Australian* (AA), *Spanish* I (S-I), *Old Spanish* (OS), *Asian* (As), *Italian* (It), *Índica* (Ín) y *Bomba group* (BG). Además, En IVIA 2023, el ensayo con diseño aumentado y tratamientos de fertilización se realizó dos veces, dando lugar a un total de seis ensayos experimentales (tabla 1).

Tabla 1. Datos de campo disponibles por sitio y campaña. Se indica el nombre simplificado de cada sitio (A, B, C, D, E, F) y el tipo de conjunto varietal (comercial o MAGIC)

Zona	Año	Nombre	Variedades
COPSEMAR	2023	A	Comerciales
IRTA	2022	B	
	2023	C	
IVIA	2022	D	MAGIC
	2023	E	
		F	

El número de vuelos de dron varió según el sitio; en la tabla 2 se puede apreciar la frecuencia de imágenes por zona.

2.1.2. MAIA S2

MAIA S2 es una cámara multiespectral diseñada para volar a bordo de UAVs con 9 sensores en bandas VIS-NIR equivalentes a Sentinel-2 y resolución de 3 × 3 cm^2 (a 60 m de altura). Las imágenes se procesaron usando *MAIA 1.4.JAG* y *Argisoft Metashape,* utilizando una lona de calibración (*tarp*) con valores de reflectancia conocidos para garantizar la corrección radiométrica.

2.1.3. Normalización por GDD

Se utilizan los Grados Día Acumulados ($\mathbf{GDD_{accum}}$) (ec. 1, 2, 3, 4) para normalizar las series temporales de reflectancia y poder comparar temporadas diferentes mediante la alineación temporal de sus estados fenológicos (Song *et al*., 2022).

$$\mathrm{GDD_{accum}}\ (\mathrm{day}) = \sum_{d\,=\,biofix\ date}^{day} GDD_d \tag{1}$$

$$GDD_d = \frac{T^*_{min,d} + T^*_{max,d}}{2} - T_{low} \tag{2}$$

$$T^*_{max,d} = \begin{cases} T_{max,d}\ if\ T_{low} < T_{max,d} < T_{high} \\ T_{low}\ \ if\ T_{max,d} \le T_{low} \\ T_{high}\ if\ T_{max,d} \ge T_{high} \end{cases} \tag{3}$$

$$T^{*}_{max,d} = \begin{cases} T_{min,d} \; if \; T_{low} < T_{min,d} < T_{high} \\ T_{low} \; if \; T_{min,d} \leq T_{low} \\ T_{high} \; if \; T_{min,d} \geq T_{high} \end{cases} \quad (4)$$

$\boldsymbol{T_{max,d}}$ y $\boldsymbol{T_{min,d}}$ corresponden a las temperaturas máximas y mínimas diarias obtenidas del producto diario *2m air temperature* de ERA5-Land, con una resolución espacial de 0.1º. $\boldsymbol{T_{low}}$ y $\boldsymbol{T_{high}}$ son umbrales térmicos del cultivo; por encima de $\boldsymbol{T_{high}}$ la acumulación diaria se satura. Debido a la alta diversidad varietal, se simplificó el enfoque de Song *et al*. (2022) estableciendo los valores de 10 °C ($\boldsymbol{T_{low}}$) y 35 °C ($\boldsymbol{T_{high}}$). Se definieron periodos basados en intervalos de $\mathbf{GDD_{accum}}$, con la notación BX_p, donde X es la banda de MAIA S2 y p el número de periodo; cada p corresponde a un rango específico de GDD (tabla 2).

Tabla 2. Correspondencia entre el periodo y el intervalo de GDD_{accum} por localización. También se incluyen los Días Después de la Siembra (DAS) para contextualizar los datos dentro del ciclo del cultivo.

p	GDD	DAS	A	B	C	D	E	F
1	< 300	~30-35			I			
2	[300, 400)	~40			I			I
3	[400, 500)	~45-50	I		I		I	I
4	[500, 600)	~50-55	I				I	
5	[600, 700)	~60-70			I			
6	[700, 800)	~60-70				I		
7	[800, 890)	~60-70						I
8	[890, 980)	~70-80			I	I	I	
9	[980, 1090)	~8090		I				
10	[1090, 1150)	~80-90				I		
11	[1150, 1200)	~90			I			
12	[1200, 1270)	~90-100	I	I			I	
13	[1270, 1390)	~95-105		I				I
14	[1390, 1500)	~105-115	I			I	I	I
15	>= 1500	~115					I	

2.1.4. Random Forest

Los RF se construyen por zona, entrenando con todas las bandas, incorporadas progresivamente por periodo y aplicando un *K-fold* de 3 iteraciones. Previamente se optimizan los hiperparámetros con *GridSearchCV* y se seleccionan las bandas con importancia SHAP >50%. Los parámetros para la validación son el *accuracy*, el *recall* y el *F1-Score*. Además, considerando todos los RF generados, se establece el criterio de aceptación de variedades, donde una variedad es aceptada si al menos el 70% de sus observaciones fueron correctamente clasificadas.

3. RESULTADOS

La Tabla 3 muestra el rendimiento de modelos por sitio y campaña, por simplicidad, se presentan los resultados de las últimas iteraciones, donde se consideran todos los periodos. El mejor desempeño se obtiene en el experimento E, con valores de F1 y *accuracy* de hasta 0,92 y *recalls* entre 0,91–0,97. F también presenta resultados destacados (~0,90), mientras que el peor rendimiento corresponde al sitio D (*accuracy* máximo de 0,73). En cuanto a la importancia espectral, en general las bandas del visible (B01–B04) solo dominan en etapas tempranas, mientras que NDVI, B09, B08, B07 y B06 resaltan en todo el ciclo, ganando relevancia en fases medias y finales.

Respecto a la tolerancia de los modelos a diferentes variedades, en la figura 1 se muestran las tasas de aceptación por grupo genético, indicando tanto el número de variedades como el porcentaje de acierto en cada caso. En general, la mayoría de los grupos presentan valores elevados, con una aceptación global del 82,2%. Destacan especialmente *Spanish I* (88,2%), MAGIC (87,4%), *Indica* (85,7%) e *Italian* (84,6%), mientras que los porcentajes más bajos corresponden a *Old Spanish* (66.7,0%), *Spanish II* (76,9%), *Bomba group* (75%) y las variedades sin grupo genético definido (*Non group:* 63,2%). En conjunto, los resultados reflejan un buen desempeño del modelo en la mayoría de los grupos varietales.

Tabla 3. Modelos *Random Forest* por ensayo y periodo, mostrando los F1-score, *accuracy* y *recall* (para LND y HND) medios, así como su desviación estándar (provenientes del K-fold).

Z	Bandas			F1	Recall LND	Recall HND
	Inicio	Medio	Final			
A	1, 2, 3, 4			0.78 ± 0.016	0.73 ± 0.049	0.84 ± 0.032
B		7, 8, 9, NDVI		0.8 ± 0.015	0.85 ± 0.079	0.76 ± 0.049
C	1, 2, 3, 4, 5, 8			0.85 ± 0.03	0.87 ± 0.035	0.83 ± 0.051
D			6,7,8 ,9	0.73 ± 0.029	0.77 ± 0.07	0.7 ± 0.015
E	1	9, NDVI	6, 7, 8, 9	0.92 ± 0.052	0.91 ± 0.057	0.93 ± 0.045
F	1, 6, 7, 8,	7, 8, 9, NDVI		0.92 ± 0.024	0.92 ± 0.058	0.93 ± 0.018

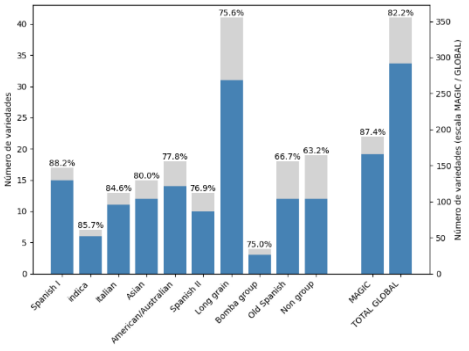


Figura 1. Proporción de variedades de cada grupo consideradas correctamente clasificadas

4. DISCUSIÓN

Los resultados del *Random Forest* muestran que las bandas del visible (VIS) predominan en fases tempranas, mientras que el *Red Edge* (RE) y el NIR aparecen a lo largo de todo el ciclo. Sin embargo, la importancia espectral varía según la zona, la campaña y el conjunto varietal, evidenciando una fuerte dependencia espacial y genética. Esta diferencia en la importancia de las

distintas regiones del espectro se reproduce en varios estudios: Yang *et al*. (2025) encontró que en la fase reproductiva los índices de vegetación que implican bandas VIS y RE-NIR, y otros que incluyen RE-NIR, fueron más influyentes, lo que demuestra que combinar VIS-RE-NIR de mitad y final del ciclo es efectivo. Además, otros estudios también encontraron que los índices derivados de VIS, RE y NIR muestran buena correlación con variables relacionadas con el N (Xu *et al*., 2023; Tripathi *et al*., 2025), así como que el NDVI no aparece como una banda única y fiable, igual que en esta investigación. Los patrones de bandas dependen fuertemente del ensayo, ya que estos se realizaron en diferentes campañas y zonas, e incluyen dos conjuntos distintos de variedades: A, B y C contienen variedades comerciales, mientras que D, E y F incluyen variedades en desarrollo. La combinación temporal, espacial y genética de los conjuntos de datos analizados supone una ventaja, dada su falta de precedentes, pero también introduce limitaciones, ya que identificar patrones comunes en condiciones heterogéneas es inherentemente complejo. Resultados comparables se obtuvieron en estudios como el desempeñado por Colorado *et al*. (2020), donde utilizando ocho variedades en un mismo sitio y campaña, concluyeron que además de evaluar la dinámica del N según el estado fenológico, es crucial identificar y clasificar las plantas según su genotipo, dado que el nitrógeno es sensible a diferentes variables como el consumo de oxígeno y crecimiento radicular. Los resultados de la Figura 1 muestran que el 82% de las variedades pueden ser toleradas por los modelos RF. No obstante, al analizar la procedencia genética de las variedades aceptadas, se observa que aunque algunas familias contienen más variedades toleradas, todas contienen tanto casos aceptados como no aceptados, lo que indica que el desempeño del modelo no depende exclusivamente del genotipo. Por tanto, además del origen genético, pueden intervenir otros factores agronómicos, ambientales y fenotípicos en el rendimiento de los modelos RF de clasificación nutricional. Dado el alto porcentaje de variedades toleradas (82%), la hipótesis principal queda validada. Esto demuestra que la clasificación del nitrógeno (N) puede realizarse sin que el genotipo sea un factor necesariamente limitante. Además, estos hallazgos responden a la primera pregunta de investigación al demostrar que los modelos Random Forest pueden clasificar con éxito las dosis de N en diferentes genotipos sin una pérdida significativa de rendimiento.

5. CONCLUSIONES

La implementación de la metodología GDD proporciona un marco para la agrupación temporal de datos, permitiendo la integración de diferentes campañas. Al utilizar clasificadores *Random Forest* para diferenciar entre dosis de N, resultados revelan patrones de importancia espectral a lo largo del ciclo: el visible (VIS) es esencial en las primeras fases, mientras que Red Edge (RE) y NIR mantienen relevancia durante todo el ciclo del cultivo. Aunque un hallazgo crítico es la falta de homogeneidad de los modelos entre ensayos. Aunque las grandes regiones espectrales muestran patrones consistentes, estos no se traducen en bandas individuales concretas. Los clasificadores RF de niveles de N pueden tolerar un elevado número de variedades, lo cual responde a la primera pregunta de investigación, al demostrar que los modelos de clasificación RF pueden discriminar dosis de N en genotipos diversos sin pérdida significativa de rendimiento, validando así la primera hipótesis. Este estudio demuestra que se pueden integrar diversos genotipos de arroz dentro de un mismo esquema de monitorización nutricional.

6. AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte del programa Best Rice y ha sido respaldado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN).

7. REFERENCIAS

Colorado, J. D., Cera-Bornacelli, N., Caldas, J. S., Petro, E., Rebolledo, M. C., Cuellar, D., Calderon, F., Mondragon, I. F., & Jaramillo-Botero, A. (2020). Estimation of Nitrogen in Rice Crops from UAV-Captured Images. *Remote Sensing, 12*(20), 3396. https://doi.org/10.3390/rs12203396

Farooq, M. S., Fatima, H., Rehman, O. U., Yousuf, M., Kalsoom, R., Fiaz, S., Khan, M. R., Uzair, M., & Huo, S. (2023). Major challenges in widespread adaptation of aerobic rice system and potential opportunities for future sustainability. *South African Journal of Botany, 159*, 231–251. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.06.017

Franch, B., Bautista, A. S., Fita, D., Rubio, C., Tarrazó-Serrano, D., Sánchez, A., Skakun, S., Vermote, E., Becker-Reshef, I., & Uris, A. (2021). Within-Field Rice Yield Estimation Based on Sentinel-2 Satellite Data. *Remote Sensing, 13*(20), 4095. https://doi.org/10.3390/rs13204095

Shukla, S., Chaudhary, K., Aahana, Phutela, S., Bhutani, R., & Shukla, S. K. (2025). Smart crop varieties and precision agriculture: A way ahead for climate-resilient sustainable agriculture. Kumar, O. O. Babalola, J. S. Panwar, & G. Santoyo (Eds.), *Climate change and agricultural ecosystems* (2.ª ed., pp. 435–466). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26520-4.00027-5

Tripathi, R., Tripathy, B. R., Jena, S. S., Swain, C. K., Mohanty, S., Sahoo, R. N., Mohapatra, S. D., & Nayak, A. K. (2025). Predicting nitrogen content in rice using unmanned aerial vehicle based multispectral imaging. CLEAN – Soil, Air, *Water, 53*(10), Article e70048. https://doi.org/10.1002/clen.70048

Xu, S., Xu, X., Zhu, Q., Wang, M., & Guo, Y. (2023). Monitoring leaf nitrogen content in rice based on information fusion of multi-sensor imagery from UAV. Precision *Agriculture, 24*(6), 2327–2349. https://doi.org/10.1007/s11119-023-10042-8

Yang, M.-D., Hsu, Y.-C., Chen, Y.-H., Yang, C.-Y., & Li, K.-Y. (2025). Precision monitoring of rice nitrogen fertilizer levels based on machine learning and UAV multispectral imagery. *Computers and Electronics in Agriculture, 237*, 110523. https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110523

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.266

Optimización del momento de vuelo UAV y selección de predictores para estimar el vigor vegetativo (peso de poda) en viñedos

García-Guerra, Jose [1] **Burchard-Levine, Vicente** [2] **Borra-Serrano, Irene** [1] **Dorado, José** [1] **de Castro, Ana** [3] **Peña, José Manuel** [1]

[1] Tech4AGRO. Instituto de Ciencias Agrarias (ICA). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

[2] Laboratorio De Espectro-Radiometría Y Teledetección Ambiental (SpecLab), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

[3] Instituto de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC)

ORCID: García-Guerra 0000-0003-2822-093X Burchard-Levine 0000-0003-0222-8706 Borra-Serrano 0000-0003-3444-3099 Dorado 0000-0002-2268-2562 de Castro 0000-0002-6699-2204 Peña 0000-0003-4592-3792

Correspondencia: jose.g.guerra@csic.es vicente.burchard@cchs.csic.es irene.borra@ica.csic.es jose.dorado@csic.es ana.decastro@csic.es jmpena@ica.csic.es

RESUMEN

El peso de poda (pruning weight, PW) es un indicador integrado del vigor vegetativo de la vid y una variable clave en viticultura de precisión por su relación con el equilibrio vegetativo–productivo y la delimitación de zonas de manejo. La teledetección con UAV permite estimar PW de forma no destructiva a escala intraparcela, pero persisten interrogantes sobre: (i) la ventana fenológica óptima de adquisición, (ii) la configuración de predictores que mejor equilibre precisión y parsimonia y (iii) la robustez de los modelos bajo transferencia entre viñedos con distinto cultivar y manejo. Evaluamos cuatro campañas (2019–2020 y 2022–2023) con siete fechas de vuelo en dos viñedos mediterráneos contrastantes. A partir de imágenes RGB y multiespectrales se derivaron métricas estructurales del dosel (área, altura y volumen) e índices espectrales. Se aplicó un flujo de regresión lineal múltiple con selección anidada y validación externa repetida, seguido de un análisis LOSO. El desempeño para PW mostró un patrón fenológico consistente, con máximos en fases tardías (envero–reblandecimiento de la baya). Las métricas estructurales, en particular el volumen del dosel, dominaron las especificaciones finales y alcanzaron R^2 de hasta 0.73 en validación externa dentro de cada viñedo. Bajo transferencia estricta, PW mantuvo R^2 moderados (0.59–0.71), aunque con diferencias en error relativo. En conjunto, los resultados apoyan vuelos en fases tardías y el uso de un predictor estructural mínimo (volumen del dosel) derivado de RGB como estrategia parsimoniosa para estimar PW.

Palabras clave: *UAV, viticultura de precisión, fenología, volumen del dosel, fotogrametría SfM*

Fecha de recepción: 19 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Optimización del momento de vuelo UAV y selección de predictores para estimar el vigor vegetativo (peso de poda) en viñedos

García-Guerra, Jose [1], Burchard-Levine, Vicente [2], Borra-Serrano, Irene [1], Dorado, José [1], de Castro, Ana [3], Peña, José Manuel [1]

[1] Tech4AGRO. Instituto de Ciencias Agrarias (ICA). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

0000-0003-2822-093X, jose.g.guerra@csic.es ; 0000-0003-3444-3099, irene.borra@ica.csic.es

0000-0002-2268-2562, jose.dorado@csic.es ; 0000-0003-4592-3792, jmpena@ica.csic.es

[2] Laboratorio De Espectro-Radiometría Y Teledetección Ambiental (SpecLab), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

0000-0003-0222-8706, vicente.burchard@cchs.csic.es

[3] Instituto de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC).

0000-0002-6699-2204, ana.decastro@csic.es

Resumen: El peso de poda (pruning weight, PW) es un indicador integrado del vigor vegetativo de la vid y una variable clave en viticultura de precisión por su relación con el equilibrio vegetativo–productivo y la delimitación de zonas de manejo. La teledetección con UAV permite estimar PW de forma no destructiva a escala intraparcela, pero persisten interrogantes sobre: (i) la ventana fenológica óptima de adquisición, (ii) la configuración de predictores que mejor equilibre precisión y parsimonia y (iii) la robustez de los modelos bajo transferencia entre viñedos con distinto cultivar y manejo. Evaluamos cuatro campañas (2019–2020 y 2022–2023) con siete fechas de vuelo en dos viñedos mediterráneos contrastantes. A partir de imágenes RGB y multiespectrales se derivaron métricas estructurales del dosel (área, altura y volumen) e índices espectrales. Se aplicó un flujo de regresión lineal múltiple con selección anidada y validación externa repetida, seguido de un análisis LOSO. El desempeño para PW mostró un patrón fenológico consistente, con máximos en fases tardías (envero–reblandecimiento de la baya). Las métricas estructurales, en particular el volumen del dosel, dominaron las especificaciones finales y alcanzaron R^2 de hasta 0.73 en validación externa dentro de cada viñedo. Bajo transferencia estricta, PW mantuvo R^2 moderados (0.59–0.71), aunque con diferencias en error relativo. En conjunto, los resultados apoyan vuelos en fases tardías y el uso de un predictor estructural mínimo (volumen del dosel) derivado de RGB como estrategia parsimoniosa para estimar PW.

Palabras clave: UAV, viticultura de precisión, fenología, volumen del dosel, fotogrametría SfM

Optimising UAV flight timing and predictor selection for estimating vegetative vigour (pruning weight) in vineyards

***Abstract**: Pruning weight (PW) is an integrated indicator of grapevine vegetative vigour and a key variable in precision viticulture due to its relationship with vegetative–productive balance and vigour-based management zoning. UAV-based remote sensing enables non-destructive PW estimation at intra-block scale; however, uncertainties remain regarding: (i) the optimal phenological acquisition window, (ii) the predictor configuration that best balances accuracy and parsimony, and (iii) model robustness under cross-vineyard transfer across different cultivars and management systems. We evaluated four seasons (2019–2020 and 2022–2023) with seven flight dates in two contrasting Mediterranean vineyards. Structural canopy metrics (area, height, and volume) and spectral indices were derived from RGB and multispectral imagery. A nested multiple linear regression workflow with repeated external validation was applied, followed by strict leave-one-site-out (LOSO) analysis. PW prediction showed a consistent phenological pattern, with highest performance at late stages (véraison–berry softening). Structural metrics, particularly canopy volume, dominated the final model specifications and achieved R^2 values of up to 0.73 under external validation within each vineyard. Under strict transfer, PW retained moderate R^2 (0.59–0.71), albeit with differences in relative error. Overall, the results support late-season flights and the use of a minimal structural predictor (canopy volume) derived from RGB as a*

parsimonious strategy for PW estimation.

***Keywords**: UAV, precision viticulture, phenology, canopy volume, SfM photogrammetry*

1. INTRODUCCIÓN

El vigor vegetativo de la vid condiciona el equilibrio crecimiento–producción y, con ello, el rendimiento, la calidad y las necesidades de manejo. El peso de poda en reposo invernal (*pruning weight*, PW) es el indicador de referencia del vigor, al integrar la biomasa anual producida y reflejar el balance vegetativo–reproductivo; no obstante, su medición manual es laboriosa y difícil de escalar, lo que ha motivado su estimación espacial mediante teledetección (Dobrowski *et al*., 2003). En viñedos en hileras, la mezcla suelo–dosel y la resolución espacial pueden limitar la sensibilidad de sensores de menor resolución (p. ej., satelitales) (Matese *et al*., 2015). En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) proporcionan imágenes centimétricas y productos tridimensionales derivados de fotogrametría (Structure-from-Motion, SfM), ofreciendo una vía no destructiva para estimar PW a escala intraparcela (Matese & Di Gennaro, 2021). En trabajos previos, PW se ha estimado mediante índices espectrales (p. ej., NDVI sobre píxeles de dosel) y/o métricas estructurales obtenidas de productos 3D (p. ej., volumen de dosel) (García-Fernández *et al*., 2021; Marques *et al*. 2025; Matese & Di Gennaro, 2021). Sin embargo, en términos operativos sigue siendo necesario definir cuándo adquirir los datos a lo largo del ciclo fenológico y qué configuración de sensores/predictores es suficiente (RGB, multiespectral o mixta). Además, la mayoría de estudios que estiman PW se realizan en un único viñedo o campaña, sin cuantificar su robustez bajo transferencia a contextos agronómicos distintos. Aquí abordamos estas lagunas mediante una evaluación multi-año y multi-sitio en dos viñedos con distinto cultivar y manejo, y con siete vuelos UAV desde floración hasta cosecha usando sensores RGB y multiespectral, con el objetivo de: (i) identificar el momento óptimo de vuelo UAV para estimar PW, (ii) comparar el desempeño de modelos basados en predictores RGB, multiespectrales y mixtos, y (iii) evaluar la transferibilidad del modelo bajo cambio de dominio entre viñedos con distinto cultivar y manejo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la finca experimental “El Socorro” (Colmenar de Oreja, Madrid; 40°07′58″N, 3°22′33″W; 755 m s.n.m.), con clima mediterráneo continental semiárido (T media anual 13,7 °C; P media anual 421 mm). Se estudiaron dos viñedos experimentales (Parcela A, Parcela B), ambos conducidos en cordón Royat bilateral y con riego por goteo, con ensayos organizados mediante un diseño en bloques completos aleatorizado, pero con distinto cultivar y periodo de estudio. La Parcela A (Tempranillo; 0.67 ha) corresponde a un ensayo de manejo del suelo establecido en 2008 (6 tratamientos, 4 bloques; 24 unidades experimentales). La Parcela B (Petit Verdot; 0.5 ha) corresponde a un ensayo de riego establecido en 2021 (3 tratamientos, 3 bloques; 9 unidades experimentales). En ambas parcelas se fijaron tres puntos de muestreo por unidad experimental (Parcela A, n = 72; Parcela B, n = 27). Cada punto abarcó un conjunto fijo de cepas consecutivas (cuatro en la Parcela A y tres en la Parcela B). El peso de poda (PW) se midió durante el reposo invernal, recolectando en cada punto los sarmientos retirados y pesándolos en campo con una báscula calibrada. En cada fecha de vuelo se registró la fenología en campo a nivel de punto de muestreo mediante la escala BBCH (Lorenz *et al*., 1995). La localización de los puntos de muestreo se georreferenció mediante GNSS diferencial para asegurar la correspondencia espacial con las variables derivadas de UAV a lo largo de todas las fechas de vuelo y años.

En cada parcela se realizaron siete vuelos por año durante dos años consecutivos (Parcela A: 2019–2020; Parcela B: 2022–2023), a intervalos aproximados de dos semanas, desde el final de la floración de la vid hasta la vendimia. Las imágenes se adquirieron con UAV multirrotor equipados con sensor RGB (Sony ILCE-6300L en la Parcela A y DJI Zenmuse P1 en la Parcela B) y sensor multiespectral Parrot Sequoia+ en ambos casos. Los vuelos se realizaron a alturas comprendidas entre 15 y 40 m, con solapes frontales y laterales $\geq$70%. El procesado SfM se llevó a cabo con Agisoft PhotoScan (Parcela A) y OpenDroneMap (Parcela B).

La segmentación del dosel se realizó mediante análisis de imagen basado en objetos (OBIA) en eCognition Developer, siguiendo el protocolo descrito por de Castro *et al*. (2018). Para cada fecha de vuelo se generó un modelo de altura del dosel (CHM) como diferencia entre el DSM y el DTM (CHM = DSM − DTM), y se delimitaron objetos de dosel mediante reglas para separar el dosel de la vid del fondo. A partir de dichos objetos se extrajeron tres métricas estructurales por fecha de vuelo, agregadas a escala de punto de muestreo: área (CA), altura (CH) y volumen del dosel (CV), como proxy tridimensional del desarrollo estructural del dosel (Tabla 1). A partir de los ortomosaicos multiespectrales se calcularon cuatro índices espectrales (GNDVI, GRVI, NDVI, NDRE), cuyas definiciones se recogen en la Tabla 1. Los índices se calcularon a nivel de píxel y se restringieron a los objetos del dosel segmentados mediante OBIA (Sección 2.4) para minimizar la mezcla dosel–fondo; posteriormente, para cada punto de muestreo y fecha de vuelo, se agregaron como el valor medio dentro del objeto de dosel correspondiente.

El análisis se centró en la estimación de PW a partir de predictores derivados de UAV. La modelización se realizó mediante regresión lineal múltiple, seleccionada por su parsimonia, interpretabilidad y estabilidad bajo tamaños muestrales moderados. Se compararon tres configuraciones de predictores: modelos basados en sensor RGB, utilizando métricas estructurales derivadas de SfM (CA, CH y CV); modelos basados en sensor multiespectral, utilizando índices espectrales; y modelos mixtos, combinando predictores estructurales y espectrales. La optimización del momento de vuelo se abordó evaluando el desempeño predictivo en cada fecha disponible y seleccionando, dentro de cada

configuración, especificaciones parsimoniosas, evitando combinaciones redundantes de predictores altamente colineales. El desempeño se estimó mediante validación externa repetida (50 repeticiones; 75/25 entrenamiento–test), con divisiones estratificadas por año dentro de cada viñedo para asegurar que ambos años estuvieran representados en entrenamiento y test en cada repetición.

Tabla 1. Predictores derivados de UAV empleados en el análisis

Tipo	Sensor	Predictor	Definición / Fórmula
Estructural	RGB	CA	Área proyectada horizontal del objeto del dosel (m^2)
Estructural	RGB	CH	Media del CHM dentro del objeto (m)
Estructural	RGB	CV	Integración del CHM sobre el área proyectada del dosel ($\sum CHM_i \cdots A_{pixel}$) ($m^3$)
Espectral	Multiespectral	GNDVI	(NIR − G) / (NIR + G)
Espectral	Multiespectral	GRVI	(G − R) / (G + R)
Espectral	Multiespectral	NDRE	(NIR − RE) / (NIR + RE)
Espectral	Multiespectral	NDVI	(NIR − RED) / (NIR + RED)

El rendimiento se cuantificó mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio relativo (rRMSE), expresado como porcentaje respecto a la media observada. Con el fin de evaluar la generalización entre parcelas bajo un criterio operativo único, se definió una configuración común (fecha de vuelo y conjunto de predictores) seleccionada por su desempeño equilibrado en parcelas. Para cada candidato, el rendimiento se resumió mediante la mediana de R^2 y rRMSE en el conjunto de repeticiones dentro de cada parcela, y la configuración común se escogió maximizando el desempeño combinado entre parcelas (promedio no ponderado de las medianas de R^2 y rRMSE), priorizando configuraciones parsimoniosas cuando el desempeño fue similar. La capacidad de generalización entre parcelas se evaluó mediante un esquema leave-one-site-out (LOSO), entrenando el modelo íntegramente en una parcela y evaluándolo sin recalibración en la otra, utilizando en ambos casos la configuración común previamente definida. Este procedimiento permitió cuantificar la robustez del modelo frente a cambios de contexto (cultivar, manejo y año de adquisición). Todos los análisis se realizaron en R (R Core Team, 2024).

3. RESULTADOS

El desempeño predictivo del PW varió con el estado fenológico en ambas parcelas (Fig. 1), alcanzando un máximo en la fecha de vuelo 6 (BBCH 8, maduración). Este patrón fue consistente entre parcelas. En esa fecha, los modelos basados en métricas estructurales derivadas de SfM (STR) alcanzaron los valores más altos de R^2 en validación externa en ambas parcelas (Fig. 1). Los modelos basados únicamente en índices espectrales (SPC) mostraron un rendimiento extremadamente bajo en ambas parcelas, y los modelos mixtos (STR_SPC) no mejoraron de forma consistente respecto a STR (Fig. 1). Bajo el criterio operativo común se seleccionó la fecha de vuelo 6 y, en esa fecha, una especificación univariable basada en el volumen de dosel (CV). La Figura 2 muestra el desempeño de este modelo (CV; fecha 6) en validación externa repetida (50 repeticiones; 75/25), con mayor ajuste en la Parcela A (R^2 = 0.70; rRMSE = 22.8%) que en la Parcela B (R^2 = 0.53; rRMSE = 46.0%). En la transferencia estricta LOSO, R^2 fue 0.59 (A→B) y 0.71 (B→A), con rRMSE elevados y asimétricos (94.8% y 56.4%, respectivamente; Tabla 2). La regresión de calibración Observado ~ Predicho mostró interceptos distintos de 0 y pendientes cercanas a 1 en ambas direcciones (A→B: α = 0.096, β = 1.052; B→A: α = −0.091, β = 0.950).

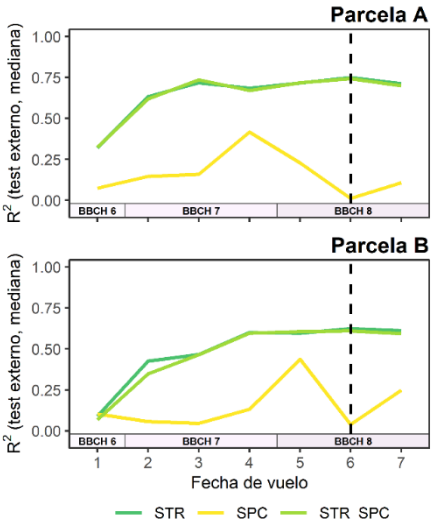


Figura 1. Desempeño (R^2 en test externo; mediana de 50 repeticiones) de modelos para estimar PW a lo largo de siete fechas de vuelo en dos parcelas experimentales (A y B), comparando predictores estructurales (STR), espectrales (SPC) y combinados (STR_SPC). Las bandas indican el estado fenológico de la vid según la escala BBCH (6: floración; 7: desarrollo del fruto; 8: maduración) y la línea discontinua la fecha de vuelo seleccionada como configuración operativa común.

4. DISCUSIÓN

Los resultados muestran una dependencia fenológica marcada en la estimación de PW mediante UAV, con el máximo desempeño en BBCH 8 (fecha 6). Este patrón es coherente con el carácter acumulativo del peso de poda. A medida que avanza el ciclo vegetativo, las métricas estructurales capturan un dosel más desarrollado y

próximo a su máximo desarrollo, con una progresiva estabilización del crecimiento vegetativo y, en consecuencia, más alineado con el vigor acumulado que integra el PW.

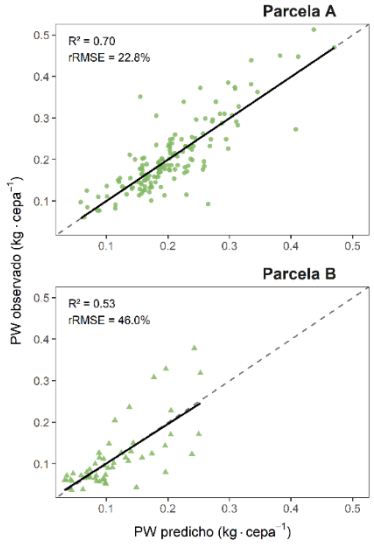


Figura 2. Relación entre PW observado y predicho (kg·cepa⁻¹) en la fecha de vuelo 6 en las dos parcelas analizadas. Cada punto representa un punto de muestreo; la línea discontinua indica 1:1 y la continua el ajuste lineal. Se muestran R² y rRMSE (%) calculados a partir de las predicciones medias del modelo ganador basado en CV (fecha 6).

Tabla 2. Transferibilidad estricta (LOSO) para PW, con α (intercepto) y β (pendiente) obtenidos de la regresión de calibración Observado ~ Predicho en el conjunto de validación

Train → Test	R²	rRMSE (%)	α	β
A → B	0.59	94.8	0.096	1.052
B → A	0.71	56.4	−0.091	0.950

La comparación entre familias de predictores indica un dominio claro de la información estructural: en la fecha óptima, los modelos espectrales mostraron un rendimiento inferior y su combinación con predictores estructurales no produjo mejoras consistentes. En línea con García-Fernández *et al*. (2021) y Marques *et al*. (2025), el volumen del dosel (CV) emerge como un descriptor parsimonioso e informativo para estimar PW a escala intraviñedo; sin embargo, a diferencia de estos trabajos, nuestro diseño multitemporal permite identificar explícitamente la ventana fenológica óptima y evaluar su estabilidad bajo transferencia estricta entre viñedos, pese al uso de distintos sensores RGB y flujos SfM, que podrían introducir variabilidad en métricas estructurales como el CHM o el volumen de dosel. Bajo transferencia estricta (LOSO), R² se mantuvo en rangos moderados–altos, mientras que los rRMSE fueron elevados y distintos entre direcciones, compatibles con sesgos de calibración entre viñedos que limitan la portabilidad sin recalibración, especialmente para estimaciones absolutas de PW. En particular, la relación Observado ~ Predicho mostró pendientes próximas a 1, pero interceptos desplazados ($\alpha \approx \pm 0.09$), lo que indica un desajuste dominado por diferencias de nivel. En consecuencia, la transferencia podría ser suficiente para zonificación relativa del vigor, mientras que la estimación cuantitativa absoluta de PW requeriría un ajuste de recalibración.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por los proyectos PID2023-150108OB-C31 y PID2023-150108OB-C32 del MCIU/AEI (https://doi.org/10.13039/501100011033) y el FSE+, así como por el proyecto ECOdigital (ref. MMT2 4-ICA-01) del programa MOMENTUM del CSIC y NextGenerationEU, a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR).

6. REFERENCIAS

De Castro, A. I., Jiménez-Brenes, F. M., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Borra-Serrano, I., & López-Granados, F. (2018). 3-D Characterization of Vineyards Using a Novel UAV Imagery-Based OBIA Procedure for Precision Viticulture Applications. *Remote Sensing, 10*(4), 584. https://doi.org/10.3390/rs10040584

Dobrowski, S. Z., Ustin, S. L., & Wolpert, J. A. (2003). Grapevine dormant pruning weight prediction using remotely sensed data. Australian J*ournal of Grape and Wine Research, 9*(3), 177-182. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2003.tb00267.x

García-Fernández, M., Sanz-Ablanedo, E., Pereira-Obaya, D., & Rodríguez-Pérez, J. R. (2021). Vineyard Pruning Weight Prediction Using 3D Point Clouds Generated from UAV Imagery and Structure from Motion *Photogrammetry. Agronomy, 11*(12), Article 12. https://doi.org/10.3390/agronomy11122489

Lorenz, D. H., Eichhorn, K. W., Bleiholder, H., Klose, R., Meier, U., & Weber, E. (1995). Growth Stages of the Grapevine: Phenological growth stages of the grapevine (Vitis vinifera L. ssp. vinifera)—Codes and descriptions according to the extended BBCH scale†. *Australian Journal of Grape and Wine Research, 1*(2), 100-103. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.1995.tb00085.x

Marques, P., Ferreira, L., Adão, T., Sousa, J. J., Morais, R., Peres, E., & Pádua, L. (2025). Integrating UAV Multi-Temporal Imagery and Machine Learning to Assess Biophysical Parameters of Douro Grapevines. *Remote Sensing, 17(*23), 3915. https://doi.org/10.3390/rs17233915

Matese, A., & Di Gennaro, S. F. (2021). Beyond the traditional NDVI index as a key factor to mainstream the use of UAV in precision viticulture. *Scientific Reports, 11*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81652-3

Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., Belli, C., Zaldei, A., Bianconi, R., & Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote Sensing, 7*(3), 2971-2990. https://doi.org/10.3390/rs70302971

R Core Team, 2024. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.277

Integración de la Teledetección y la modelización de la Eficiencia en el Uso de la Luz (LUE) para la estimación regional a largo plazo del rendimiento de trigo

Bozorgi, Mahsa [1,2] **Cristóbal, Jordi** [2] **Casadesus, Jaume** [1]

[1] Institute of AgriFood, Research and Technology (IRTA)

[2] Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)

ORCID: Bozorgi 0009-0006-2935-2597 Cristóbal 0000-0001-6244-4289 Casadesus 0000-0001-7036-8212

Correspondencia: mahsa.bozorgi@irta.cat jordi.cristobal@uab.cat jaume.casadesus@irta.cat

RESUMEN

La estimación regional del rendimiento de los cultivos es esencial para evaluar la productividad agrícola y orientar estrategias de gestión adaptativa al clima. La Teledetección ofrece observaciones coherentes y de largo plazo sobre la dinámica de la vegetación y las condiciones ambientales; sin embargo, traducir estos datos en estimaciones fiables de rendimiento a escala regional sigue siendo un desafío. En este estudio, implementamos un modelo de eficiencia en el uso de la luz (LUE) impulsado por satélite, con resolución temporal diaria y espacial de 1 km, para estimar la producción primaria bruta (GPP) y derivar rendimientos de trigo en España entre 2003 y 2022. La asimilación estacional de carbono se cuantificó dentro de periodos de crecimiento definidos fenológicamente y extraídos de series temporales suavizadas de NDVI, y los rendimientos se infirieron mediante un enfoque de asignación basado en el índice de cosecha. El desempeño del modelo se evaluó frente a estadísticas regionales reportadas de rendimiento de trigo. El marco LUE reprodujo patrones espaciales e interanuales amplios de productividad del trigo, obteniendo una correlación estadísticamente significativa pero moderada ($r = 0.51$) y mostrando una subestimación sistemática de -0.46 t ha^{-1}. Estos resultados indican que, si bien la integración diaria del estrés ambiental mejora la capacidad del modelo para capturar gradientes regionales de productividad, las incertidumbres en la delimitación fenológica limitan su capacidad para reproducir niveles absolutos de rendimiento. En conjunto, este estudio pone de relieve tanto el potencial como las limitaciones actuales de los enfoques LUE basados en teledetección diaria para el monitoreo regional del rendimiento. Mejorar la parametrización del estrés y refinar la detección fenológica serán aspectos críticos para fortalecer la robustez predictiva en condiciones agroclimáticas heterogéneas.

Palabras clave: *modelo de eficiencia en el uso de la luz, producción primaria bruta, trigo, MODIS, ERA5*

Fecha de recepción: 20 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 20 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Integración de la Teledetección y la modelización de la Eficiencia en el Uso de la Luz (LUE) para la estimación regional a largo plazo del rendimiento de trigo

Bozorgi, Mahsa [1,2], Cristóbal , Jordi [2], Casadesus, Jaume [1]

[1] Efficient Use of Water in Agriculture Program, Institute of AgriFood, Research and Technology (IRTA) Fruitcentre, Parc Agrobiotech, Lleida 25003, Spain.

0009-0006-2935-2597, mahsa.bozorgi@irta.cat; 0000-0001-7036-8212, jaume.casadesus@irta.cat

[2] Departamento de Geografía, Universitat Autònoma de Barcelona, Campus de Bellaterra, Edifici B, Carrer de la Fortuna, s/n, 08193 Bellaterra, Spain.

0000-0001-7036-8212, jordi.cristobal@uab.cat

Resumen: La estimación regional del rendimiento de los cultivos es esencial para evaluar la productividad agrícola y orientar estrategias de gestión adaptativa al clima. La Teledetección ofrece observaciones coherentes y de largo plazo sobre la dinámica de la vegetación y las condiciones ambientales; sin embargo, traducir estos datos en estimaciones fiables de rendimiento a escala regional sigue siendo un desafío. En este estudio, implementamos un modelo de eficiencia en el uso de la luz (LUE) impulsado por satélite, con resolución temporal diaria y espacial de 1 km, para estimar la producción primaria bruta (GPP) y derivar rendimientos de trigo en España entre 2003 y 2022. La asimilación estacional de carbono se cuantificó dentro de periodos de crecimiento definidos fenológicamente y extraídos de series temporales suavizadas de NDVI, y los rendimientos se infirieron mediante un enfoque de asignación basado en el índice de cosecha. El desempeño del modelo se evaluó frente a estadísticas regionales reportadas de rendimiento de trigo. El marco LUE reprodujo patrones espaciales e interanuales amplios de productividad del trigo, obteniendo una correlación estadísticamente significativa pero moderada ($r = 0.51$) y mostrando una subestimación sistemática de -0.46 t ha^{-1}. Estos resultados indican que, si bien la integración diaria del estrés ambiental mejora la capacidad del modelo para capturar gradientes regionales de productividad, las incertidumbres en la delimitación fenológica limitan su capacidad para reproducir niveles absolutos de rendimiento. En conjunto, este estudio pone de relieve tanto el potencial como las limitaciones actuales de los enfoques LUE basados en teledetección diaria para el monitoreo regional del rendimiento. Mejorar la parametrización del estrés y refinar la detección fenológica serán aspectos críticos para fortalecer la robustez predictiva en condiciones agroclimáticas heterogéneas.

Palabras clave: modelo de eficiencia en el uso de la luz, producción primaria bruta, trigo, MODIS, ERA5

Integrating Remote Sensing and Light-Use Efficiency Modelling for Long-Term Regional Wheat Yield Estimation

***Abstract**: Regional crop yield estimation is critical for evaluating agricultural productivity and supporting climate-adaptive management under increasing environmental variability. Although remote sensing provides consistent long-term observations of vegetation dynamics and environmental forcing, translating these signals into reliable regional yield estimates remains challenging. In this study, we implemented a satellite-driven light-use efficiency (LUE) framework at daily temporal resolution and 1 km spatial scale to estimate gross primary production (GPP) and derive wheat yields across Spain from 2003 to 2022. Seasonal carbon assimilation was integrated within phonologically defined extracted from smoothed NDVI time series, and grain yield was estimated using a harvest index. Model performance was evaluated against reported field scale wheat yields. The LUE framework successfully reproduced broad spatial gradients and interannual variability in wheat productivity, yielding a statistically significant but moderate correlation ($r = 0.51$) and a systematic underestimation of -0.46 t ha^{-1}. These results indicate that incorporating daily environmental stress improves the model's ability to capture regional productivity patterns; however, uncertainties in phenological timing limit the accuracy of yield estimates. Overall, this study demonstrates the potential of daily remote sensing–driven LUE*

approaches for regional yield estimation while highlighting the need for improved stress parameterization and dynamic phenological characterization to enhance predictive robustness under heterogeneous agroclimatic conditions.

***Keywords**: light use efficiency model, gross primary production, wheat, MODIS, ERA5*

1. INTRODUCCIÓN

La estimación del rendimiento de los cultivos a escala regional es fundamental para satisfacer la demanda alimentaria, optimizar la gestión del agua en la agricultura y fortalecer la resiliencia agro-económica (Lobell *et al.*, 2009). El trigo es el cereal más importante, ampliamente cultivado y con una demanda creciente a nivel global (Curtis, 2019). Sin embargo, el aumento de las temperaturas y la mayor frecuencia de episodios de sequía amenazan la productividad del cultivo (Asseng *et al.*, 2015). Este desafío es especialmente relevante en España, donde el trigo se cultiva predominantemente en sistemas de secano y las sequías recurrentes asociadas al clima mediterráneo representan un riesgo significativo para la estabilidad del rendimiento (Ribeiro *et al.*, 2019).

Las encuestas agrícolas siguen siendo el referente en cuanto a precisión, pero resultan poco prácticas para grandes extensiones y ofrecen una cobertura temporal limitada (He *et al*., 2018). Mientras tanto, el cambio climático ha intensificado la frecuencia y severidad de las olas de calor y las sequías repentinas, especialmente durante etapas sensibles del crecimiento de los cultivos, lo que provoca pérdidas significativas de rendimiento. Dadas estas condiciones, los marcos de estimación del rendimiento deben representar explícitamente la dinámica espacio-temporal de las condiciones que limitan la productividad. Para mejorar la estimación espaciotemporal, la Teledetección proporciona observaciones espacialmente continuas de la vegetación y de las condiciones ambientales, lo que permite estimar la productividad regional (Lobell, 2013). Los primeros estudios se basaron en relaciones empíricas entre índices de vegetación y rendimiento (Labus *et al*., 2002; Mkhabela *et al.*, 2005). Aunque estos modelos empíricos funcionan bien en entornos específicos, su aplicabilidad universal es limitada debido a su dependencia de las condiciones biofísicas locales (Padilla *et al.*, 2012). Para superar estas limitaciones se introdujeron enfoques basados en principios físicos, en particular los modelos de eficiencia en el uso de la luz (LUE) derivados del marco de Monteith (Padilla *et al.*, 2012). En el marco LUE, la producción primaria bruta se estima como una función de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (APAR), modulada por factores de estrés ambiental. Sin embargo, los productos de GPP a escala regional dependen de variables ambientales agregadas temporalmente, lo que puede ocultar eventos extremos de corta duración.

Este estudio tiene como objetivo incorporar restricciones diarias de estrés ambiental dentro de un marco LUE que mejore la estimación regional del rendimiento del trigo. Para ello, (1) implementamos un modelo LUE diario impulsado por datos MODIS y el reanálisis ERA5; (2) delimitamos la temporada de crecimiento del trigo utilizando métricas fenológicas extraídas de series temporales de NDVI suavizadas con TIMESAT; y (3) cuantificamos el desempeño del modelo frente a los rendimientos regionales de trigo reportados.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Conjunto de datos de Teledetección y Reanálisis

En la **Tabla 1** se presenta un resumen de los productos satelitales y las variables de ERA5 utilizados en este estudio.

Tabla 1. Datos utilizados en el marco LUE

Datos	Variables	Resolución	
		Temporal	Espacial
MODIS/ Aqua	Surface reflectance, NDVI	Diaria	500m
	LST, emissivity	Diaria	1000m
MODIS/ Combined	LAI and FPAR	4-Días	500m
	Aerosol optical depth (AOD)	Diario	1000m
	Land cover	Anual	500m
ERA5	Air temperature (T_a) Incoming surface radiation Total columnar water vapor (TCWV) Atmospheric pressure (P) Wind speed at 10 m height (u)	Diario	27,830m
SRTM	Elevation	Anual	90m

2.2. Estimación de la GPP y del rendimiento del trigo a partir de satélites

El marco de modelización sigue la formulación TEC descrita por Yuan *et al*., (2010) la cual se basa en la eficiencia en el uso de la luz (LUE). La productividad primaria bruta diaria (GPP) se calcula como:

$$GPP = \varepsilon_{max} \times PAR \times FPAR \times W_s \times T_s \qquad (1)$$

donde GPP ($gC\,m^{-2}\,día^{-1}$) es la productividad primaria bruta; PAR ($MJ\,m^{-2}\,día^{-1}$) es la radiación fotosintéticamente activa incidente; FAPAR es la fracción de PAR absorbida. ε ($gC\,MJ^{-1}$) es la eficiencia máxima en el uso de la luz bajo condiciones óptimas (se adoptó un valor de 2.5 $gC\,MJ^{-1}$ según estudios previos). W_s y T_s representan los factores de estrés hídrico y térmico, respectivamente (Yuan *et al.*, 2010).

La asimilación estacional se cuantifica integrando la GPP diaria a lo largo del periodo de crecimiento del trigo definido fenológicamente. El rendimiento del trigo se estima posteriormente aplicando un índice de cosecha (HI), que representa la fracción de la biomasa aérea asignada al grano:

$$Yield = \sum_{t=SOS}^{EOS} GPP \times HI \qquad (2)$$

donde SOS y EOS indican, respectivamente, el inicio y el final de la temporada de crecimiento, derivados de las series temporales de NDVI suavizadas mediante el procesamiento con TIMESAT. El índice de cosecha (HI) representa la fracción de la biomasa aérea asignada al grano, y en este estudio se adoptó un valor de 0.37, de acuerdo con investigaciones previas.

El análisis de la serie temporal de NDVI de MODIS se realizó mediante TIMESAT (Eklundh & Jönsson, 2017). Se asignaron mayores ponderaciones a las observaciones de mayor calidad y menores ponderaciones a aquellas de calidad inferior; además, se seleccionó el método de suavizado logístico doble, ya que mostró un mejor ajuste a los datos.

El inicio (SOS) y el final (EOS) de la temporada de crecimiento se determinaron a partir de las series temporales de NDVI suavizadas utilizando un enfoque de umbral relativo. En concreto, SOS y EOS se identificaron como las fechas en las que el NDVI supera y posteriormente desciende por debajo del 10% de la amplitud estacional, respectivamente, siguiendo el método propuesto por Zhang *et al.*, 2003.. La amplitud estacional se definió como la diferencia entre los valores máximo y mínimo de NDVI dentro de cada año hidrológico.

El desempeño del modelo se evaluó utilizando el sesgo medio (mean bias), el coeficiente de correlación (r) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución espacial de la fenología del trigo se presenta en la Figura 1. El inicio de la cobertura del suelo (*start of season*, SOS) ocurre tan temprano como en enero en las regiones del sur y se desplaza progresivamente hacia marzo en las zonas del norte. La madurez fisiológica (*end of season*, EOS) muestra una variabilidad espacial similar, con la maduración ocurriendo entre mayo y agosto, dependiendo de la ubicación geográfica.

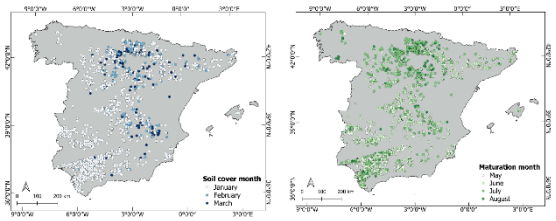


Figura 1. Distribución espacial del momento fenológico del trigo

El gradiente fenológico observado confirma una delimitación espacialmente explícita de la temporada de crecimiento, necesaria para una estimación precisa de la acumulación de carbono y del rendimiento.

La evaluación del modelo mostró una correlación moderada entre los rendimientos de trigo modelados y los reportados (r = 0.51). El modelo presentó un sesgo medio de $-0.46\ \text{ton ha}^{-1}$, lo que revela una subestimación de los rendimientos observados en toda la región de estudio (Figura 2).

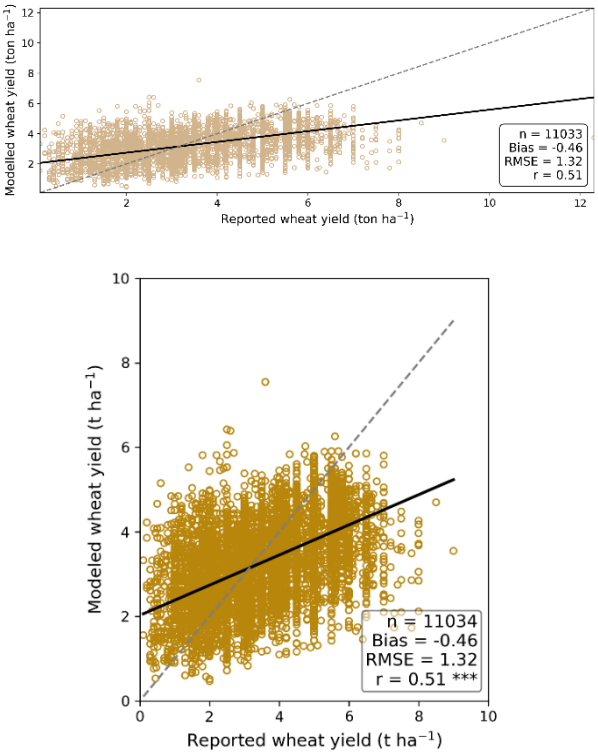
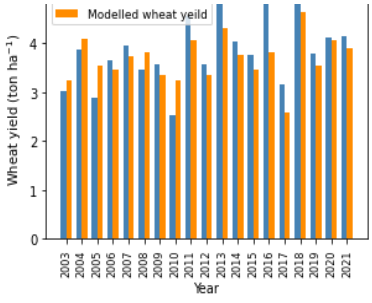


Figura 2. Comparaciones entre los rendimientos de trigo modelados y reportados en España de 2003 a 2021

El sesgo negativo está potencialmente relacionado con las incertidumbres en la detección de las etapas fenológicas a partir de las series temporales de NDVI. Una representación incorrecta del momento en que ocurre la cobertura del suelo por el cultivo o su madurez afectaría directamente el periodo de integración de la GPP estacional, propagando así errores en las estimaciones de rendimiento.

La variabilidad interanual de los rendimientos de trigo modelados y reportados en España durante el periodo 2003–2022 (Figura 3) indica que el marco LUE captura una parte sustancial de las fluctuaciones de productividad de un año a otro. Sin embargo, se observó una desviación notable en 2016, cuando el modelo mostró una subestimación considerable en comparación con los rendimientos reportados.



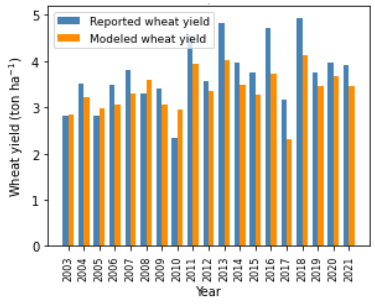


Figura 3. Variabilidad interanual del rendimiento de trigo modelado y reportado en España entre 2003 y 2022

4. CONCLUSIÓN

Se implementó un marco de eficiencia en el uso de la luz (LUE) impulsado por satélite, con resolución temporal diaria y escala espacial de 1 km, para estimar los rendimientos de trigo de secano y regadío en España durante el periodo 2003–2022. La presencia de una subestimación indica limitaciones en la representación del momento fenológico. Estos resultados ponen de manifiesto tanto el potencial como las limitaciones actuales de los enfoques LUE basados en teledetección diaria para la estimación operativa del rendimiento. Aunque la integración del estrés ambiental mediante la Teledetección mejora la coherencia física de las estimaciones de productividad regional, se requiere una mayor precisión en la detección fenológica y en la parametrización del estrés para reforzar la robustez predictiva en entornos agroclimáticos heterogéneos. Dos parámetros específicos del cultivo, **HI** y $\boldsymbol{\varepsilon_{max}}$, aún requieren calibración bajo las condiciones de cultivo en España. Su ajuste es fundamental para mejorar la precisión de las predicciones del modelo. Además, la **temperatura óptima** puede variar según la variedad, lo que resalta la necesidad de una parametrización específica por variedad.

5. FINANCIACIÓN

Este trabajo fue financiado parcialmente por el proyecto DIGISPAC (TED2021-131237B-C22) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

M. Bozorgi recibió una beca predoctoral del IRTA.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España por permitirnos utilizar la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE), la cual ha sido fundamental para el desarrollo de este estudio.

7. REFERENCIAS

Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Prasad, P. V. V., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., ... Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change, 5*(2). https://doi.org/10.1038/nclimate2470

Curtis, B. C. (2019). Wheat in the world. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperat el 19 de març de 2026, de http://www.fao.org/3/y4011e/y4011e04.htm#TopOfPage

Eklundh, L., & Jönsson, P. (2017). TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing: Software manual. Lund University & Malmö University.

He, M., Kimball, J. S., Maneta, M. P., Maxwell, B. D., Moreno, A., Beguería, S., & Wu, X. (2018). Regional crop gross primary productivity and yield estimation using fused Landsat-MODIS data. *Remote Sensing, 10*(3). https://doi.org/10.3390/rs10030372

Labus, M. P., Nielsen, G. A., Lawrence, R. L., Engel, R., & Long, D. S. (2002). Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing, 23*(20). https://doi.org/10.1080/01431160110107653

Lobell, D. B. (2013). The use of satellite data for crop yield gap analysis. *Field Crops Research, 143*. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.08.008

Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources, 34*. https://doi.org/10.1146/annurev.environ.041008.093740

Mkhabela, M. S., Mkhabela, M. S., & Mashinini, N. N. (2005). Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR. *Agricultural and Forest Meteorology, 129*(1), 1–9. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.12.006

Padilla, F. L. M., Maas, S. J., González-Dugo, M. P., Mansilla, F., Rajan, N., Gavilán, P., & Domínguez, J. (2012). Monitoring regional wheat yield in Southern Spain using the GRAMI model and satellite imagery. *Field Crops Research, 130*. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.025

Ribeiro, A. F. S., Russo, A., Gouveia, C. M., Pascoa, P., & Pires, C. A. L. (2019). Probabilistic modelling of the dependence between rainfed crops and drought hazard. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 19*(12). https://doi.org/10.5194/nhess-19-2795-2019

Yuan, W., Liu, S., Yu, G., Bonnefond, J. M., Chen, J., Davis, K., Desai, A. R., Goldstein, A. H., Gianelle, D., Rossi, F., Suyker, A. E., & Verma, S. B. (2010). Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment, 114*(7). https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.01.022

Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C. F., Gao, F., Reed, B. C., & Huete, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment, 84*(3), 471–475. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.284

Integración de UAV multiespectral/térmico, captura de esporas y evaluación fitosanitaria para la vigilancia de Bipolaris oryzae en arroz

Valdiviezo Espinoza, Juan [1] **Jaramillo Carrión, María** [2] **Aguilar Lome, Jaime** [3] **Ruiz Fernández, Luis** [4] **Ramos Fernández, Lia** [5]

[1] Doctorado en Ingeniería y Ciencias Ambientales, Universidad Nacional Agraria La Molina

[2] Laboratorio de Fitopatología, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

[3] Laboratorio de Teledetección, Universidad Nacional Mayor de San Marcos

[4] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universitat Politècnica de València

[5] Departamento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina

ORCID: Valdiviezo Espinoza 0000-0001-7883-1742 Jaramillo Carrión 0009-0003-6012-6190 Aguilar Lome 0000-0002-6638-3177 Ruiz Fernández 0000-0003-0073-7259 Ramos Fernández 0000-0003-3946-7188

Correspondencia: juan.valdiviezo.e@gmail.com mjaramillo@unprg.edu.pe jaguilarlome@gmail.com laruiz@cgf.upv.es liarf@lamolina.edu.pe

RESUMEN

La mancha carmelita del arroz, asociada a Bipolaris oryzae, requiere esquemas de vigilancia que permitan detección y respuesta temprana. En este trabajo se presenta un esquema metodológico de vigilancia fitosanitaria en arroz basado en la integración de teledetección de proximidad y mediciones in situ en sectores agrícolas del departamento de Lambayeque (provincias de Lambayeque, Ferreñafe y Chiclayo). Se empleó un UAV DJI Matrice 300 RTK con cámara multiespectral (B, G, R, RedEdge y NIR; azul, verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano) y sensor térmico H20T, complementado con captura de esporas, inspección visual del cultivo y registro meteorológico in situ. Las adquisiciones se organizaron en jornadas de monitoreo sucesivas entre marzo y junio de 2025. Los resultados preliminares muestran la generación de productos georreferenciados multiespectrales y térmicos y la obtención de evidencia fitosanitaria de referencia (severidad visual y cuantificación de esporas) para su integración con variables espectrales y térmicas. El avance evidencia la factibilidad del enfoque y sienta las bases para etapas posteriores de modelado con inteligencia artificial, integración de variables meteorológicas y generación de mapas de riesgo con proyección a un geoportal de apoyo a la decisión fitosanitaria.

Palabras clave: *Teledetección, arroz, Bipolaris oryzae, inteligencia artificial*

Fecha de recepción: 22 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 22 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Integración de UAV multiespectral/térmico, captura de esporas y evaluación fitosanitaria para la vigilancia de Bipolaris oryzae en arroz

Valdiviezo Espinoza, Juan [1], Jaramillo Carrión, María [2], Aguilar Lome, Jaime [3], Ruiz Fernández, Luis [4], Ramos Fernández, Lia [5]

[1] Doctorado en Ingeniería y Ciencias Ambientales, Universidad Nacional Agraria La Molina.
0000-0001-7883-1742, juan.valdiviezo.e@gmail.com.
[2] Laboratorio de Fitopatología, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
0009-0003-6012-6190, mjaramillo@unprg.edu.pe.
[3] Laboratorio de Teledetección, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
0000-0002-6638-3177, jaguilarlome@gmail.com.
[4] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universitat Politècnica de València.
0000-0003-0073-7259, laruiz@cgf.upv.es.
[5] Departamento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina.
0000-0003-3946-7188, liarf@lamolina.edu.pe.

Resumen: La mancha carmelita del arroz, asociada a *Bipolaris oryzae*, requiere esquemas de vigilancia que permitan detección y respuesta temprana. En este trabajo se presenta un esquema metodológico de vigilancia fitosanitaria en arroz basado en la integración de teledetección de proximidad y mediciones in situ en sectores agrícolas del departamento de Lambayeque (provincias de Lambayeque, Ferreñafe y Chiclayo). Se empleó un UAV DJI Matrice 300 RTK con cámara multiespectral (B, G, R, RedEdge y NIR; azul, verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano) y sensor térmico H20T, complementado con captura de esporas, inspección visual del cultivo y registro meteorológico in situ. Las adquisiciones se organizaron en jornadas de monitoreo sucesivas entre marzo y junio de 2025. Los resultados preliminares muestran la generación de productos georreferenciados multiespectrales y térmicos y la obtención de evidencia fitosanitaria de referencia (severidad visual y cuantificación de esporas) para su integración con variables espectrales y térmicas. El avance evidencia la factibilidad del enfoque y sienta las bases para etapas posteriores de modelado con inteligencia artificial, integración de variables meteorológicas y generación de mapas de riesgo con proyección a un geoportal de apoyo a la decisión fitosanitaria.

Palabras clave: Teledetección, arroz, *Bipolaris oryzae*, inteligencia artificial

Integration of multispectral/thermal UAV, spore capture, and phytosanitary assessment for the surveillance of Bipolaris oryzae in rice

***Abstract**: Brown spot disease in rice, associated with Bipolaris oryzae, requires monitoring schemes that enable early detection and response. This paper presents a methodological scheme for phytosanitary monitoring in rice based on the integration of proximity remote sensing and in situ measurements in agricultural sectors in the department of Lambayeque (provinces of Lambayeque, Ferreñafe, and Chiclayo). A DJI Matrice 300 RTK UAV with a multispectral camera (B, G, R, RedEdge, and NIR; blue, green, red, red-edge, and near-infrared) and H20T thermal sensor was used, complemented by spore capture, visual inspection of the crop, and in situ meteorological recording. The acquisitions were organized into successive monitoring days between March and June 2025. Preliminary results show the generation of georeferenced multispectral and thermal products and the collection of reference phytosanitary evidence (visual severity and spore quantification) for integration with spectral and thermal variables. The progress demonstrates the feasibility of the approach and lays the foundation for subsequent stages of modeling with artificial intelligence, integration of meteorological variables, and generation of risk maps with projection to a geoportal to support phytosanitary decision-making.*

***Keywords**: Remote sensing, rice, Bipolaris oryzae, artificial intelligence*

1. INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa L.*) es un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria y la economía agrícola, cuyo desempeño productivo está fuertemente condicionado por estreses bióticos y abióticos. Entre las enfermedades foliares, la mancha parda o mancha carmelita asociada a *Bipolaris oryzae* (sin. *Cochliobolus miyabeanus* en su fase sexual) constituye un problema relevante por su amplia distribución y por su capacidad de afectar distintas fases fenológicas del cultivo. Reportes recientes indican que esta enfermedad puede comprometer, tanto el rendimiento como la calidad del grano, con impactos productivos y económicos en sistemas arroceros (Kaboré *et al*., 2025).

En la práctica agrícola, el monitoreo de *B. oryzae* suele basarse en inspecciones visuales y muestreos puntuales, los cuales pueden resultar tardíos, subjetivos o costosos cuando se requiere cubrir áreas extensas. Esta limitación dificulta la transición hacia esquemas de vigilancia operativa capaces de priorizar zonas, anticipar brotes y sustentar decisiones de manejo (Liu *et al*., 2022). En este contexto, la teledetección de proximidad con vehículos aéreos no tripulados (UAV) se ha consolidado como una alternativa eficaz para detectar variaciones espaciales del estado del cultivo mediante sensores multiespectrales y térmicos, capturando señales asociadas a cambios fisiológicos y biofísicos (Kouadio *et al*., 2023; Yan *et al*., 2025; Zhu *et al*., 2024).

De manera complementaria, el monitoreo aerobiológico mediante captura y cuantificación de esporas aporta evidencia sobre la presión de inóculo y su dinámica epidemiológica, especialmente cuando se interpreta junto con el ambiente y el estado del cultivo (Mahaffee *et al*., 2023). Asimismo, la inteligencia artificial (IA) se ha convertido en un componente clave para transformar datos UAV en información accionable, mediante estrategias de aprendizaje automático y profundo para detección/segmentación de síntomas, estimación de severidad y generación de mapas (Liu *et al*., 2023; Ma *et al*., 2023).

A pesar de estos avances, persiste una brecha entre estudios centrados únicamente en imágenes y la implementación de esquemas integrados de vigilancia fitosanitaria en campo. En este contexto, el presente trabajo propone un enfoque metodológico para la vigilancia de *B. oryzae* en arroz, articulando jornadas de adquisición UAV multiespectral y térmica, captura de esporas y evaluación fitosanitaria (con registro meteorológico como componente del esquema de monitoreo), con el fin de sentar las bases para etapas posteriores de modelado de riesgo y generación de productos cartográficos de apoyo a la decisión.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se localiza en el departamento de Lambayeque, Perú, en sectores arroceros distribuidos en las provincias de Lambayeque, Ferreñafe y Chiclayo (Fig. 1). El monitoreo se enfocó en cuatro sectores de seguimiento, codificados como L (Lambayeque), ZF (Zapote Figueroa, en la provincia de Ferreñafe), P (Paredones) y CB (Carniche Bajo).

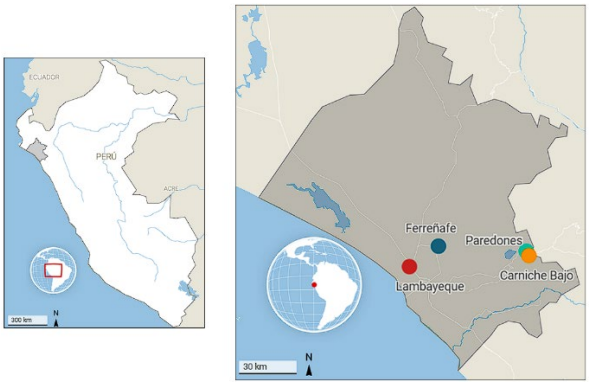


Figura 1. Mapa de ubicación de sitios de estudio.

Las zonas evaluadas presentan diferencias de disponibilidad hídrica y condiciones ambientales. En L y ZF se realiza generalmente una campaña anual, mientras que en CB y P (zona de influencia de Chongoyape) pueden desarrollarse dos campañas, lo que refleja mayor disponibilidad de agua para riego.

2.2. Diseño de jornadas de monitoreo

El monitoreo se realizó mediante jornadas sucesivas (J1–J5), con días centrales el 18/03, 26/03, 19/04, 13/05 y 29/05 de 2025, integrando captura de esporas, inspección fitosanitaria, vuelo UAV y registro meteorológico en los sectores evaluados. Cada jornada incluyó: (i) instalación de parantes/trampas, (ii) vuelo UAV y medición meteorológica *in situ* coincidente con Sentinel-2 y Landsat (Landsat 8 y Landsat 9), y (iii) retiro de trampas y recolección de hojas. Las jornadas se desarrollaron entre marzo y junio de 2025 y se emplearon como unidad temporal para la organización e integración de los datos multifuente.

2.3. Adquisición UAV y procesamiento de imágenes

Las imágenes se adquirieron con un DJI Matrice 300 RTK equipado con sensor multiespectral de cinco bandas (B, G, R, RedEdge y NIR) y sensor térmico H20T, en jornadas de monitoreo sucesivas (J1–J5) bajo un esquema replicable entre sectores (altura ~170 m; solape longitudinal y transversal 70–80%). La componente multiespectral incluyó calibración radiométrica con panel de reflectancia provisto por el fabricante, y la planificación de vuelo se definió con criterios de consistencia geométrica y cobertura espacial. Para la validación térmica se midió temperatura superficial con un radiómetro Apogee MI-210 sobre cuatro coberturas (tela negra, tela amarilla, suelo desnudo y aluminio) delimitadas en un marco de 1×1 m, registrando 4 lecturas por cobertura a 40 cm de altura al finalizar el vuelo. Bajo estas condiciones se obtuvo una resolución espacial de 14 cm/píxel (RGB) y 25 cm/píxel (térmico).

Las imágenes adquiridas fueron procesadas en Pix4D para generar productos georreferenciados multiespectrales y térmicos por sector. El flujo incluyó organización por jornada/sector, control de calidad y procesamiento fotogramétrico para la construcción de

ortomosaicos y capas térmicas de temperatura superficial aparente. Estos productos constituyeron la base para la extracción posterior de variables espectrales y térmicas en el contexto del monitoreo fitosanitario.

2.4. Muestreo fitosanitario, captura de esporas y evaluación en laboratorio

La evaluación fitosanitaria se planteó como componente de referencia en campo y laboratorio para complementar la información UAV y el registro meteorológico. Incluyó captura de esporas, muestreo foliar alrededor de parantes, inspección visual de síntomas y evaluación microscópica, con el fin de generar evidencia para la vigilancia de *B. oryzae* en arroz.

En cada parante se recolectaron tres hojas por punto cardinal (E, W, N y S) a ~1 m, las cuales fueron codificadas y transportadas en condiciones de conservación (~4 °C) al laboratorio, junto con las estructuras con placas portaobjetos empleadas para captura de esporas. Las hojas se clasificaron según la proporción del área foliar afectada en una escala de severidad 0–3. Con base en esta clasificación, el índice de enfermedad (ID, %) se estimó como severidad promedio ponderada por número de hojas y normalizada por el máximo (3). Posteriormente, se realizó la cuantificación de esporas fúngicas mediante microscopía. Estas variables se integraron como verdad de terreno para su futura vinculación con información espectral, térmica y meteorológica (Fig. 2).



Figura 2. (a) actividades de muestreo en campo en puntos de monitoreo, (b) preparación y codificación de muestras, (c) evaluación microscópica y (d) cultivo de muestras para análisis fitopatológico.

2.5. Integración multifuente y enfoque de IA

Durante las jornadas de monitoreo se registraron variables meteorológicas *in situ* con una estación (ATMOS 41, capaz de registrar temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, precipitación y viento) para complementar la información UAV y la evaluación fitosanitaria de campo/laboratorio. Los datos se estructuraron por jornada (J1–J5), sector y punto de monitoreo, de modo que los productos UAV pudieran vincularse con los registros meteorológicos y las variables fitosanitarias de referencia (verdad de terreno).

A partir de la reflectancia UAV se calcularon diez índices de vegetación, aplicando filtrado Savitzky–Golay y regiones de interés (ROI) de 1×1 m para obtener valores promedio por unidad de muestreo. Estos datos servirán para la extracción de variables y el uso futuro de modelos de IA orientados a clasificación de riesgo y generación de insumos cartográficos, con proyección a un geoportal.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

A partir del procesamiento fotogramétrico en Pix4Dmapper se generaron ortomosaicos georreferenciados multiespectrales y térmicos, que constituyen la base para el análisis posterior de variables asociadas al estado del cultivo. En la componente térmica, el flujo incluyó conversión y procesamiento de imágenes radiométricas para estimar temperatura superficial. La Fig. 3 muestra la comparación entre las mediciones del radiómetro y la cámara térmica H20T, realizada sobre cuatro coberturas y en la misma ventana temporal del sobrevuelo UAV.

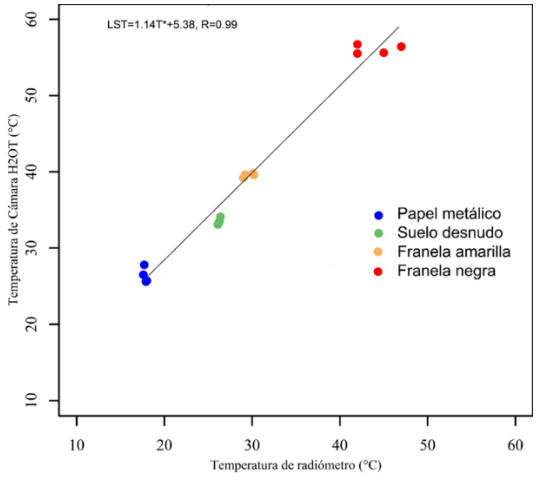


Figura 3. Comparación de temperatura estimada con radiómetro y con cámara H20T para cuatro coberturas

Las muestras foliares se clasificaron por severidad (escala 0–3) y, como resultado preliminar, se registraron 160 muestras en nivel 0 y 17 en nivel 1, evidenciando predominio de baja severidad visual durante el periodo analizado. Esta distribución desbalanceada (predominio de niveles 0–1) limita el rango de variación del ID y puede afectar la estabilidad de las correlaciones y de los modelos de regresión en esta etapa preliminar.

Los resultados preliminares mostraron correlación negativa entre el ID y RDVI, EVI, SAVI y RVI, mientras que las reflectancias en NIR, GREEN y RedEdge presentaron correlación positiva. En particular, RVI mostró sensibilidad a variaciones del estado fitosanitario, con una relación cuadrática respecto a la severidad evaluada. En términos biofísicos, estos patrones sugieren que la señal espectral vinculada al estado fitosanitario está asociada principalmente a cambios en

vigor/pigmentos y estructura del dosel (bandas Red/RedEdge/NIR e índices derivados), aunque esta interpretación es exploratoria dada la baja variabilidad de severidad observada.

Como aproximación inicial, se evaluaron modelos de regresión lineal múltiple (MLR) para predecir el ID a partir de variables espectrales y térmicas (Fig. 4). Un modelo con RVI + LST alcanzó R^2 = 0.32, mientras que un modelo basado en reflectancias RedEdge, GREEN y RED mostró mejor desempeño preliminar (R^2 = 0.48). En la Fig. 4, esto sugiere mayor aporte explicativo de la señal espectral que de la componente térmica en esta fase; el menor desempeño con LST podría estar influenciado por el desbalance de severidad y por la sensibilidad de la temperatura superficial a microclima/manejo hídrico, por lo que se evaluará su contribución incorporando covariables ambientales y normalizaciones térmicas.

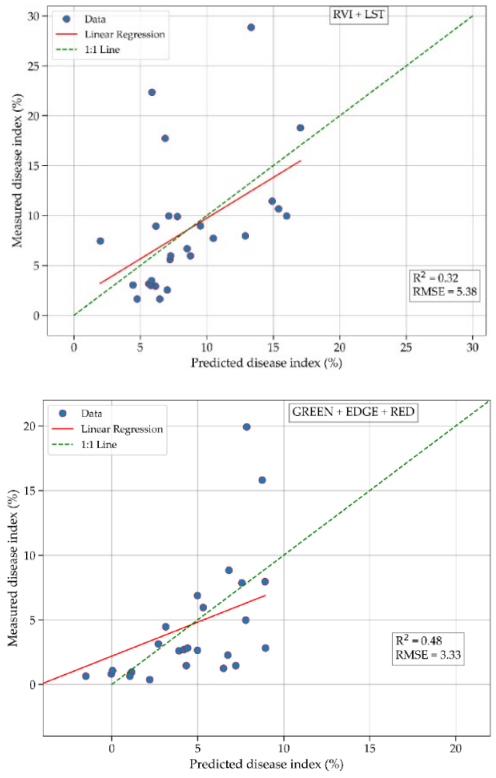


Figura 4. Relación entre la incidencia de enfermedades en las hojas del arroz observado y predicho (MLR).

4. CONCLUSIONES

Se implementó un esquema de vigilancia fitosanitaria multifuente para *B. oryzae* en arroz, integrando UAV multiespectral/térmico, meteorología, captura de esporas e inspección de campo/laboratorio. Como resultados preliminares, se generaron ortomosaicos georreferenciados, se consolidó el procesamiento térmico y se obtuvo una base de referencia fitopatológica (severidad visual y cuantificación de esporas) para integración con variables espectrales y térmicas. Los análisis preliminares de correlación y regresión muestran la factibilidad del enfoque, aunque requieren fortalecerse con mayor volumen y diversidad de datos.

Como trabajo futuro se propone completar la integración de variables meteorológicas y de esporas, evaluar modelos de IA más robustos y generar mapas de riesgo orientados a una futura implementación en geoportal para apoyo a decisiones fitosanitarias.

5. AGRADECIMIENTOS

La investigación fue financiada por Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) y del Programa Nacional de Investigación Científica y de Estudios Avanzados (PROCIENCIA), en el marco de la convocatoria E033-2023-01-BM "Alianzas Interinstitucionales para Programas de Doctorado" (Beca No. PE501088828-2024), así como del Programa de Doctorado en Ingeniería y Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

6. REFERENCIAS

Kaboré, K. H., Kassankogno, A. I., & Tharreau, D. (2025). Brown spot of rice: worldwide disease impact, phenotypic and genetic diversity of the causal pathogen Bipolaris oryzae, and management of the disease. *Plant Pathology, 74*(4), 908-922. https://doi.org/10.1111/ppa.14075

Kouadio, L., El Jarroudi, M., Belabess, Z., Laasli, S. E., Roni, M. Z. K., Amine, I. D. I., ... & Lahlali, R. (2023). A review on UAV-based applications for plant disease detection and monitoring. *Remote Sensing, 15*(17), 4273. https://doi.org/10.3390/rs15174273

Liu, C., Zhai, Z., Zhang, R., Bai, J., & Zhang, M. (2022). Field pest monitoring and forecasting system for pest control. *Frontiers in Plant Science, 13*, 990965. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.990965

Liu, S., Zhang, B., Yang, W., Chen, T., Zhang, H., Lin, Y., ... & Zhang, L. (2023). Quantification of physiological parameters of rice varieties based on multi-spectral remote sensing and machine learning models. *Remote Sensing, 15*(2), 453. https://doi.org/10.3390/rs15020453

Ma, B., Cao, G., Hu, C., & Chen, C. (2023). Monitoring the rice panicle blast control period based on UAV multispectral remote sensing and machine learning. *Land, 12*(2), 469. https://doi.org/10.3390/land12020469

Mahaffee, W. F., Margairaz, F., Ulmer, L., Bailey, B. N., & Stoll, R. (2023). Catching spores: Linking epidemiology, pathogen biology, and physics to ground-based airborne inoculum monitoring. *Plant Disease, 107*(1), 13-33. https://doi.org/10.1094/PDIS-11-21-2570-FE

Yan, J., Wu, H., Diao, Z., Miao, Y., Zhang, B., & Zhao, C. (2025). Recent Developments and Applications of Crop Disease Detection, Prediction, and Early Warning: A Review. *Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.10.032

Zhu, H., Lin, C., Liu, G., Wang, D., Qin, S., Li, A., ... & He, Y. (2024). Intelligent agriculture: Deep learning in UAV-based remote sensing imagery for crop diseases and pests detection. *Frontiers in Plant Science, 15*, 1435016. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1435016

SESIÓN 07

Arqueología y Teledetección de Proximidad

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.114

Multi-source data combination for plant functional diversity estimation: an ecological and remote sensing integrative approach

Lagranja-Usán, Jorge [1] **Pacheco-Labrador, Javier** [1] **Carrascosa, Alejandro** [2] **Burchard-Levine, Vicente** [1] **Rolo, Víctor** [2] **Martín, M. Pilar** [1]

[1] Environmental Remote Sensing and Spectroscopy Laboratory (SpecLab), Spanish National Research Council (CSIC), Spain

[2] Forest Research Group - INDEHESA, University of Extremadura, Spain

ORCID: Lagranja-Usán 0009-0006-2222-4066 Pacheco-Labrador 0000-0003-3401-7081 Carrascosa 0000-0002-1468-0452 Burchard-Levine 0000-0003-0222-8706 Rolo 0000-0001-5854-9512 Martín 0000-0002-5563-8461

Correspondencia: jorge.lagranja@csic.es javier.pacheco@csic.es alejandro_carrascosa@unex.es vicente.burchard@csic.es rolo@unex.es mpilar.martin@csic.es

ABSTRACT

In this work, we estimate plant functional diversity of grass plots using high spatial resolution hyperspectral imagery. Results yielded negative correlations, independently of the image filters applied to remove non-vegetative elements and the selection of functional traits. Simulations performed with the Biodiversity Observing System Simulation Experiment (BOSSE) suggest that these results arise from the combination of different methodologies to estimate functional diversity: moving windows for the imagery and species' averages for the plant functional traits measured in the field. We show that simulations are a valuable tool to understand experimental results in the field of remote sensing of plant functional diversity.

Keywords: *Specim IQ, Rao quadratic entropy, high spatial resolution, hyperspectral*

Fecha de recepción: 4 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 4 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Multi-source data combination for plant functional diversity estimation: an ecological and remote sensing integrative approach.

Jorge Lagranja-Usán [(1)], Javier Pacheco-Labrador [(1)], Alejandro Carrascosa [(2)], Vicente Burchard-Levine [(1)], Víctor Rolo [(2)], M. Pilar Martín [(1)]

[(1)] Environmental Remote Sensing and Spectroscopy Laboratory (SpecLab), Spanish National Research Council (CSIC), Spain

0009-0006-2222-4066 jorge.lagranja@csic.es, 0000-0003-3401-7081 javier.pacheco@csic.es, 0000-0003-0222-8706 vicente.burchard@csic.es, 0000-0002-5563-8461 mpilar.martin@csic.es.

[(2)] Forest Research Group – INDEHESA, University of Extremadura, Spain,

0000-0002-1468-0452 alejandro_carrascosa@unex.es, 0000-0001-5854-9512 rolo@unex.es.

Abstract: In this work, we estimate plant functional diversity of grass plots using high spatial resolution hyperspectral imagery. Results yielded negative correlations, independently of the image filters applied to remove non-vegetative elements and the selection of functional traits. Simulations performed with the Biodiversity Observing System Simulation Experiment (BOSSE) suggest that these results arise from the combination of different methodologies to estimate functional diversity: moving windows for the imagery and species' averages for the plant functional traits measured in the field. We show that simulations are a valuable tool to understand experimental results in the field of remote sensing of plant functional diversity.

Keywords: Specim IQ, Rao quadratic entropy, high spatial resolution, hyperspectral

Combinación de distintas fuentes de datos para la estimación de diversidad funcional vegetal: un enfoque integrador entre ecología y teledetección

Resumen: *En este trabajo, estimamos la diversidad funcional de cuadrantes de pasto a partir de imágenes hiperespectrales de alta resolución espacial. Los resultados mostraron correlaciones negativas, independientemente de los filtros aplicados a la imagen para eliminar elementos no vegetativos y de la selección de rasgos funcionales aplicada. Simulaciones realizadas con el Biodiversity Observing System Simulation Experiment (BOSSE) sugieren que estos resultados son consecuencia de la combinación de diferentes metodologías para estimar la diversidad funcional: ventanas móviles para las imágenes y promedios por especies para los rasgos medidos en campo. Demostramos que las simulaciones son una herramienta útil para comprender resultados experimentales en el estudio de la diversidad con teledetección*

Palabras clave: *Specim IQ, entropía cuadrática de Rao, alta resolución espacial, hiperespectral*

1. INTRODUCTION

Biodiversity plays a key role in ecosystem regulation, maintaining stability to environmental changes and perturbations. Biodiversity loss due to anthropogenic activity may jeopardize this stability, affecting ecosystem processes, nutrient cycles, and biosphere worldwide (Hernández-Blanco *et al.*, 2022).

In this context, biodiversity monitoring and conservation have become a priority for governments and international organizations. Remote sensing (RS) has been proposed as a useful tool for monitoring various facets of vegetation diversity, including taxonomic and functional diversity, with the latter being the most linked to ecosystem functioning. Vegetation optical properties are related to functional traits, such as pigments and nutrients, and thus the variability in the signals from individual species can be separated (Pacheco-Labrador *et al*., 2022).

However, remote sensing faces several limitations for capturing plant functional diversity. One of the most discussed is the size mismatch between image pixels and plants (Gamon et al., 2020). This problem becomes more pronounced when studying small plant communities, such as grasslands and pastures, where individuals are much smaller than the pixel size of most satellite missions.

A second major challenge is validating RS diversity estimates against ground-truth data. This can be done by including fieldwork simultaneously with RS data acquisition. The problem here is that ecological and RS data are still being underused, mainly due to the lack of integration methods and normalization approaches between ecology and RS (Pettorelli *et al*., 2014). For this reason, synthetic data has been shown to be very useful

for accurately complementing these studies and contributing to this interdisciplinary integration (Pacheco-Labrador *et al*., 2026).

In this study, we present an integrative approach of RS and ecology (ECO hereafter) methodologies applied to very high-resolution hyperspectral imagery (HSI) collected in a typical Mediterranean *dehesa* pasture, complemented with simulations. We showcase the potentials and limitations of ECO and RS conventional methodologies and best practices to integrate both data sources when studying plant functional diversity.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study site and data acquisition

In situ data was acquired on two wooded grasslands in the western Iberian Peninsula (Cáceres and Salamanca) encompassing different climate and management gradients. These ecosystems host typical Mediterranean grasses, legumes, and forb types, with a sparse tree layer dominated by holm oak (*Quercus ilex* subsp. *ballota* L.) (Carrascosa *et al*., 2025).

Field data were collected from mid-April to mid-May in 2022 and 2023 (Salamanca was sampled only in 2023), typically during the green-peak. This dataset included 62 sampling plots of 25x25 cm. Plant surveys were conducted to determine species and their abundance, and destructive sampling provided the quantification of relevant plant traits: height (cm), foliar area (mm^2), specific leaf area (m^2/kg), leaf dry matter content (g/g), foliar N content (%), root dry matter content (g/g), and specific root length (m/g).

HSI was acquired at these same plots with a Specim IQ hyperspectral camera (Specim Ltd., Oulu, Finland) covering the VIS-NIR spectral range (397-1003 nm range, 7 nm spectral resolution) with a 31º FOV (512x512 pixels). Nadir images were taken at approximately 1m above ground, resulting in a spatial resolution of approximately 1mm per pixel.

2.2. Hyperspectral imagery processing

Reflectance factors (RF) were calculated using the Specim IQ 'Simultaneous mode' by measuring a non-calibrated white reference panel placed within the field of view in each acquisition.

Images were cropped to the 25x25 cm region of interest (ROI), and noisy bands were removed (<410nm and >930nm). Non-photosynthetic pixels (soil, flowers, and shadows) were masked by thresholding different vegetation indices.

RF were used to calculate Rao's quadratic entropy *Q* (Eq. 1) (Botta-Dukát, 2005), one of the most widely used metrics in functional and taxonomic diversity studies (e.g., de Bello *et al.*, 2010).

Rao's quadratic entropy *Q* is a weighted dissimilarity metric that compares the distance based on functional or phylogenetic differences between two species within a community:

$$Q = \sum_{i,j}^{N} p_i p_j d_{ji}, \quad (1)$$

Where p_i and p_j are the relative abundances of the ith and j^{th} elements, and d_{ij} is the dissimilarity between both samples, which in this case is the Euclidean distance between two pixels within a matrix.

Image's mean Rao *Q* was obtained with the pyGNDiv Python package (Pacheco-Labrador et al., 2023) through a 3x3 px moving window across all images. pyGNDiv normalizes the metric dissimilarity with respect to data dimensionality, allowing the direct comparison of *Q* computed from different datasets.

2.3. Simulated data

We simulated synthetic plant functional traits and hyperspectral imagery with the Biodiversity Observing System Simulation Experiment (Pacheco-Labrador *et al*., 2025). This tool enables the simulation of synthetic plant communities with different spatial patterns across diverse climate regimes through emulated radiative transfer models (RTMs). The scenes encompassed different climate regimes and three spatial patterns, namely even, clustered, and intermediate, regarding simulated species distribution across the scene. Synthetic communities included species maps, which led to two plant trait datasets: one mimicking the traits sampled in the field (FIELD) and another encompassing biophysical traits obtained from RTM, which are directly related to RF(RTM).

Then, we calculated Rao *Q* over the images and simulated plant trait maps using a moving window (RS-approach) and (2) individual species mean traits and abundance matrices (ECO-approach).

2.4. Statistical analysis

Since some measured plant traits do not directly affect vegetation spectral properties, we used partial least squares regression (PLSR) to determine which traits' variability RF could capture. This analysis was performed for each functional trait on both HSI and simulated data, using cross-validation to optimize the number of components. Thus, we produced a second dataset encompassing traits significantly correlated with RF ($p<0.001$) in the PLSR model (selected). A new PLSR model was fit to those data, and the scores were used as a surrogate for RF to compute Rao *Q*.

We assessed HSI's capability to predict plant functional diversity. Rao *Q* computed from simulated and measured RF and their corresponding scores matrix were compared to Rao *Q* computed from plant traits measured in the field (FIELD) and simulated (FIELD and RTM). Predictors and response variables were calculated for both ECO and RS approaches, and a correlation analysis was conducted for each pair of variables.

Pearson's *r* and p-value assessed the performance of the different variables and approaches.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 1 shows Rao *Q* retrieved from HSI reflectance factors using the RS approach and its correlation with Rao *Q* retrieved from FIELD functional traits using the ECO approach. Correlations were low and negative, independently of the filters applied to the imagery or the traits. Simulation sheds light on these results. Fig. 2 presents Pearson's *r* as a measure of the capability of

Rao *Q* computed from RF and their scores using the RS-approach (Fig. 2 a-d and e-h, respectively), and the ECO-approach (Fig. 2 i-l, and m-p, respectively) to estimate Rao *Q* computed from FIELD and RTM plant traits using the RS-approach (first and second columns, respectively), and the ECO-approach (third and fourth columns, respectively). Correlations are high only when the same approach is used for spectral and plant-trait variables. When crossed, negative correlations become more frequent and stronger as the vegetation patterns become more patchy, independently of the type of plant trait (FIELD or RTM). The small pixels of the camera, scanned with 3-by-3 pixel moving windows, would be close to the "clustered" spatial pattern, and simulations suggest that the discrepancy relies on the mismatch between the approaches used (ECO vs. RS).

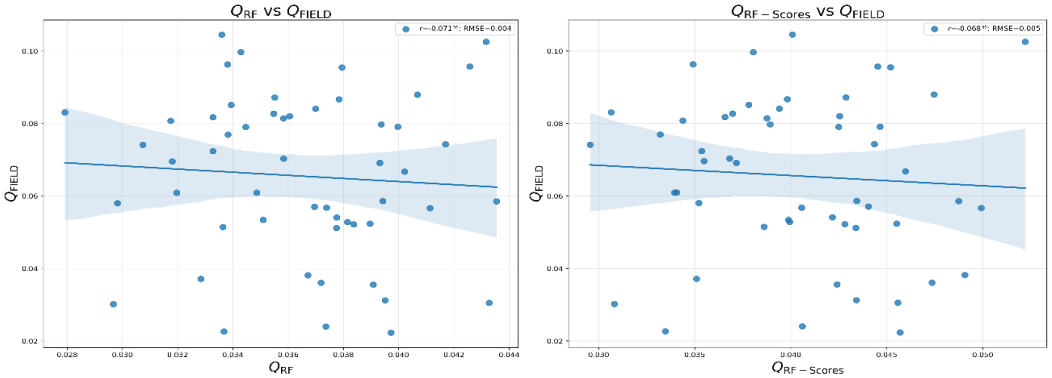


Figure 1. Pearson's *r* correlation analysis for Rao *Q* computed from RF of PLSR selected traits. RS-approach for RF (left; *r* = -0.071 n.s.; RMSE = 0.004) and its scores (right; *r* = -0.068 n.s.; RMSE = 0.005), ECO-approach for Rao *Q* computed from FIELD traits (y axes).

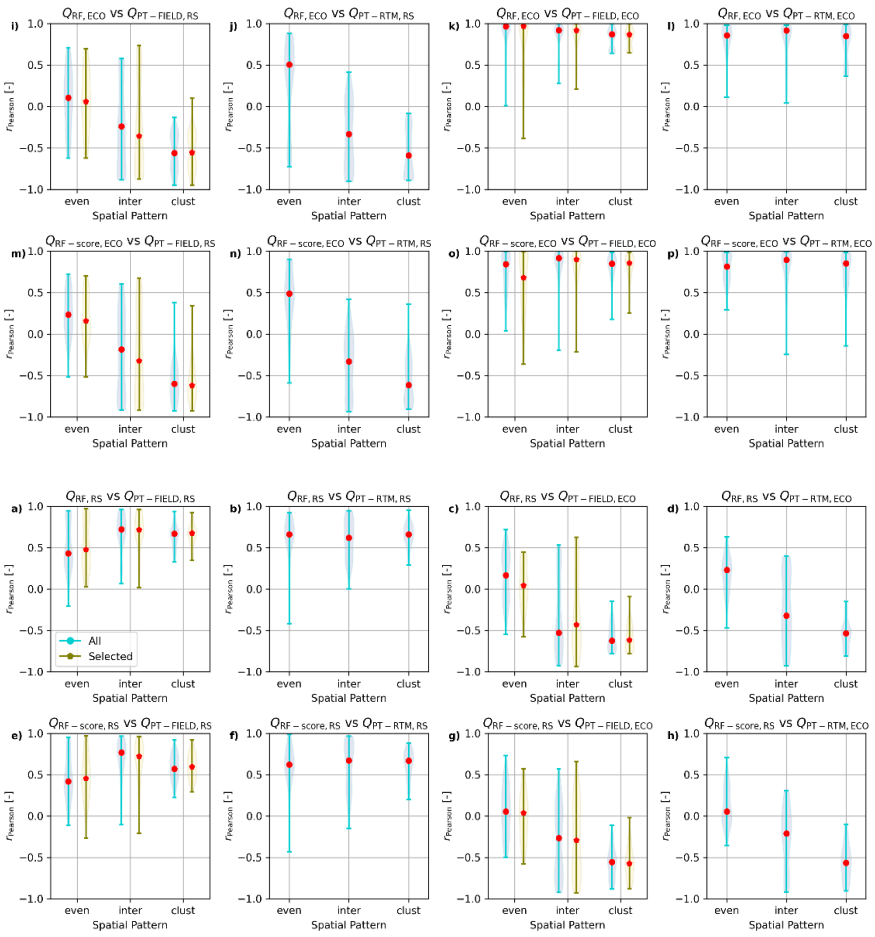


Figure 2. Pearson's *r* correlation for Rao *Q* computed from all variable pairs, methodologies, and spatial patterns. RS-approach for RF (a-d), their scores (e-h), ECO-approach for RF (i-p), and their scores (m-p). Columns 1,3: *Q* retrieved from FIELD traits using ECO and RS- approaches, respectively. Columns 2,4 *Q* retrieved from RTM traits using ECO and RS-approaches, respectively. Blue boxes: All simulated FIELD traits; green boxes: simulated FIELD traits selected with PLSR.

4. CONCLUSIONS

Our study demonstrates the potential of simulations as a complement to remote sensing studies to help understand the results obtained where different data collection methodologies are combined. Its use is specially interesting simultaneously with hyperspectral very high-resolution proximal data, where increased noise in spectral signal may cause misleading results. The approach provided here should further be tested at different spatial and spectral resolutions and across different biomes to determine the scope of these tools when studying diversity and it's different facets.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

JPL, MPM, and JLU acknowledge the project "Integrated Observing Systems and Simulation Experiments to Analyze Biodiversity-Ecosystem Function Relationships in Savanna Ecosystems" PID2023-151046NB-I00 funded by MCIU/ AEI / 10.13039/501100011033 / FEDER, UE).

6. REFERENCES

Botta-Dukát, Z. (2005). Rao's quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits. *Journal of Vegetation Science*, *16*(5), 533–540. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02393.x

Carrascosa, A., Moreno, G., Cotrufo, M. F., Frade, C., Rodrigo, S., & Rolo, V. (2025). Improved management increases soil mineral-protected organic carbon storage via plant-microbial-nutrient mediation in semi-arid grasslands. *EGUsphere*, 1–37. https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1711

de Bello, F., Lavergne, S., Meynard, C. N., Lepš, J., & Thuiller, W. (2010). The partitioning of diversity: Showing Theseus a way out of the labyrinth. *Journal of Vegetation Science*, *21*(5), 992–1000. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2010.01195.x

Gamon, J. A., Wang, R., Gholizadeh, H., Zutta, B., Townsend, P. A., & Cavender-Bares, J. (2020). Consideration of Scale in Remote Sensing of Biodiversity. In *Remote Sensing of Plant Biodiversity* (pp. 425–447). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33157-3_16

Hernández-Blanco, M., Costanza, R., Chen, H., deGroot, D., Jarvis, D., Kubiszewski, I., Montoya, J., Sangha, K., Stoeckl, N., Turner, K., & van 't Hoff, V. (2022). Ecosystem health, ecosystem services, and the well-being of humans and the rest of nature. *Global Change Biology*, *28*(17), 5027–5040. https://doi.org/10.1111/gcb.16281

Pacheco-Labrador, J., de Bello, F., Migliavacca, M., Ma, X., Carvalhais, N., & Wirth, C. (2023). A generalizable normalization for assessing plant functional diversity metrics across scales from remote sensing. *Methods in Ecology and Evolution*, *14*(8), 2123–2136. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14163

Pacheco-Labrador, J., Gomarasca, U., Pabon-Moreno, D. E., Li, W., Migliavacca, M., Jung, M., & Duveiller, G. (2025). *BOSSE v1.0: The Biodiversity Observing System Simulation Experiment*. Biogeosciences. https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-318

Pacheco-Labrador, J., Gomarasca, U., Pabon-Moreno, D. E., Li, W., Migliavacca, M., Jung, M., & Duveiller, G. (2026). Benchmarking remote sensing methods to capture plant functional diversity from space. *Ecological Informatics*, 103636. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2026.103636

Pacheco-Labrador, J., Migliavacca, M., Ma, X., Mahecha, M. D., Carvalhais, N., Weber, U., Benavides, R., Bouriaud, O., Barnoaiea, I., Coomes, D. A., Bohn, F. J., Kraemer, G., Heiden, U., Huth, A., & Wirth, C. (2022). Challenging the link between functional and spectral diversity with radiative transfer modeling and data. *Remote Sensing of Environment*, *280*, 113170. https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113170

Pettorelli, N., Laurance, W. F., O'Brien, T. G., Wegmann, M., Nagendra, H., & Turner, W. (2014). Satellite remote sensing for applied ecologists: Opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology*, *51*(4), 839–848. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12261.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.144

Análisis de la caducidad foliar en plantaciones de *Tectona grandis* mediante datos multiespectrales orbitales y obtenidos con UAV

Manzon Nunes, Gustavo [1] **Santos da Silva, Diego** [1] **Eloisa de Freitas Milani, Jaçanan** [1] **Tatiana Vilani, Maricéia** [1] **Pereira Rezende, Segundo Durval** [1] **Pirolla, Mallu** [2] **Scognamiglio Torres, Fernando** [2]

[1] Federal University of Mato Grosso, Brasil

[2] 4M Agroflorestal Ltda, Brasil

ORCID: Manzon Nunes 0000-0002-5124-5898 Santos da Silva 0009-0008-2186-7056 Eloisa de Freitas Milani 0000-0002-4831-2551 Tatiana Vilani 0000-0003-0701-570X Pereira Rezende 0009-0008-9662-397X Pirolla 0009-0002-1835-5355 Scognamiglio Torres 0009-0005-1171-1048

Correspondencia: gustavo.nunes@ufmt.br diegosseflsst@gmail.com jacanan.milani@gmail.com mtvilani@gmail.com segundo.rezende@sou.ufmt.br mallu@proteca.com.br fernando@proteca.com.br

RESUMEN

El estudio propuesto se centra en comparar análisis aplicados a rodales de Tectona grandis manejados por la empresa 4M Agroflorestal Ltda, ubicados en la Fazenda Rancho Alegre, en el municipio de São José dos Quatro Marcos, Mato Grosso, Brasil. La finca se encuentra a aproximadamente 300 km de Cuiabá y abarca un área total de 483 hectáreas, de las cuales 284 hectáreas están cubiertas por rodales de teca divididos en 10 parcelas. Los datos se recolectaron en octubre de 2022 mediante levantamientos aéreas con la cámara multiespectral Micasense Altum integrada en un RPAS DJI Matrice 100, así como imágenes del satélite Planet SuperDove. Posteriormente, se procesaron los datos para obtener el Índice de Área Foliar (IAF) de cada parcela, con el objetivo de cuantificar el porcentaje de área foliar y, consecuentemente, comparar estos porcentajes, considerando la relación estadística derivada del hecho de que ambas fuentes de datos (Altum y Planet) imagenaron el área de estudio en la misma fecha (4 de octubre de 2022). El análisis de datos confirmó que en las cinco parcelas ubicadas en la parte norte de la finca, los datos Planet subestimaron la cobertura foliar, mientras que en las cinco parcelas del sur, sobreestimaron el área foliar. Por otro lado, los datos de la cámara Micasense Altum, integrada con un UAV, demostraron mayor exactitud y precisión en la medición espacial de doseles individuales, principalmente debido a su resolución espacial a nivel centimétrico, lo que permite avances en el manejo forestal de rodales plantados.

Palabras clave: *Fenotipificación; activos forestales; teca; índice de área foliar; multiespectral.*

Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 9 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis de la caducidad foliar en plantaciones de *Tectona grandis* mediante datos multiespectrales orbitales y obtenidos con UAV

Manzon Nunes, Gustavo [(1)], Santos da Silva, Diego [(1)], Eloisa de Freitas Milani, Jaçanan [(1)], Tatiana Vilani, Maricéia [(1)], Pereira Rezende, Segundo Durval [(1)], Arenhart Pirolla, Mallu [(2)], Scognamiglio Torres, Fernando [(2)]

[(1)] Federal University of Mato Grosso, Brasil.

0000-0002-5124-5898, gustavo.nunes@ufmt.br.

0009-0008-2186-7056, diegosseflsst@gmail.com.

0000-0002-4831-2551, jacanan.milani@gmail.com.

0000-0003-0701-570X, mtvilani@gmail.com.

0009-0008-9662-397X, segundo.rezende@sou.ufmt.br.

[(6)] 4M Agroflorestal Ltda, Brasil.

0009-0002-1835-5355, mallu@proteca.com.br.

0009-0005-1171-1048, fernando@proteca.com.br.

Resumen: El estudio propuesto se centra en comparar análisis aplicados a rodales de Tectona grandis manejados por la empresa 4M Agroflorestal Ltda, ubicados en la Fazenda Rancho Alegre, en el municipio de São José dos Quatro Marcos, Mato Grosso, Brasil. La finca se encuentra a aproximadamente 300 km de Cuiabá y abarca un área total de 483 hectáreas, de las cuales 284 hectáreas están cubiertas por rodales de teca divididos en 10 parcelas. Los datos se recolectaron en octubre de 2022 mediante misiones de vuelo con la cámara multiespectral Micasense Altum integrada en un UAV DJI Matrice 100, así como se adquirieron imágenes del satélite Planet SuperDove. Posteriormente, se procesaron los datos para obtener el Índice de Área Foliar (IAF) de cada parcela, con el objetivo de cuantificar el porcentaje de área foliar y, consecuentemente, comparar estos porcentajes, considerando la relación estadística derivada del hecho de que ambas fuentes de datos (Altum y Planet) para el área de estudio en la misma fecha (4 de octubre de 2022). El análisis de datos confirmó que en las cinco parcelas ubicadas en la parte norte de la finca, los datos Planet subestimaron la cobertura foliar, mientras que en las cinco parcelas del sur, sobreestimaron el área foliar. Por otro lado, los datos de la cámara Micasense Altum, integrada con un UAV, demostraron mayor exactitud en la medición espacial de doseles individuales, principalmente debido a su resolución espacial a nivel centimétrico, lo que permite avances en el manejo forestal de rodales plantados.

Palabras clave: Fenotipificación; activos forestales; teca; índice de área foliar; multiespectral.

Deciduousness Analysis of Tectona grandis Plantations Using Orbital and UAV-Based Multispectral Data

***Abstract**: The proposed study focuses on comparing analyses applied to Tectona grandis stands managed by the company 4M Agroflorestal Ltda, located on the Rancho Alegre Farm in the municipality of São José dos Quatro Marcos, Mato Grosso, Brazil. The farm is situated approximately 300 km from Cuiabá and spans a total area of 483 hectares, with 284 hectares covered by teak stands divided into 10 plots. Data were collected in October 2022 through aerial surveys using the Micasense Altum multispectral camera integrated into a DJI Matrice 100 RPAS, as well as imagery from the Planet SuperDove satellite. Subsequent data processing was carried out to obtain the Leaf Area Index (LAI) for each plot, aiming to quantify the percentage of leaf area and, consequently, compare these percentages, taking into account the statistical relationship derived from the fact that both data sources (Altum and Planet) for the study area on the same date (October 4, 2022). Data analysis confirmed that in the five plots located in the northern part of the farm, Planet data underestimated the foliar cover, whereas in the five southern plots, it overestimated the leaf area. On the other hand, data from the Micasense Altum camera, integrated with a UAV, demonstrated greater accuracy in the spatial measurement of individual canopies,*

mainly due to its centimeter-level spatial resolution, thus enabling advancements in the forest management of planted stands.

***Keywords**: Phenotyping, forest assets, teak, leaf area index, multispectral.*

1. INTRODUCCIÓN

Tectona grandis L.f., comúnmente conocida como teca (en India, Siam, Birmania, Indonesia, Estados Unidos e Inglaterra), teck (Francia), ojati (Java), may sak (Laos) y tiek (Alemania), es un árbol caducifolio de gran porte perteneciente a la familia Lamiaceae. Es nativa de los bosques tropicales monzónicos del sudeste asiático (India, Myanmar, Tailandia y Laos), donde puede alcanzar alturas de hasta 60 metros. Esta especie presenta un alto grado de caducidad foliar, con hojas opuestas, elípticas, coriáceas, con pecíolos cortos o ausentes y ápices y bases agudos. Produce una de las maderas duras tropicales más valiosas y conocidas (Weaver, 1993; Pandey & Brown, 2000; Pelissari, 2014).

El uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) para la evaluación y el monitoreo de grandes áreas plantadas de difícil acceso en un corto período de tiempo presenta una amplia aplicabilidad, especialmente debido a la adquisición de imágenes con alta resolución espacial y temporal en comparación con las imágenes satelitales. Esto sirve de base para la implementación de estrategias de manejo a corto y largo plazo, optimizando tanto el tiempo como los costos (Pedrali *et al*., 2019).

Existe una demanda creciente del uso de la Teledetección y la Agricultura de Precisión, que involucra la generación de índices de vegetación para la evaluación de cultivos agrícolas. Esta tecnología permite la recolección de datos en tiempo real, ciclos de análisis periódicos más cortos y una reducción de la mano de obra en comparación con los métodos tradicionales de evaluación en campo (Costa *et al*., 2020).

Los índices de vegetación son herramientas que pueden utilizarse para analizar las propiedades espectrales de la vegetación en un ecosistema o en un área agrícola mediante operaciones aritméticas entre las bandas espectrales de las imágenes recolectadas por sensores, con base en el comportamiento de la reflectancia de las superficies analizadas (Francisco *et al*., 2020).

En este contexto, 4M Agroflorestal LTDA es una empresa forestal del estado de Mato Grosso-Brasil, especializada en la plantación y el manejo de bosques clonales de teca, donde se llevó a cabo este estudio. El objetivo era comparar los datos de dos sensores (la cámara Micasense Altum e imágenes orbitales del satélite Planet), mediante la generación del Índice de Área Foliar (Leaf Area Index, LAI) para cuantificar el área foliar durante el pico del período anual de caducidad en parcelas de plantaciones de teca.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el área de la Fazenda Rancho Alegre, propiedad de 4M Agroflorestal LTDA, compuesta por 10 parcelas de plantaciones de Tectona grandis, ubicadas en el municipio de São José dos Quatro Marcos, en el estado de Mato Grosso, Brasil. Los datos utilizados incluyeron información obtenida de la constelación de satélites orbitales Planet (satélites SuperDove, PSB.SD), que ofrecen resolución espacial de 3 metros y ocho bandas espectrales siendo B1-azul costero (431-452nm), B2-azul (465-515nm); B3-verde 1 (513-549nm); B4-verde 2 (547-583nm); B5-amarillo (600-620nm); B6-rojo (650-680nm), B7- borde rojo (697-713nm), B8-infrarrojo cercano (845- 885nm). Las bandas son radiométricamente corregidas para reflectancia de la superficie. Datos adicionales se adquirieron mediante misiones programadas con una plataforma UAV (DJI Matrice 100) integrada con una cámara Micasense Altum, que capta cinco bandas espectrales que cubren las longitudes de onda del visible (VIS), Red Edge y NIR. Tanto los datos orbitales como los del UAV fueron recolectados el 4 de octubre de 2022.

Los planes de vuelo para la adquisición de datos con la cámara multiespectral Micasense Altum se basaron en los siguientes parámetros: altura de vuelo de 120 metros, traslape longitudinal del 80% y traslape lateral del 75%, además de la adquisición de imágenes con un panel de reflectancia antes y después de cada vuelo. Se utilizaron cuatro puntos de control en tierra para la ortorrectificación de los mosaicos generados para cada parcela, manteniendo la integridad geométrica para la comparación con los datos Planet. Estos ajustes permitieron el procesamiento de la fotogrametría aérea mediante el software Agisoft Metashape, resultando en ortomosaicos radiométricamente calibrados para las cinco bandas espectrales, con resolución espacial ultraalta y un GSD de 7 centímetros.

Posteriormente, los ortomosaicos multiespectrales Planet y Micasense Altum se procesaron con el software ENVI para generar el Índice de Área Foliar (Leaf Area Index, LAI), con el objetivo de determinar la cobertura foliar en las parcelas de *Tectona grandis*. A partir de los mosaicos de LAI, cada parcela fue analizada utilizando tanto los datos Planet como Altum para clasificar dos categorías mediante valores umbral: Teca con follaje y Teca sin follaje/suelo (caducifolia). A continuación, se realizaron cuantificaciones de área para cada clase, así como el cálculo de porcentajes y análisis estadísticos para sustentar la discusión de los resultados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través del procesamiento y uso del IAF, fue posible generar mapas que cubren las 10 parcelas de la Fazenda Rancho Alegre, involucrando ortomosaicos obtenidos con la cámara Micasense Altum y datos del satélite Planet, ambos del 4 de octubre de 2022 (Figura 1).

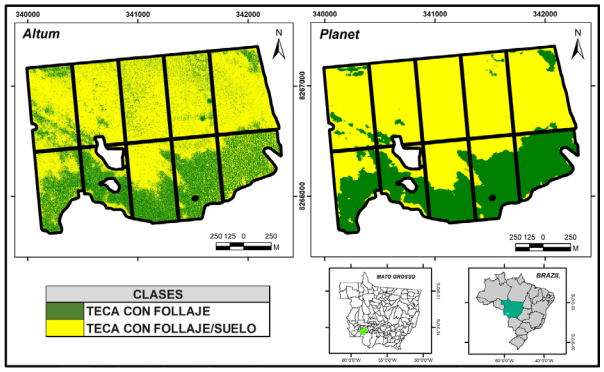


Figura 1. Resultados de diferenciación de clases basados en el IAF - Micasense Altum y de imágenes satelitales Planet. Parcelas T1 a T5 (norte). Parcelas T6 a T10 (sur).

La Figura 2 presenta una visualización comparativa de dos salidas de clasificación para la caducidad foliar de *Tectona grandis* en la parcela 8: datos Micasense Altum vs PlanetScope. Se distinguen dos clases de vegetación: Teca con follaje y Teca sin follaje/Suelo (caducifolia). La comparación ilustra diferencias en el detalle espacial entre ambas fuentes de datos, con Altum mostrando una delineación más fina de la variabilidad del dosel y Planet patrones más amplios y generalizados.

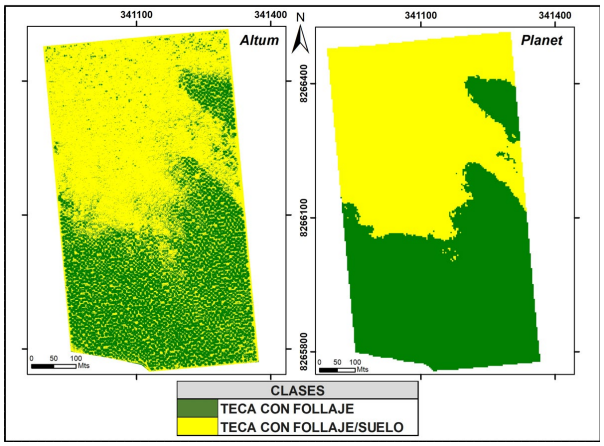


Figura 2. Parcela 8 utilizando datos de IAF de Altum (basados en UAV) y Planet (satelitales).

Se observa mayor detalle en los datos generados con la cámara multiespectral, donde la mejor resolución permitió distinguir entre copas y el espaciamiento entre individuos, incluyendo áreas de teca sin follaje. En el mapeo con datos orbitales, se representa el dosel de más de un individuo en un solo píxel, con tendencia a valores más altos de IAF donde ocurrió baja pérdida foliar y hojas bajas o escasas en regiones con menor IAF.

Al analizar el contexto completo que involucra la ubicación de las parcelas, es evidente que existe variabilidad debida a factores ambientales como el tipo de suelo arcilloso y mayor humedad en la porción sur por la proximidad de un curso de agua, además de suelo arenoso con menor humedad en la porción norte de la finca.

Al diferenciar las clases Teca con follaje y Teca sin follaje/Suelo, fue posible calcular los valores porcentuales, como se muestra en la Tabla 1.

Utilizando estos datos, se calcularon parámetros estadísticos como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1. Parcela de teca – Área foliar de datos Altum y Planet.

Teca / Parcela	Altum	Planet
T 1	21.06	9.39
T 2	9.98	5.22
T 3	11.91	0.00
T 4	14.80	1.23
T 5	11.68	7.33
T 6	45.34	58.95
T 7	56.00	63.43
T8	39.36	50.21
T9	54.17	71.69
T 10	50.32	90.44

Tabla 2. Parámetros estadísticos del área foliar de datos Altum y Planet.

Parámetros	Altum	Planet
Promedio	31.46	35.79
Mediana	30.21	29.80
Varianza	372.18	1188.89
Desviación estándar	19.29	34.48
Coeficiente de variación	61.32	96.35

Al analizar los valores medios y la dispersión (desviación estándar) de los dos tratamientos (% área foliar), se observó que el tratamiento Planet presentó un promedio de área foliar ligeramente superior (35.79%) en comparación con Altum (31.46%). Sin embargo, la desviación estándar para Planet (34.48%) fue considerablemente mayor que la calculada para Micasense Altum (19.29%).

Esto indica que los valores de % área foliar obtenidos con Planet fueron mucho más dispersos, oscilando desde valores muy bajos (0%) hasta muy altos (90.44%), mientras que los resultados de Altum se concentraron más entre las parcelas.

La aplicación de la prueba t pareada arrojó una estadística t = -0.806, grados de libertad = 9 y valor p = 0.441, lo que indica que no existe diferencia estadísticamente significativa entre el % promedio de área foliar medido por Altum y Planet al nivel de significancia del 5% ($p < 0.05$). Así, a pesar de los valores medios y dispersión diferentes, la variabilidad entre parcelas fue tan alta que la diferencia no resultó estadísticamente significativa en la prueba.

El siguiente boxplot (Figura 3) ilustra la comparación entre ambas fuentes de datos. Para Altum, los valores oscilaron desde aproximadamente 9.98% hasta 56%, con una mediana alrededor del 35–40%. Para Planet, los valores fueron más ampliamente dispersos, desde 0% hasta 90.44%, con una mediana más alta (por encima del 50%), mostrando la presencia de valores tanto bajos como muy altos, lo que indica mayor variabilidad.

En cuanto a la distribución, los datos Planet mostraron mayor dispersión, con mayor variabilidad y un rango más amplio (de 0% a 90.44%). La tendencia central, representada por la mediana, fue mayor para Planet que para Altum, sugiriendo que, en general, Planet produjo una estimación de área foliar mayor que Altum. En términos de dispersión y valores atípicos, Planet presentó alta variabilidad en el desempeño, mientras que los datos Altum parecieron más consistentes.

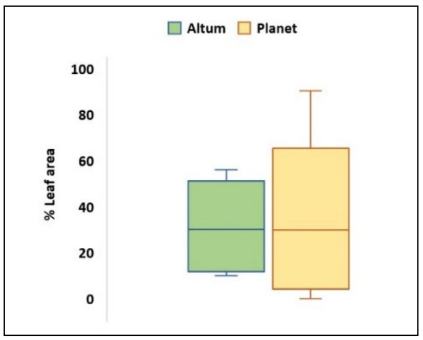


Figure 3. Boxplot comparando el % de área foliar de datos Altum vs. Planet.

Por lo tanto, los datos de ultra alta resolución obtenidos mediante el sensor Altum permitieron un mapeo preciso de la variabilidad de caducidad foliar entre árboles individuales y pérdida de hojas en las copas. Por otro lado, los datos Planet sobreestimaron la caducidad en las parcelas ubicadas en la parte norte de la finca (T1 a T5) y la subestimaron en las parcelas del sur (T6 a T10).

Marzialetti *et al*. (2022) evaluaron la detección de *Acacia saligna* mediante sensores multiespectrales embarcados en vehículos aéreos no tripulados (UAV) en comparación con imágenes de Sentinel-2 y PlanetScope, destacando que los UAV permitieron identificar bordes y manchas pequeñas con mayor precisión, superando a los satélites en la estimación de biomasa e índice de área foliar (LAI) en doseles exóticos densos. Esta superioridad espacial explica la mayor exactitud con cámara MicaSense Altum frente a Planet al discriminar copas individuales de *Tectona grandis*

Rossi *et al*. (2024) correlacionaron flujos de CO_2 edáfico con índices multiespectrales derivados del sensor Parrot Sequoia (UAV montado en eBee RTK, resolución de 0,1 m) en plantaciones de *Eucalyptus*, proponiendo los UAV como proxy superior a plataformas satelitales debido a su elevada resolución y flexibilidad operativa en bosques exóticos plantados, lo que corrobora con los resultados de este estudio en plantíos de teca en Brasil.

4. CONCLUSIÓN

En general, puede concluirse que el análisis utilizando el IAF con datos Planet alcanzó valores máximos más altos; sin embargo, su alta variabilidad sugiere que es menos consistente entre las parcelas. Por el contrario, los datos Altum demostraron la mayor exactitud del sensor UAV con un desempeño más regular y predecible, principalmente debido al GSD más alto.

El análisis estadístico muestra que los datos Planet presentaron un promedio y mediana de % área foliar más altos, pero con un desempeño menos predecible (mayor variabilidad). Los datos Altum, aunque arrojaron promedios más bajos, exhibieron resultados más uniformes, representando una mayor fidelidad cualitativa y cuantitativa con la variabilidad ambiental, como el contenido de humedad, la existencia de diferentes tipos de suelo, entre otros.

Los resultados presentados aquí pueden no ser generalizables a otras regiones o especies forestales, y las condiciones locales y de sitio deben analizarse de manera individual. No obstante, los resultados obtenidos con la cámara Altum serán superiores a los datos orbitales en cualquier condición de estudio, apoyando una mejor toma de decisiones en el manejo de rodales forestales plantados.

5. REFERENCIAS

Costa, L.; Nunes, L.; Ampatzidis, Y. (2020). A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture (172)*, New York, n. 1, p.1-3. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105334

Francisco, C. N.; Ruiz, P. R. S.; Almeida, C. M.; Gruber, N. C.; Anjos, C. S. (2020). Análise do impacto da correção atmosférica no cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada a partir de Imagem Landsat 8/OLI. *Revista Brasileira de Geografia Física (13)*, Recife n. 1, p. 76-86. https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.1.p076-086

Marzialetti, F.: Di Febbraro, M.; Frate, L.; De Simone, W.; Acosta, A.T. R. and Carranza, M. L. (2022) Synergetic use of unmanned aerial vehicle and satellite images for detecting non-native tree species: An insight into Acacia saligna invasion in the Mediterranean coast. *Front. Environ. Sci. (10)* https://doi:10.3389/fenvs.2022.880626

Pandey, D.; Brown, C. (2000). La teca: uma visión global. Unasylva, Roma, (51), n. 201, p.3-13.

Pedrali, L. D.; Júnior, N. B.; Pereira, R. S.; Tramontina, J.; Alba, E.; Marchesan, J. (2019). Sensoriamento Remoto multiespectral para determinação de níveis de severidade de seca de ponteiros em Eucalyptus spp. *Revista Scientia Forestalis (122)*. https://doi.org/10.18671/scifor.v47n122.05

Pelissari, A. L. (2014). Cultivo da Teca: Características da Espécie para Implantação e Condução de Povoamentos Florestais. Centro Científico Conhecer (1) Goiânia, GO, n.01; p.129.

Rossi, F. S., Della-Silva, J. L., Teodoro, L. P. R. *et al.* (2024). Assessing soil CO_2 emission on eucalyptus species using UAV-based reflectance and vegetation indices. *Sci Rep (14)* https://doi.org/10.1038/s41598-024-71430-2

Weaver, P. L. (1993). Tectona grandis L.f. Teak. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 18p.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.146

Análisis LiDAR del PNOA para la interpretación topográfica del paisaje funerario en el yacimiento del "Castillo de Doña Blanca" (Cádiz, España)

Sicre-González, Pablo [1] **Pecci, Antonio** [1] **Niveau-de-Villedary y Mariñas, Ana María** [1]

[1] Universidad de Cádiz (España), Departamento de Historia, Geografía y Filosofía

ORCID: Sicre-González 0000-0002-6938-0174 Pecci 0009-0001-9771-3634 Niveau-de-Villedary y Mariñas 0000-0002-8888-1169

Correspondencia: pablo.sicre@uca.es antonio.pecci@uca.es anamaria.niveau@uca.es

RESUMEN

El presente estudio analiza el potencial del LiDAR del PNOA para la interpretación topográfica del paisaje funerario asociado al yacimiento fenicio-púnico del Castillo de Doña Blanca (Cádiz), con especial atención a la Necrópolis de las Cumbres. El procesamiento de datos LiDAR ha permitido generar un Modelo Digital del Terreno de alta resolución, analizado mediante técnicas de realce del relieve en SIG. Los resultados han posibilitado identificar anomalías microtopográficas compatibles con estructuras tumulares y redefinir la extensión y organización espacial de la necrópolis, documentando un número significativamente mayor de posibles túmulos respecto a trabajo previos. El estudio pone de manifiesto el valor del LiDAR como herramienta no invasiva para la investigación y gestión del patrimonio arqueológico, estableciendo una base metodológica para futuras prospecciones y análisis geoarqueológicos.

Palabras clave: *LiDAR; paisaje funerario; necrópolis tumular; teledetección arqueológica; Castillo de Doña Blanca.*

Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 9 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis LiDAR del PNOA para la interpretación topográfica del paisaje funerario en el yacimiento del "Castillo de Doña Blanca" (Cádiz, España)

Sicre-González, Pablo [(1)], Pecci, Antonio [(1)], Niveau-de-Villedary y Mariñas, Ana María [(1)]

[(1)] Universidad de Cádiz (España), Departamento de Historia, Geografía y Filosofía.

0000-0002-6938-0174, pablo.sicre@uca.es.

0009-0001-9771-3634, antonio.pecci@uca.es.

0000-0002-8888-1169, anamaria.niveau@uca.es.

Resumen: El presente estudio analiza el potencial del LiDAR del PNOA para la interpretación topográfica del paisaje funerario asociado al yacimiento fenicio-púnico del Castillo de Doña Blanca (Cádiz), con especial atención a la Necrópolis de las Cumbres. El procesamiento de datos LiDAR ha permitido generar un Modelo Digital del Terreno de alta resolución, analizado mediante técnicas de realce del relieve en SIG. Los resultados han posibilitado identificar anomalías microtopográficas compatibles con estructuras tumulares y redefinir la extensión y organización espacial de la necrópolis, documentando un número significativamente mayor de posibles túmulos respecto a trabajo previos. El estudio pone de manifiesto el valor del LiDAR como herramienta no invasiva para la investigación y gestión del patrimonio arqueológico, estableciendo una base metodológica para futuras prospecciones y análisis geoarqueológicos.

Palabras clave: LiDAR; paisaje funerario; necrópolis tumular; teledetección arqueológica; Castillo de Doña Blanca.

LiDAR data from the PNOA for the topographic interpretation of the funerary landscape at the Castillo de Doña Blanca (Cádiz)

***Abstract**: This study analyses the potential of the PNOA's LiDAR data for the topographical interpretation of the funerary landscape associated with the Phoenician-Punic site of Castillo de Doña Blanca (Cádiz), with particular focus on the Necropolis of Las Cumbres. The processing of LiDAR data has enabled the generation of a high-resolution Digital Elevation Model, analysed using GIS-based relief enhancement techniques. The results have made it possible to identify microtopographical anomalies consistent with burial mounds and to redefine the extent and spatial organisation of the necropolis, documenting a significantly higher number of potential mounds compared to previous studies. The study highlights the value of LiDAR as a non-invasive tool for the research and management of archaeological heritage, establishing a methodological basis for future surveys and geoarchaeological analyses.*

***Keywords**: LiDAR; funerary landscape; tumulus necropolis; archaeological remote sensing; Castillo de Doña Blanca.*

1. INTRODUCCIÓN

El Castillo de Doña Blanca (CDB), localizado en el término municipal del El Puerto de Santa María (Cádiz, España) (Fig. 1A), constituye uno de los asentamientos fenicio-púnicos más relevantes del Mediterráneo occidental, con ocupación desde finales del siglo IX hasta el III a.n.e. Su conjunto patrimonial incluye el *tell* principal, donde se localiza el asentamiento, además de otras áreas arqueológicas, como la necrópolis tumular de "Las Cumbres" (NC) (Fig. 1B) o el asentamiento situado en la cima de la Sierra de San Cristóbal (SSC) (Fig. 1C) (Ruiz Mata, 1993; Ruiz Mata y Pérez, 1995). Además, a estas zonas se le ha de añadir una nueva área de gran potencial arqueológico documentada gracias a técnicas geofísicas no invasivas (Ruiz Gil *et al*., 2023) en la finca "La Martela" (LM) (Fig. 1D).

Mientras que el asentamiento principal del CDB ha sido objeto de numerosas campañas arqueológicas entre 1979 y 2005, retomadas desde 2024 por un equipo de la Universidad de Cádiz, el grado de intervención en las restantes zonas que integran el Bien de Interés Cultural (Decreto 82/2001) es variable. El poblado de la SSC ha sido objeto de algunas intervenciones, aunque menos sistemáticas que las del CDB. La necrópolis NC ha sido parcialmente excavada (campañas de 1984-1985, con dos estructuras funerarias), mientras que la finca LM solo es conocida hasta el momento por prospecciones geofísicas sin intervenciones arqueológicas directas (Ruiz Gil *et al*., 2023).

La necrópolis (NC), parcialmente afectada por infraestructuras modernas, solo ha sido intervenida arqueológicamente durante las campañas de 1984-

1985, excavándose dos estructuras funerarias. Por su parte, en la finca LM se ha propuesto la hipótesis de la existencia de una amplia zona portuaria a partir de datos de teledetección (Ruiz Gil *et al*., 2023).

Aprovechando la disponibilidad actual de metodologías no invasivas de fácil acceso, como el análisis LiDAR a partir de datos del PNOA, se ha aplicado este enfoque al estudio de la Necrópolis de las Cumbres con el objetivo de mejorar y facilitar la documentación del territorio, más allá de las publicaciones monográficas existentes sobre el Túmulo 1 (Ruiz Mata, 1985, 1991; Ruiz Mata y Pérez, 1989; Córdoba Alonso, 1996; Córdoba Alonso, Ruiz Mata, 2000; Pérez, 2025), resulta necesario recurrir a metodologías no invasivas capaces de documentar el territorio desde una perspectiva integral. En este contexto, el empleo de datos LiDAR procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) permite reconocer anomalías microtopográficas, identificar posibles estructuras tumulares apenas visibles en superficie y contrastar las evidencias previamente sugeridas por la arqueología aérea y el reconocimiento topográfico *in situ*. Este enfoque amplía el conocimiento sobre la organización espacial del paisaje funerario protohistórico y evidencia el valor de la reutilización de recursos abiertos para investigar y reevaluar yacimientos previamente estudiados.

Los resultados aquí presentados constituyen una contribución preliminar dentro de los proyectos del GI[1], cuyos aspectos metodológicos, interpretativos y contextuales serán abordados con mayor detalle en futuras publicaciones.

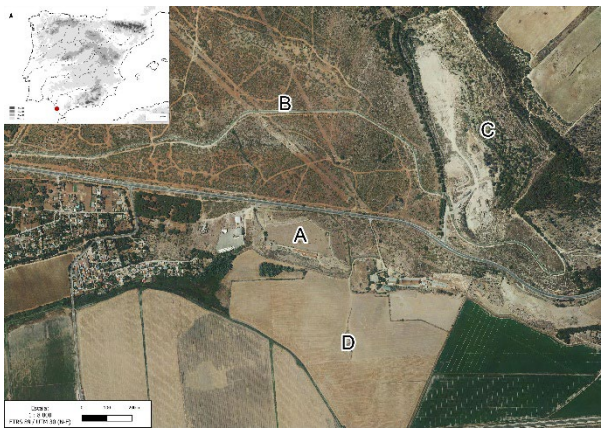


Figura 1. Localización del área arqueológica del Castillo de Doña Blanca (El Puerto de Santa María, Cádiz) A) Castillo de Doña Blanca, B) Necrópolis "Las Cumbres", C) Poblado de la Sierra de San Cristóbal, D) Finca "La Martela". Elaboración propia.

2. CASO DE ESTUDIO

2.1. Características topográficas de la NC

El espacio funerario NC se emplaza al norte del CDB, en la falda meridional de la Sierra de San Cristóbal, ocupando un espacio amplio caracterizado por suaves elevaciones y pequeñas lomas de escasa altura. Desde el punto de vista geomorfológico, el terreno combina zonas ligeramente onduladas con cerros aislados que dominan visualmente el entorno inmediato, configurando un paisaje propicio para la implantación de estructuras tumulares visibles en el territorio. La disposición de los túmulos sobre cimas y laderas sugiere una selección consciente de puntos elevados con potencial simbólico y visual, favoreciendo tanto la monumentalidad como la relación visual con el asentamiento protohistórico del CDB y con los corredores naturales de circulación. La posible presencia de canales o surcos excavados en la roca evidencia además una dinámica hídrica condicionada por la pendiente de la sierra, lo que habría influido en la conservación diferencial de las estructuras y en la organización espacial del conjunto funerario.

2.2. Estado de la cuestión

Las referencias textuales sobre la necrópolis del CDB se centran principalmente en la morfología y el registro material del denominado Túmulo 1. La información procede de las campañas de 1984-1985 (Ruiz Mata, 1985, 1991; Ruiz Mata y Pérez, 1989; Córdoba Alonso, 1996; Pérez, 2025), en las que se excavaron dos estructuras: el Túmulo 1 y el Hipogeo 1 (algunas referencias en Ruiz Mata, 2022, p. 328); se menciona además la identificación superficial de un Túmulo 2 y la posible existencia de construcciones asociadas que configurarían complejos tumulares (Ruiz Mata, 2022, p. 329). Las prospecciones visuales sugieren la presencia de numerosos túmulos actualmente ocultos por la vegetación y una organización espacial en dos sectores: uno occidental, con mayor concentración de estructuras, y otro oriental, próximo a la Sierra de San Cristóbal, con evidencias de menor entidad (Ruiz Mata, 2022, pp. 327-328). Las sepulturas se disponen sobre pequeñas elevaciones, ocupando cimas y laderas, en un paisaje marcado por suaves relieves y posibles cauces excavados en la roca que canalizarían el agua desde cotas superiores (Ruiz Mata, 1991, p. 207). Morfológicamente, se documentan túmulos de sección semicircular, en ocasiones interpretables como troncocónicos por procesos erosivos comparables tipológicamente a los túmulos A, B y E de Setefilla (Lora del Río, Sevilla) (Aubet Semmler, 1975), que constituyen uno de los paralelos más cercanos para el análisis de este tipo de estructuras.

El Túmulo 1, único ejemplo protohistórico excavado, presenta unos 22 m de diámetro y una altura media de 1,5 m, con al menos 62 enterramientos de incineración datados en el siglo VIII a.n.e. (Ruiz Mata, 1985, 1991; Ruiz Mata y Pérez, 1989; Córdoba Alonso, 1996; Pérez, 2025). El Hipogeo 1, de planta circular (3 m de diámetro y 1,8 m de altura), adscrito a la Edad del Cobre, albergaba restos de entre 24 y 25 individuos y evidencias de

[1] Grupo de Investigación del PAIDI "PHOENIX MEDITERRANEA (HUM-509); Proyecto PDC2025-164863-I00 financiado por MICIU/AEI /10.13039/501100011033; PHOENIX-UASL. Research on PHOENIcian-Punic sites in Andalusia with eXperimental Unmanned Aerial System with LiDAR, financiado de la Comisión Europea (MSCA PF, Proyecto 101155484); «Mapping Gadir» (proyecto PDC2025-164863-I00) financiado de la Agencia Estatal de Investigación (AEI).

posibles prácticas rituales (Ruiz Mata y Pérez, 1995, p. 114). El Túmulo 2 y las estructuras secundarias carecen aún de caracterización morfológica y dimensional precisa, ya que no se han excavado.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Análisis LiDAR

Los datos LiDAR empleados en el caso de estudio del CDB proceden de los archivos digitales disponibles en el Instituto Geográfico Nacional, correspondientes al programa "LiDAR de 3ª Cobertura (2022-2025)" con una densidad aproximada de 5 puntos/m². Tras su clasificación y procesamiento, dichos datos permitieron generar un Modelo Digital del Terreno (MDT) ráster de alta resolución y calidad, base fundamental para los análisis posteriores.

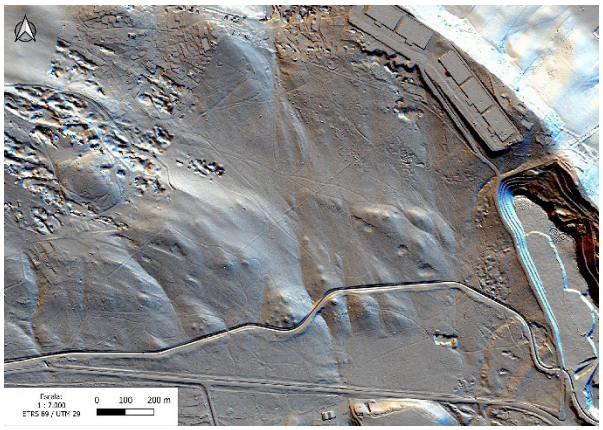


Figura 2. Visualización *Multi-Hillshading* RGB. Obra derivada de LiDAR-PNOA-cob3 2022-2025 CC-BY 4.0 scne.es



Figura 3. Visualización VAT. Obra derivada de LiDAR-PNOA-cob3 2022-2025 CC-BY 4.0 scne.es

El tratamiento y análisis de la información se llevó a cabo mediante QGIS, FugroViewer y LAStools. Las visualizaciones se generaron con Relief Visualization Tool (RVT), aplicando un conjunto de técnicas de realce del relieve seleccionadas por su eficacia en la detección de anomalías microtopográficas en contextos arqueológicos (Kokalj *et al*., 2019; Štular *et al*., 2021). Entre ellas, Multi-Hillshading RGB (Fig. 2) combina iluminaciones desde múltiples direcciones para reducir la dependencia de la orientación de la luz y VAT (Visibility Analysis Tool) evalúa la visibilidad acumulada desde el terreno (Fig. 3).

3.2. Análisis SIG

Una vez procesada la información LiDAR, se procedió al análisis detallado de las anomalías detectadas en el SIG (QGIS). En primer lugar, se diferenciaron aquellas de origen contemporáneo mediante el uso de ortofotos históricas del PNOA, prestando especial atención a la posible interferencia de la vegetación de baja densidad en la lectura de las distintas visualizaciones. Tras depurar los datos y minimizar posibles errores derivados de interpretaciones imprecisas, fue posible identificar con claridad diversas anomalías de carácter convexo, que fueron georreferenciadas mediante puntos en el entorno SIG.

4. RESULTADOS

El análisis de los datos LiDAR permitió identificar con claridad diversas anomalías microtopográficas en el ámbito de la NC (Fig. 4), distinguiéndose tanto alteraciones negativas asociadas a colapsos de antiguas canteras de extracción de caliza como variaciones superficiales vinculadas a dinámicas hídricas. Paralelamente, la georreferenciación de las estructuras previamente documentadas posibilitó integrar por primera vez en un entorno SIG la localización precisa de los túmulos 1 y 2 y a otros elementos tumulares conocidos. A partir del MDT se obtuvieron datos altimétricos relativos que facilitaron la caracterización morfológica de las estructuras y la detección de nuevas anomalías convexas compatibles con túmulos. Como resultado preliminar, se identificaron 35 posibles nuevas estructuras tumulares de tamaño medio y grande, elevando el número total estimado hasta 59. La totalidad de las evidencias documentadas, incluidas las de reducidas dimensiones no señaladas en este estudio, deberán ser verificadas mediante trabajo de campo.

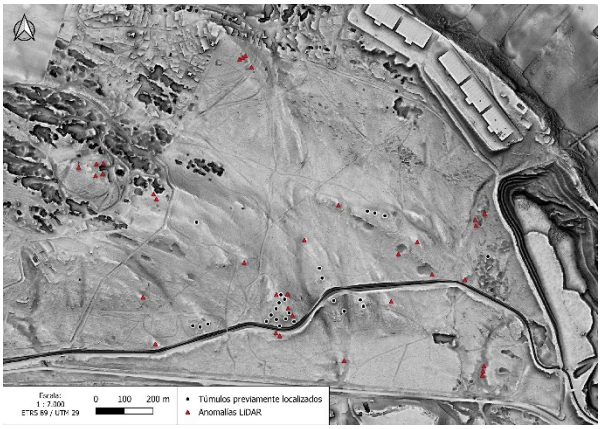


Figura 4. Túmulos ubicados previamente y anomalías detectadas mediante LiDAR en la NC. Obra derivada de LiDAR-PNOA-cob3 2022-2025 CC-BY 4.0 scne.es

5. DISCUSIÓN

Los resultados del análisis LiDAR permiten plantear la hipótesis de que la extensión y complejidad espacial de la necrópolis podrían ser mayores de lo considerado en estudios previos. Las investigaciones llevadas a cabo en

las últimas décadas del siglo XX, basadas en intervenciones puntuales y reconocimiento superficial con visibilidad limitada, no pudieron beneficiarse de las herramientas de teledetección actuales. La identificación de nuevas anomalías compatibles con túmulos, especialmente en el sector occidental, apunta a la posibilidad de un área funeraria más amplia y organizada de manera más compleja, con posibles estructuras principales acompañadas por túmulos secundarios.

No obstante, factores de ambigüedad como cavidades subterráneas, procesos erosivos y variaciones asociadas a cauces o escorrentías, ya señalados en estudios anteriores (Ruiz Mata, 2022, p. 325), introducen incertidumbre en la interpretación. Por ello, estas hipótesis requieren contrastación directa mediante prospecciones sistemáticas y estudios geoarqueológicos que permitan validar la naturaleza antrópica de las anomalías detectadas.

6. CONCLUSIONES

El análisis LiDAR ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad para el estudio de paisajes funerarios protohistóricos poco intervenidos. La generación de un MDT de alta resolución a partir de datos PNOA ha permitido aproximarse a la microtopografía del área con un nivel de detalle difícil de alcanzar mediante métodos convencionales, si bien estos también habrían podido aportar información relevante, aunque con mayor complejidad y coste.

Los resultados obtenidos sugieren, como hipótesis a contrastar, que la necrópolis de Las Cumbres podría presentar una extensión, densidad y complejidad mayores de lo que se conocía hasta ahora, con cerca de medio centenar de anomalías convexas compatibles con posibles túmulos. Esta organización apuntaría, en caso de confirmarse su naturaleza antrópica, a un paisaje funerario articulado y jerarquizado, vinculado a la topografía y la visibilidad.

Metodológicamente, la combinación de visualizaciones LiDAR con SIG ha proporcionado una base espacial coherente para la detección y reevaluación de evidencias arqueológicas. En conjunto, el estudio confirma el valor del LiDAR de acceso abierto para la investigación y gestión patrimonial, estableciendo una base sólida para futuras fases de validación empírica e integración territorial del conjunto protohistórico del Castillo de Doña Blanca.

7. REFERENCIAS

Aubet Semmler, M. E. (1975). *La necrópolis de Setefilla en Lora del Río, Sevilla*. Departamento de Prehistoria y Arqueología. Universidad de Barcelona.

Córdoba Alonso, I. (1996). La Cerámica Pintada con Motivos Radiales del Túmulo 1 de la Necrópolis de las Cumbres (El Puerto de Santa María, Cádiz). En *Actas do II Encontro de Arqueología do Sudoeste Peninsular* (pp. 131–139). Universidade do Algarve.

Kokalj, Ž., Zakšek, K., & Oštir, K. (2019). Visualizations of lidar derived relief models. *Interpreting Archaeological Topography*, *II*(February 2016), 100–114. https://doi.org/10.2307/j.ctvh1dqdz.13

Pérez, C. (2025). *El Túmulo 1 de la necrópolis de Las Cumbres en el Puerto de Santa María (Cádiz). Análisis arqueológico, histórico-cultural, ritual y simbólico. Tesis doctoral inédita.* Universidad Autónoma de Madrid.

Ruiz Gil, J. A., Lagóstena Barrios, L. G., Pérez Marrero, J., Trapero Fernández, P., Catalán González, J., Rondán-Sevilla, I. M., y Ruiz Barroso, M. (2023). GPR Survey in the Punic Harbour of La Martela (El Puerto de Santa Maria, Spain) and the methodology used for the processing and archaeological visualisation of the data. En I. P. Haynes, T. Ravasi, S. Kay, S. Piro, y P. Liverani (Eds.), *Non-Intrusive Methodologies for Large Area Urban Research* (pp. 99–105). Archaeopress. https://doi.org/10.2307/jj.15136039.20

Ruiz Mata, D. (1985). Excavación del Túmulo 1 de la necrópolis de Las Cumbres (Puerto de Santa María, Cádiz). En *Anuario Arqueológico de Andalucía, II Actividades Sistemáticas* (pp. 158–160).

Ruiz Mata, D. (1991). El Túmulo 1 de la necrópolis de Las Cumbres. *Treballs Del Museu Arqueologic D´Eivissa e Formentera, 24*, 207–220.

Ruiz Mata, D. (1993). La colonización fenicia en la Bahía de Cádiz a través del Castillo de Doña Blanca. Puerto de Santa María. En J. M. Campos Carrascto y F. Nocete Calvo (Eds.), *Investigaciones arqueológicas en Andalucía (1985-1992) Proyectos. VI Jornadas de Arqueología andaluza.* (pp. 489–496).

Ruiz Mata, D. (2022). *La ciudad fenicia del Castillo de Doña Blanca (El Puerto de Santa María, Cádiz). Historia y Arqueología, investigaciones (1979-2003).* Cuadernos de Arqueología Mediterránea 28.

Ruiz Mata, D., y Pérez, C. J. (1989). El Túmulo 1 de la necrópolis de “Las Cumbres” (Puerto de Santa María, Cádiz). En M. E. Aubet Semmler (Ed.), *Tartessos. Arqueología protohistórica del bajo Guadalquivir.* (pp. 287–295). Editorial AUSA.

Ruiz Mata, D., y Pérez, C. J. (1995). *El poblado fenicio del Castillo de Doña Blanca (El Puerto de Santa María, Cádiz)*. Ayuntamiento de El Puerto de Santa María.

Štular, B., Lozić, E., y Eichert, S. (2021). Airborne LiDAR-Derived Digital Elevation Model for Archaeology. *Remote Sensing*, *13*(9). https://doi.org/10.3390/rs13091855

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.147

Caracterización de firmas espectrales aplicadas a la detección de restos soterrados: el caso del Forau de la Tuta (Artieda)

Iranzo, Cristian [1] **Montorio, Raquel** [1] **Pérez-Cabello, Fernando** [1] **Angás, Jorge** [1] **Mateos, Alessandro** [2] **Sánchez, Juan Manuel** [3] **González-Piqueras, José** [3] **Sánchez-Virosta, Álvaro** [3]

[1] Universidad de Zaragoza, España

[2] Universitatea Transilvania din Brasov

[3] Universidad de Castilla-La Mancha

ORCID: Iranzo 0000-0002-3359-6213 Montorio 0000-0001-7403-1764 Pérez-Cabello 0000-0003-4831-4060 Angás 0000-0003-3854-2158 Mateos 0009-0002-4974-0432 Sánchez 0000-0003-1027-9351 González-Piqueras 0000-0003-2226-5731 Sánchez-Virosta 0000-0002-3842-3792

Correspondencia: c.iranzo@unizar.es montorio@unizar.es fcabello@unizar.es j.angas@unizar.es alessandro.mateos@unitbv.ro JuanManuel.Sanchez@uclm.es Jose.Gonzalez@uclm.es Alvaro.Sanchez@uclm.es

RESUMEN

Este trabajo evalúa el potencial del análisis hiperespectral de campo para la detección de restos arqueológicos soterrados en contextos con distinta cobertura vegetal, a partir del caso del yacimiento romano del Forau de la Tuta (Zaragoza). Se analizaron 240 firmas espectrales mediante modelos PLS-DA basados en reflectividad y absortividad. Los mejores resultados se obtuvieron en parcelas cultivadas (hasta un 85 %), frente a áreas con vegetación heterogénea (68 %), sin diferencias significativas entre variables. Las bandas más relevantes se situaron en el verde, borde del rojo, infrarrojo próximo y SWIR. Los resultados confirman la influencia de la vegetación y la utilidad de la espectroscopía de campo para la prospección arqueológica no invasiva.

Palabras clave: *prospección arqueológica; teledetección; espectroscopía de campo*

Fecha de recepción: 10 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 10 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Caracterización de firmas espectrales aplicadas a la detección de restos soterrados: el caso del Forau de la Tuta (Artieda)

Iranzo, Cristian [(1)], Montorio, Raquel [(1)], Pérez-Cabello, Fernando [(1)], Angás, Jorge [(1)], Mateos, Alessandro [(2)], Sánchez, Juan Manuel [(3)], González-Piqueras, José [(3)], Sánchez-Virosta, Álvaro [(3)]

[(1)] Universidad de Zaragoza, España.

0000-0002-3359-6213, c.iranzo@unizar.es ; 0000-0001-7403-1764, montorio@unizar.es.

0000-0003-4831-4060, fcabello@unizar.es ; 0000-0003-3854-2158, j.angas@unizar.es.

[(2)] Universitatea Transilvania din Brasov.

0009-0002-4974-0432, alessandro.mateos@unitbv.ro.

[(3)] Universidad de Castilla-La Mancha.

0000-0003-1027-9351, JuanManuel.Sanchez@uclm.es ; 0000-0003-2226-5731, Jose.Gonzalez@uclm.es.

0000-0002-3842-3792, Alvaro.Sanchez@uclm.es.

Resumen: Este trabajo evalúa el potencial del análisis hiperespectral de campo para la detección de restos arqueológicos soterrados en contextos con distinta cobertura vegetal, a partir del caso del yacimiento romano del Forau de la Tuta (Zaragoza). Se analizaron 240 firmas espectrales mediante modelos PLS-DA basados en reflectividad y absortividad. Los mejores resultados se obtuvieron en parcelas cultivadas (hasta un 85 %), frente a áreas con vegetación heterogénea (68 %), sin diferencias significativas entre variables. Las bandas más relevantes se situaron en el verde, borde del rojo, infrarrojo próximo y SWIR. Los resultados confirman la influencia de la vegetación y la utilidad de la espectroscopía de campo para la prospección arqueológica no invasiva.

Palabras clave: prospección arqueológica; teledetección; espectroscopía de campo

Characterization of Spectral Signatures Applied to the Detection of Buried Remains: The Case of Forau de la Tuta (Artieda)

***Abstract**: This study evaluates the potential of field hyperspectral analysis for detecting buried archaeological remains under different types of vegetation cover, using the Roman site of Forau de la Tuta (Zaragoza) as a case study. A total of 240 spectral signatures were analyzed using PLS-DA models based on reflectance and absorptance. The best results were obtained in cultivated plots (up to 85%), compared to areas with heterogeneous vegetation (68%), with no significant differences between variables. The most relevant bands were located in the green, red-edge, near-infrared, and SWIR regions. The results confirm the influence of vegetation and the usefulness of field spectroscopy for non-invasive archaeological prospection.*

***Keywords**: archaeological prospection; remote sensing; field spectroscopy*

1. INTRODUCCIÓN

Las marcas en el cultivo (crop marks) producidas por restos arqueológicos soterrados se asocian a distintas anomalías espectrales. Estudios previos han identificado las regiones del verde (~570 nm), borde del rojo (~700–730 nm) e infrarrojo próximo (~800 nm) como aquellas que presentan una mayor capacidad de discriminación entre cultivos con estrés hídrico y cultivos en estado óptimo (Agapiou & Gravanis, 2024).

En cultivos de cebada y trigo de áreas mediterráneas, el máximo estrés vinculado a estructuras soterradas se produce durante el encañado, fase caracterizada por un crecimiento acelerado del tallo principal (Agapiou *et al*., 2013). En el periodo inmediatamente anterior al espigado, las diferencias en la disponibilidad hídrica y en la profundidad del sistema radicular generan un contraste máximo en la reflectividad (Themistocleous *et al*., 2015). Estas variaciones pueden manifestarse de forma negativa o positiva: sobre estructuras compactas que limitan el desarrollo radicular (por ejemplo, muros o calzadas), el crecimiento se ve restringido y disminuye el vigor vegetal, mientras que sobre elementos que favorecen la retención de humedad y nutrientes, como

antiguos silos, la vegetación presenta un desarrollo superior al del entorno.

Los cultivos cerealistas resultan especialmente adecuados para la detección de marcas en el terreno, debido a que forman cubiertas vegetales uniformes, de raíces profundas y con un comportamiento espectral estable, lo que facilita la expresión de anomalías subsuperficiales de humedad y nutrientes (Materazzi, 2025; Šedina, 2019). Algunas leguminosas, como la alfalfa, también pueden ser útiles, aunque requieren cultivos plurianuales para obtener resultados consistentes. En cambio, las crucíferas, como la colza, y los cultivos tuberosos, como la patata, suelen mostrar una menor eficiencia en las regiones del visible y del infrarrojo cercano, con una ligera mejora en el dominio térmico (James *et al*., 2020).

El objetivo de este trabajo es identificar las longitudes de onda más adecuadas para discriminar elementos soterrados en el yacimiento del Forau de la Tuta (Artieda, Zaragoza), a partir del análisis de firmas espectrales asociadas a marcas de cultivo previamente documentadas. Actualmente protegido como Bien de Interés Cultural (BIC), el enclave presenta restricciones a las prácticas agrarias, lo que ha favorecido el desarrollo de una cubierta vegetal compuesta por gramíneas de bajo porte y densidad heterogénea. La caracterización precisa de la respuesta espectral de este tipo de vegetación frente a estructuras enterradas permitirá mejorar la gestión patrimonial y la detección de nuevos restos en contextos vegetales diversos, más allá de los cultivos cerealistas.

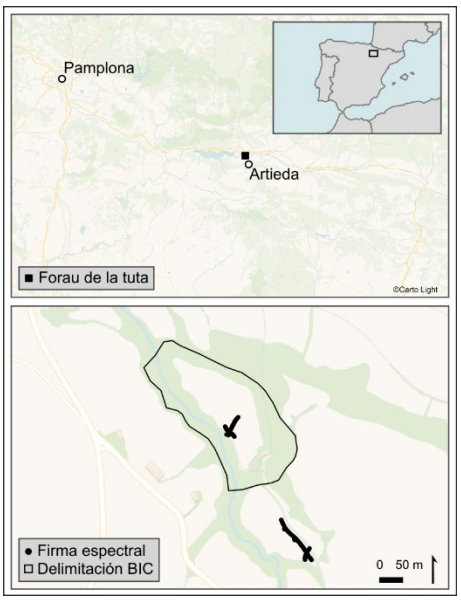


Figura 1. Localización del yacimiento junto con su área de delimitación y la posición de los espectros obtenidos mediante radiometría de campo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en el yacimiento del Forau de la Tuta, un asentamiento urbano de época imperial romana (Asensio *et al*., 2021), situado en una terraza de la margen izquierda del río Aragón, al norte del núcleo urbano de Artieda (Zaragoza). El enclave ocupa una parcela agrícola de aproximadamente 4 ha, dedicada tradicionalmente al cultivo de cereal.

En 2021 se realizaron sondeos arqueológicos que documentaron dos calles de la trama urbana y un edificio termal con un mosaico romano en una de sus salas (Angás *et al*., 2024). El yacimiento fue declarado Bien de Interés Cultural mediante el Decreto 28/2023 de 22 de marzo.

Se tomaron medidas en dos parcelas: una correspondiente al asentamiento, con vegetación de gramíneas colonizadoras procedentes de antiguos campos de cultivo, y otra colindante, dedicada al cultivo de cebada.

2.2. Toma de datos

Se obtuvieron 240 espectros con un radiómetro ASD FieldSpec 4 en mayo de 2024, distribuidos en dos zonas: 85 dentro de la delimitación del BIC, caracterizada por vegetación de gramíneas colonizadora de los campos de cereal recientemente abandonados (clase *Stellarietea mediae*), y 155 en un campo de cebada situado al sur del yacimiento.

Mediante criterio experto, se identificaron 102 espectros correspondientes a zonas con restos soterrados conocidos o con alta probabilidad de contenerlos, y 138 asociados a áreas con muy baja probabilidad de presencia de estructuras enterradas.

Las mediciones se realizaron durante las horas centrales del día, manteniendo una distancia constante entre el sensor y la superficie muestreada. El equipo se calibró mediante un panel Spectralon siempre que se detectaron variaciones en las condiciones de iluminación. Asimismo, se registraron las coordenadas de cada punto mediante un sistema GNSS con precisión centimétrica, obtenida gracias a la corrección diferencial de la red ARAGEA.

2.3. Procesado de las firmas espectrales

El análisis se llevó a cabo mediante una secuencia de código en R, siguiendo el flujo de trabajo propuesto por Wadoux *et al*. (2021). En primer lugar, se integraron las firmas espectrales y sus coordenadas en una única tabla mediante un identificador común. Posteriormente, se aplicaron diversas técnicas de procesamiento.

A partir de la reflectividad medida por el sensor, se calculó la absortividad, y a ambas variables se les aplicó el filtro de Savitzky-Golay con una ventana de 11 nanómetros y un polinomio de segundo orden. Se eliminaron las longitudes de onda afectadas por el ruido generado por los aerosoles atmosféricos y por los cambios entre detectores.

2.4. Caracterización de las firmas

Se empleó el análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) como método de clasificación supervisada para discriminar entre muestras con y sin restos soterrados a partir de los datos espectrales. Este método proyecta las variables predictoras en un conjunto reducido de componentes

latentes, lo que permite abordar problemas de alta dimensionalidad y multicolinealidad.

El modelo se entrenó con el 70% de los datos, reservándose el 30% restante para la validación. A partir del entrenamiento se obtuvieron los coeficientes de regresión asociados a cada longitud de onda, utilizados como medida de su capacidad predictiva.

El número óptimo de componentes latentes se seleccionó como el mínimo número de componentes que alcanzaba el máximo valor de acierto en la muestra de entrenamiento, deteniendo la incorporación de nuevos componentes cuando el rendimiento comenzaba a disminuir. La exactitud final se evaluó mediante la *overall accuracy* calculada sobre la muestra de validación.

Se entrenaron cuatro modelos diferenciados según la localización de los espectros (dentro y fuera del BIC) y el tipo de variable analizada (reflectividad y absortividad).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo PLS-DA entrenado con firmas obtenidas dentro del BIC se ajustó con cinco componentes latentes para la reflectividad y nueve para la absortividad (Tabla 1). La mayor exactitud se alcanza con el modelo de reflectividad (68 %), un valor similar al obtenido por Gravanis y Agapiou (2024) mediante datos sintéticos (~70 %).

Los modelos entrenados con firmas procedentes del campo de cultivo presentaron exactitudes globales superiores: 85 % para el modelo en reflectividad y 83 % para el de absortividad. Nuevamente, el modelo basado en absortividad requirió un mayor número de componentes latentes (10) que el de reflectividad (6). Estos resultados son comparables a los obtenidos por Gravanis y Agapiou (2025) en cultivos controlados de cebada (~92 %).

No se observa una mejora significativa asociada al uso de absortividad frente a reflectividad. En cambio, el tipo de vegetación influye notablemente en el rendimiento del modelo, siendo un 24 % superior en los casos entrenados con datos procedentes de campos de cultivo bien gestionados.

Tabla 1. Evaluación de la exactitud global de la clasificación en la muestra de validación. R = reflectividad; A = absortividad; N comp = número de componentes latentes.

Zona	Espectro	N comp.	Exactitud
BIC	R	5	0.61
BIC	A	9	0.68
Campo	R	6	0.85
Campo	A	10	0.8

El análisis de las longitudes de onda con mayor contribución en los modelos confirma los patrones descritos en la literatura. Como se muestra en la Figura 2, las bandas del verde (~570 nm), borde del rojo (~700–730 nm) e infrarrojo próximo (~800 nm) destacan respecto al resto.

En el caso del BIC, los coeficientes de regresión en el borde del rojo presentan valores relativamente más elevados que en el campo de cultivo, lo que sugiere una mayor capacidad predictiva de esta región en contextos de vegetación natural. Un comportamiento similar se observa en torno a los ~400 nm, aunque estas bandas también presentan valores elevados en los modelos entrenados con datos de cultivo.

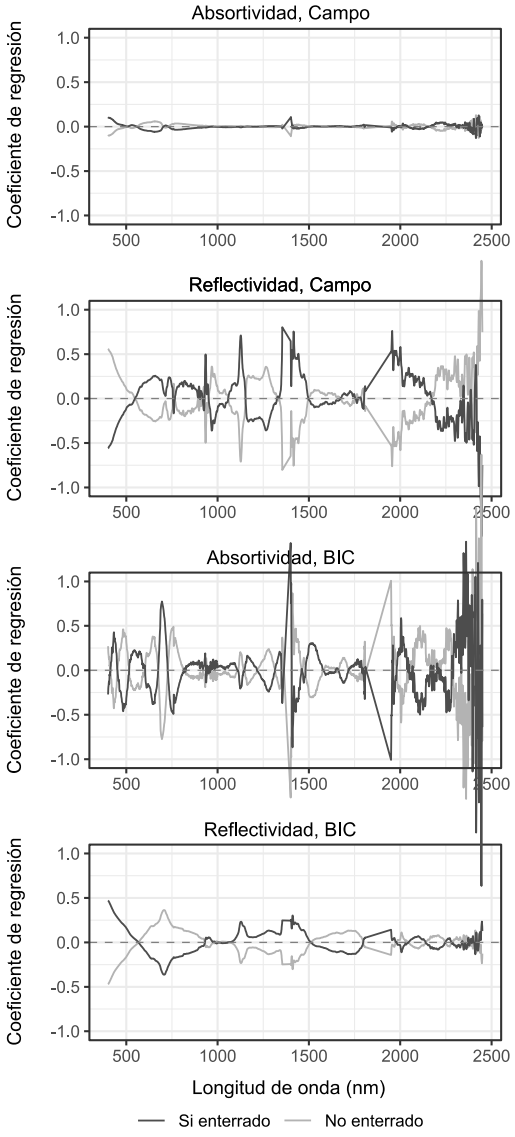


Figura 2. Coeficientes de regresión por longitud de onda en los cuatro modelos analizados.

Las bandas próximas a ~1400 nm y ~1900 nm en los espectros de absortividad muestran una contribución aún mayor, confirmando la utilidad de las regiones cercanas al SWIR en la detección de restos soterrados. En los espectros de reflectividad del campo de cultivo también se observan valores elevados en estas regiones, aunque de menor magnitud que en el BIC.

Las longitudes de onda superiores a 2250 nm parecen estar afectadas por ruido instrumental, lo que explicaría los coeficientes anormalmente elevados en todos los modelos. Asimismo, los valores reducidos observados en el modelo de absortividad del campo de cultivo

podrían estar relacionados con limitaciones propias de esta unidad de medida. No obstante, dado que los coeficientes son relativos a cada modelo, lo relevante son sus variaciones internas, que siguen mostrando máximos en el azul, el borde del rojo y el SWIR.

Finalmente, los coeficientes de regresión presentan un comportamiento inverso entre las clases “Si enterrado” y “No enterrado”, con valores simétricos de signo opuesto. Esto indica que no existen longitudes de onda con mayor capacidad discriminante para una clase que para la otra.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman la viabilidad del análisis hiperespectral de campo para la detección de restos arqueológicos soterrados en contextos con cubiertas vegetales heterogéneas. Las bandas del verde, el borde del rojo, el infrarrojo próximo y el SWIR se identifican como las regiones más relevantes para la discriminación de estructuras enterradas, en concordancia con la literatura previa. Los modelos PLS-DA muestran un rendimiento significativamente superior en parcelas con cultivos cerealistas bien gestionados, lo que pone de manifiesto la influencia determinante del tipo de vegetación en la respuesta espectral. En conjunto, estos resultados amplían el potencial de la prospección arqueológica no invasiva en entornos no cultivados intensivamente y proporcionan una base metodológica para su aplicación en escenarios vegetales diversos.

5. AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se llevó a cabo gracias a las ayudas de movilidad de la red NetOPS y a la beca predoctoral de la DGA (2022–2026) concedidas a Cristian Iranzo. Asimismo, se contó con financiación del proyecto "Gemelos Digitales para la conservación del patrimonio cultural: gestión, monitorización e interpretación de datos geoespaciales. DiGHER" (CPP2022-009631), financiado por el MCIU/AEI/10.13039/501100011033 y por el programa “NextGenerationEU”/PRTR de la Unión Europea (IP: Dr. Jorge Angás); del proyecto "Análisis multidisciplinar y gemelos digitales para el redescubrimiento del poblamiento romano en el prepirineo: el Forau de la Tuta (Artieda)" (PROY_H03_24) financiado por el Gobierno de Aragón (IP: Dra. Lara Íñiguez y Dra. Paula Uribe); del proyecto Sens4Soil (PID2024-160889OA-I00), financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (IP: Raquel Montorio), y del proyecto PaF (PID2020-118886RB-I00), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (IP: Fernando Pérez-Cabello). Alessandro Mateos está financiado el programa Marie Skłodowska-Curie Actions n.º 101126643 (CHORAL).

6. REFERENCIAS

Agapiou, A., & Gravanis, E. (2024). A Machine-Learning-Assisted Classification Algorithm for the Detection of Archaeological Proxies (Cropmarks) Based on Reflectance Signatures. *Remote Sensing, 16*, 1705. https://doi.org/10.3390/rs16101705

Agapiou, A., Hadjimitsis, D., Sarris, A., Georgopoulos, A., & Alexakis, D. (2013). Optimum temporal and spectral window for monitoring crop marks over archaeological remains in the Mediterranean region. *Journal of Archaeological Science, 40*, 1479-1492. https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.10.036.

Asensio Esteban, J. Á., Uribe Agudo, P., Navarro Caballero, M., Magallón Botaya, M. Á., Angás Pajas, J., et al. (2021). El Forau de la Tuta (Artieda, Jacetania, Zaragoza), una ciudad imperial romana, hasta ahora desconocida, de la vertiente sur de los Pirineos. In IV Congreso CAPA. Arqueología, patrimonio aragonés. Homenaje a Pilar Utrilla (pp. 207–216). Zaragoza, Spain.

Angás, J., Uribe, P., Íñiguez, L. M., Asensio, J. Á., Navarro, M., Ariño, E., Magallón, M.ª Á., Lanzas, Ó., Concha, C., Muñiz, O., & Mañas, I. (2024). La geomática como estrategia multiescala para la investigación y gestión del patrimonio arqueológico: El Forau de la Tuta (Artieda, Zaragoza). In J. I. Lorenzo Lizalde & J. M. Rodanés Vicente (Eds.), V Congreso de Arqueología y Patrimonio Aragonés: Actas (pp. 189–200). Zaragoza, Spain.

James, K., Nichol, C., Wade, T., Cowley, D., Poole, S., Gray, A., & Gillespie, J. (2020). Thermal and Multispectral Remote Sensing for the Detection and Analysis of Archaeologically Induced Crop Stress at a UK Site. *Drones, 4*, 61. https://doi.org/10.3390/drones4040061.

Gravanis, E., & Agapiou, A. (2024). Physically-Based Detection Algorithm of Buried Archaeological Remains Using Spectral Signatures. I*EEE Access, 12*, 197217-197232. https://doi.org/10.1109/access.2024.3521047.

Gravanis, E., & Agapiou, A. (2025). Physically Based Predictive Modelling of Archaeological Proxies Using Cropmarks. *Archaeological Prospection. 33*, 177-187. https://doi.org/10.1002/arp.70015.

Materazzi, F. (2025). Sowing, Monitoring, Detecting: A Possible Solution to Improve the Visibility of Cropmarks in Cultivated Fields. *Journal of Imaging, 11*. https://doi.org/10.3390/jimaging11030071.

Šedina, J., Housarová, E., & Raeva, P. (2019). Using RPAS for the detection of archaeological objects using multispectral and thermal imaging. European *Journal of Remote Sensing, 52,* 182 - 191. https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1562848.

Themistocleous, K., Agapiou, A., Cuca, B., & Hadjimitsis, D. (2015). Unmanned Aerial Systems and Spectroscopy for Remote Sensing Applications in Archaeology. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1419-1423. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-7-w3-1419-2015.

Wadoux, A. M. J.-C., Malone, B., Minasny, B., Fajardo, M., & McBratney, A. B. (2021). Soil spectral inference with R: Analysing digital soil spectra using the R programming environment. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64896-1

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.163

Modelado de las fracciones de carbono orgánico del suelo mediante espectroscopía vis-SWIR

Montorio Llovería, Raquel [1] **Nadal Romero, Estela** [2] **Pérez Cabello, Fernando** [1] **Badía Villas, David** [1]

[1] Universidad de Zaragoza, España

[2] Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), España

ORCID: Montorio Llovería 0000-0001-7403-1764 Nadal Romero 0000-0002-4651-7828 Pérez Cabello 0000-0003-4831-4060 Badía Villas 0000-0002-1006-5030

Correspondencia: montorio@unizar.es estelanr@ipe.csic.es fcabello@unizar.es badia@unizar.es

RESUMEN

El estudio de la dinámica del carbono orgánico del suelo (COS) en los ecosistemas requiere de una correcta evaluación de su distribución en diferentes fracciones (lábiles y estables), por cuanto estas determinan su potencial como sumidero de carbono y permiten valorar la efectividad de las actuaciones de gestión. Aunque la espectroscopía vis-SWIR ha demostrado su potencial para estimar muchas propiedades del suelo, entre ellas el COS total, su uso para estimar las fracciones de carbono es todavía incipiente y son necesarios más estudios en esta línea. En este trabajo se evalúa la capacidad de modelos de regresión PLSR para estimar el COS total y sus fracciones (libre, ocluida y estable), obtenidas por técnicas densimétricas de laboratorio. Se analizaron 57 muestras de suelo procedentes de áreas de cultivo abandonadas en el Pirineo Central. Los resultados indican que el pretratamiento de los espectros combinando el cálculo de la primera derivada y la normalización SNV es el más efectivo. Los modelos lograron estimar con alta precisión el COS total y la fracción estable (R2CV > 0,8). Por el contrario, las fracciones lábiles —libre y ocluida— presentaron un ajuste moderado (0,6 < R2CV < 0,7), que mejoró al combinarse en una única categoría (R2CV = 0,76). Aunque se considera necesario extender esta metodología a nuevas muestras para su validación definitiva, los resultados confirman su potencial para caracterizar la estabilidad del carbono de forma robusta.

Palabras clave: *reservas de carbono, fraccionamiento densimétrico, espectroscopía de reflectividad difusa, regresión de mínimos cuadrados parciales*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Modelado de las fracciones de carbono orgánico del suelo mediante espectroscopía vis-SWIR

Montorio Llovería, Raquel [(1)], Nadal Romero, Estela [(2)], Pérez Cabello, Fernando [(1)], Badía Villas, David [(1)]

[(1)] Universidad de Zaragoza, España.

0000-0001-7403-1764, montorio@unizar.es ; 0000-0003-4831-4060, fcabello@unizar.es

0000-0002-1006-5030, badia@unizar.es.

[(2)] Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), España.

0000-0002-4651-7828, estelanr@ipe.csic.es

Resumen: El estudio de la dinámica del carbono orgánico del suelo (COS) en los ecosistemas requiere de una correcta evaluación de su distribución en diferentes fracciones (lábiles y estables), por cuanto estas determinan su potencial como sumidero de carbono y permiten valorar la efectividad de las actuaciones de gestión. Aunque la espectroscopía vis-SWIR ha demostrado su potencial para estimar muchas propiedades del suelo, entre ellas el COS total, su uso para estimar las fracciones de carbono es todavía incipiente y son necesarios más estudios en esta línea. En este trabajo se evalúa la capacidad de modelos de regresión PLSR para estimar el COS total y sus fracciones (libre, ocluida y estable), obtenidas por técnicas densimétricas de laboratorio. Se analizaron 57 muestras de suelo procedentes de áreas de cultivo abandonadas en el Pirineo Central. Los resultados indican que el pretratamiento de los espectros combinando el cálculo de la primera derivada y la normalización SNV es el más efectivo. Los modelos lograron estimar con alta precisión el COS total y la fracción estable ($R^2CV > 0,8$). Por el contrario, las fracciones lábiles —libre y ocluida— presentaron un ajuste moderado ($0,6 < R^2CV < 0,7$), que mejoró al combinarse en una única categoría ($R^2CV = 0,76$). Aunque se considera necesario extender esta metodología a nuevas muestras para su validación definitiva, los resultados confirman su potencial para caracterizar la estabilidad del carbono de forma robusta.

Palabras clave: reservas de carbono, fraccionamiento densimétrico, espectroscopía de reflectividad difusa, regresión de mínimos cuadrados parciales

Modelling soil organic carbon fractions using vis-SWIR spectroscopy

***Abstract**: The study of soil organic carbon (SOC) dynamics in ecosystems requires a proper assessment of its distribution across different fractions (labile and stable), as these determine its potential as a carbon sink and allow for evaluating the effectiveness of management actions. Although vis-SWIR spectroscopy has demonstrated its potential to estimate many soil properties, including total SOC, its use for estimating carbon fractions is still incipient, and more research is needed in this line. This study evaluates the capacity of PLSR models to estimate total SOC and its fractions (free, occluded, and heavy), obtained through laboratory densimetric methods. A total of 57 soil samples from abandoned croplands in the Central Pyrenees were analyzed. Results indicate that pretreatment combining the first derivative and SNV normalization is the most effective. The models were able to estimate total SOC and the stable fraction with high precision ($R^2CV > 0.8$). Conversely, free and occluded light fractions showed a moderate fit ($0.6 < R^2CV < 0.7$), which improved when combined into a labile pool ($R^2CV = 0.76$). Although it is necessary to extend this methodology to other samples and regions for its definitive validation, the results confirm its potential for a robust characterization of carbon stability.*

***Keywords**: carbon pools, density fractionation, diffuse reflectance spectroscopy, partial least squares regression*

1. INTRODUCCIÓN

El carbono orgánico (COS) es un componente fundamental del suelo, esencial para la funcionalidad del ecosistema y la provisión de servicios (Lal, 2016). En la actualidad, el mantenimiento y la mejora del contenido de COS mediante la adopción de prácticas de gestión recomendadas es crucial para aspectos tan relevantes

como la seguridad alimentaria, la mitigación del cambio climático y otros retos reconocidos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Keesstra *et al*., 2016).

El COS varía en función de factores ambientales (p.ej. clima, tipo de suelo o vegetación), perturbaciones (p.ej. incendios forestales) y factores inducidos por el hombre (p.ej. cambios de uso y cobertura y su gestión), afectando de forma distinta a sus componentes (O'Rourke *et al*., 2015). Así, mientras que la fracción lábil, con tasas de renovación cortas, responde rápidamente, la fracción estabilizada determina el almacenamiento a largo plazo. El balance entre ambas determina el papel del suelo como potencial sumidero de carbono, una información muy valiosa para el desarrollo de políticas de gestión. En consecuencia, una monitorización del COS debe incluir una evaluación cuantitativa de su composición en fracciones o reservorios.

Frente a los métodos químicos convencionales —complejos, costosos y lentos—, la espectroscopía de reflectancia difusa (DRS, por sus siglas en inglés) ha demostrado ampliamente su potencial para estimar el COS con gran precisión de una manera rentable y rápida (Demattê *et al*., 2019). Sin embargo, la estimación de las fracciones de COS se encuentra todavía en una fase inicial y son pocos los estudios que la han abordado con datos en el rango vis-SWIR.

El objetivo de este trabajo es evaluar el potencial de la espectroscopía vis-SWIR para la estimación de los contenidos de COS total y su distribución en fracciones (lábiles y estables) mediante modelos de regresión aplicados a los espectros de suelos no fraccionados, analizando además el impacto de diferentes técnicas de pretratamiento espectral en la precisión de los modelos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y muestreo

El estudio analiza un conjunto representativo de 57 muestras de suelo superficial (0-5 cm) procedentes de dos zonas del Pirineo Central español: la cuenca de Araguás y el municipio de Bestué, situadas entre los 800 y 1200 m.s.n.m. Las zonas presentan un clima submediterráneo y una cobertura vegetal caracterizada por un mosaico de usos del suelo tras el abandono agrícola: repoblaciones forestales (*Pinus nigra* y *Pinus sylvestris*), matorral de recolonización natural (*Genista scorpius*, *Buxus sempervirens*), pastizales y zonas de cárcavas. Los suelos, desarrollados sobre margas y calizas, se clasifican como regosoles lépticos calcáricos y cambisoles endolépticos calcáricos según la taxonomía WRB, con texturas que varían de franco-limosa a franco-arcillosa.

2.2. Fraccionamiento físico y análisis químico

Las muestras de suelo fueron separadas en tres fracciones aplicando el método densimétrico adaptado por Cerli *et al*. (2012):

- Fracción libre (FLF): material orgánico joven y de ciclo rápido.
- Fracción ocluida (OLF): material orgánico atrapado en agregados.
- Fracción estable (HF): material asociado a la fracción mineral, resistente y de ciclo lento.

Para el análisis estadístico, las fracciones FLF y OLF se analizaron también agrupadas en una única categoría —fracción lábil—. Para el cálculo del COS, se determinó el carbono total mediante un analizador elemental. En aquellas muestras con presencia de $CaCO_3$, estas se analizaron con el método calcímetro de Bernard.

2.3. Adquisición y pretratamiento espectral

Las medidas radiométricas se realizaron sobre las muestras de suelo (seco y tamizado) utilizando un espectrómetro ASD FieldSpec 4 (350-2500 nm). Las lecturas se tomaron en laboratorio bajo condiciones de iluminación controladas, utilizando una sonda de contacto y un panel de referencia Spectralon para la transformación de los valores a reflectividad relativa.

Para optimizar la calidad de la señal, se aplicó como tratamiento básico un suavizado mediante el filtro de Savitzky-Golay (SG) con una ventana de 11 nm. Tomando como referencia estas firmas filtradas, se evaluaron diferentes técnicas de pretratamiento que incluyeron métodos de linealización, corrección de la dispersión y derivadas espectrales (Rinnan *et al*., 2009) para determinar el tratamiento óptimo en la modelización del COS. Concretamente, se aplicaron las técnicas *Standard Normal Variate* (SNV), *Multiplicative Scatter Correction* (MSC) y primera derivada espectral (FDS), junto con sus combinaciones.

2.4. Modelización estadística

La relación entre los espectros del suelo y los contenidos de COS (total y fraccionado) se modeló mediante Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLSR, por sus siglas en inglés), técnica de referencia en el análisis quimiométrico de suelos (Gozukara *et al*., 2025).

El flujo de trabajo incluyó la transformación logarítmica de los datos de COS para corregir su asimetría positiva. Debido al tamaño de la muestra, los modelos se desarrollaron mediante una validación cruzada de 5 particiones, determinando el número óptimo de variables latentes (VL) mediante la aproximación 1-sigma. El rendimiento se evaluó a través del coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio de predicción (RMSE) y la ratio de desviación del rendimiento (RPD).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del COS y sus fracciones

El contenido total de COS varió entre 10,3 y 72,9 mg g^{-1}, con un valor promedio de 34,6 mg g^{-1} (Tabla 1). Tras el fraccionamiento, la recuperación de masa fue casi total (99,9%), mientras que se recuperó el 93,2% del COS original. El contenido de COS presentó una asimetría positiva y una distribución de frecuencia log-normal, en concordancia con las distribuciones reportadas en estudios previos (Baldock *et al*., 2013; Henaka Arachchi *et al*., 2016).

Tabla 1. Estadísticas descriptivas del COS (mg g^{-1})

COS	Min	Max	Media	DE	Asimetría
Total	10,26	72,94	34,55	13,71	0,77
FLF	1,20	27,65	6,50	5,55	1,98
OLF	0,29	21,41	6,65	4,65	0,95
HF	5,59	37,68	18,61	7,81	1,43

El análisis de correlación de Pearson (Tabla 2) reveló dinámicas distintas entre las fracciones. El COS total mostró una fuerte correlación con la fracción pesada (HF), lo cual es coherente dado que la HF representa, en promedio, el 96% de la masa de suelo recuperada. Las fracciones ligeras (FLF y OLF) presentaron una correlación muy alta entre sí, pero no mostraron una relación significativa con los niveles de la fracción pesada (HF). Se observaron patrones similares en los estudios de Knox *et al*. (2015) y Vasques *et al*. (2009), aunque con valores de correlación significativamente más altos entre las fracciones lábiles y resistentes.

Tabla 2. Matriz de correlación de Pearson

COS	Total	FLF	OLF	HF
Total	1,00			
FLF	0,45**	1,00		
OLF	0,36**	0,79**	1,00	
HF	0,80**	-0,07	-0,09	1,00

** correlaciones significativas al nivel $p < 0,01$

3.2. Evaluación de los pretratamientos

La aplicación de técnicas de pretratamiento mejoró en todos los casos la precisión de las estimaciones de COS total (Tabla 3). Más que los tratamientos individuales, fue el uso combinado de derivadas con técnicas de corrección de dispersión (SNV o MSC) el que generó el mayor impacto. En promedio, estas combinaciones mejoraron el RPD en 1,18 puntos respecto al filtrado básico. Específicamente, la combinación de primera derivada y SNV (FDS-SNV) se identificó como el pretratamiento óptimo, ofreciendo una mejora de 1,37 puntos respecto al modelo base. Estos resultados concuerdan con estudios previos que han demostrado que la aplicación de estas dos técnicas mejora significativamente la capacidad predictiva de los modelos (Dotto *et al*., 2018; Vasques *et al*., 2008).

Tabla 3. Estadísticos de la validación cruzada (CV) de los modelos PLSR para la estimación del COS total según el pretratamiento espectral aplicado. Se resaltan en negrita los valores del método con mejor capacidad predictiva.

Técnica	nVL	R^2CV	RMSECV	RPD
SG	3	0,738	0,092	1,945
SNV	2	0,849	0,069	2,593
MSC	2	0,823	0,075	2,385
FDS	2	0,827	0,074	2,418
FDS-SNV	**2**	**0,909**	**0,054**	**3,313**
FDS-MSC	2	0,889	0,061	2,933

3.3. Rendimiento de los modelos de regresión para la estimación de las fracciones de COS

Los modelos PLSR demostraron una capacidad notable para inferir el contenido de las fracciones de COS (Fig. 1). La fracción estable (HF), representativa del carbono mineralizado más resistente, fue estimada con la mayor precisión, explicando el 83% de la varianza con un RPD de 2,34, lo que califica al modelo como excelente. Por su parte, los modelos para las fracciones lábiles (libre —FLF— y ocluida —OLF—) obtuvieron una precisión moderada, explicando entre el 61-68% de la varianza. Al combinar ambas en la categoría de fracción lábil, el rendimiento mejoró significativamente, alcanzando un R^2CV de 0,76.

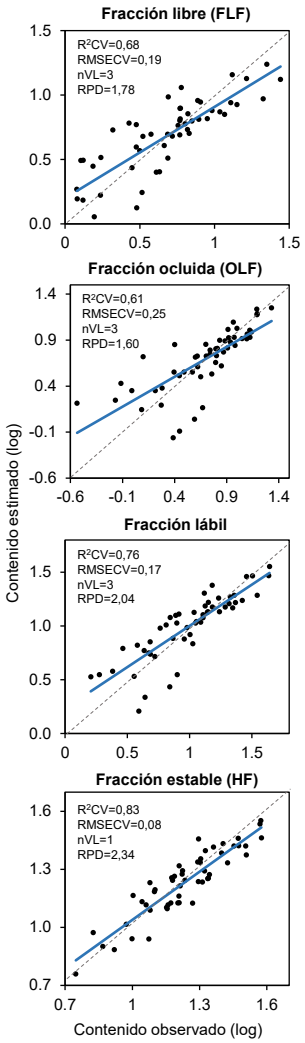


Figura 1. Modelos de regresión para la estimación de las fracciones de COS.

El rendimiento diferencial entre fracciones guarda una estrecha relación con las dinámicas observadas en el análisis de correlación (Tabla 2). El ajuste superior de la fracción estable es consistente con el hecho de que esta representa el mayor porcentaje de la masa del suelo y presenta la correlación más alta con el COS total. Por el contrario, las fracciones lábiles tienen un peso relativo menor en la muestra, lo que reduce su influencia directa en la señal espectral del suelo integral.

Considerando las diferencias en los métodos de fraccionamiento y el procesamiento de datos, los modelos obtenidos presentan una precisión comparable a la reportada en estudios previos (Jaconi *et al*., 2019; Knox *et al*., 2015; Vasques *et al*., 2009; Viscarra Rossel and Hicks, 2015), utilizando además un número significativamente menor de factores (2 variables latentes), lo que demuestra la ausencia de sobreajuste de los modelos.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que la espectroscopía vis-SWIR es una herramienta eficaz para monitorizar no solo el carbono total, sino también su distribución en reservorios con distintas estabilidades. La optimización mediante el pretratamiento que combina el cálculo de la derivada espectral y la normalización SNV permitió obtener estimaciones de precisión moderada (R^2CV = 0,61-0,68) para las fracciones lábiles individuales (FLF y OLF), que mejoraron al agruparse en una categoría combinada (R^2CV = 0,76). Los modelos más robustos se alcanzaron en la estimación de la fracción estable (HF) y el COS total (R^2CV = 0,83 y 0,91, respectivamente), las cuales se encuentran altamente correlacionadas. Si bien el tamaño limitado de la muestra sugiere la necesidad de validar estos hallazgos con bases de datos más extensas, los resultados obtenidos en este contexto de montaña indican que la técnica captura eficazmente la información de los distintos reservorios. Esta metodología se postula, por tanto, como una alternativa rápida y no destructiva a los métodos tradicionales, facilitando el seguimiento de la estabilidad del carbono frente a cambios de uso del suelo. Además, los modelos derivados y la información sobre sus bandas espectrales clave sientan las bases para su transferencia a sensores aeroportados y satelitales, facilitando el mapeo de la dinámica del carbono a escala regional o nacional.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto Sens4Soil (PID2024-160889OA-I00, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades).

6. REFERENCIAS

Baldock, J.A., Hawke, B., Sanderman, J., & Macdonald, L.M. (2013). Predicting contents of carbon and its component fractions in Australian soils from diffuse reflectance mid-infrared spectra. *Soil Res. 51,* 577. https://doi.org/10.1071/SR13077

Cerli, C., Celi, L., Kalbitz, K., Guggenberger, G., & Kaiser, K. (2012). Separation of light and heavy organic matter fractions in soil — Testing for proper density cut-off and dispersion level. *Geoderma 170*, 403–416. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.10.009

Demattê, J. A. M., Dotto, A. C., Bedin, L. G., Sayão, V. M., & Souza, A. B. (2019). Soil analytical quality control by traditional and spectroscopy techniques: Constructing the future of a hybrid laboratory for low environmental impact. *Geoderma, 337*, 111–121. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.010

Dotto, A.C., Dalmolin, R.S.D., ten Caten, A., & Grunwald, S. (2018). A systematic study on the application of scatter-corrective and spectral-derivative preprocessing for multivariate prediction of soil organic carbon by Vis-NIR spectra. *Geoderma 314*, 262–274. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.006

Gozukara, G., Hartemink, A. E., Huang, J. & Demattê, J. A. M. (2025). Prediction accuracy of pXRF, MIR, and Vis-NIR spectra for soil properties—A review. *Soil Science Society of America Journal, 89*(2), e70028. https://doi.org/10.1002/saj2.70028

Henaka Arachchi, M.P.N.K., Field, D.J., & McBratney, A.B. (2016). Quantification of soil carbon from bulk soil samples to predict the aggregate-carbon fractions within using near- and mid-infrared spectroscopic techniques. *Geoderma 267*, 207–214. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.12.030

Jaconi, A., Poeplau, C., Ramirez-Lopez, L., Van Wesemael, B., & Don, A. (2019). Log-ratio transformation is the key to determining soil organic carbon fractions with near-infrared spectroscopy. *European Journal of Soil Science, 70*(1), 127–139. https://doi.org/10.1111/ejss.12761

Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., … & Fresco, L. O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL, 2*(2), 111–128. https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016

Knox, N.M., Grunwald, S., McDowell, M.L., Bruland, G.L., Myers, D.B., & Harris, W.G. (2015). Modelling soil carbon fractions with visible near-infrared and mid-infrared spectroscopy. *Geoderma 239-240*, 229–239. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.10.019

Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security, 5*(4), 212–222. https://doi.org/10.1002/fes3.96

O'Rourke, S. M., Angers, D. A., Holden, N. M., & McBratney, A. B. (2015). Soil organic carbon across scales. Global Change Biology, 21(10), 3561–3574. https://doi.org/10.1111/gcb.12959

Rinnan, Å., Berg, F. van den, & Engelsen, S.B. (2009). Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. TrAC *Trends Anal. Chem. 28*, 1201–1222. https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.07.007

Vasques, G.M., Grunwald, S., & Sickman, J.O. (2008). Comparison of multivariate methods for inferential modeling of soil carbon using visible/near-infrared spectra. *Geoderma 146*, 14–25. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.04.007

Vasques, G.M., Grunwald, S., & Sickman, J.O. (2009). Modeling of Soil Organic Carbon Fractions Using VNIR Spectroscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J. 73*, 176–184. https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0015

Viscarra Rossel, R. A., & Hicks, W. S. (2015). Soil organic carbon and its fractions estimated by visible-near infrared transfer functions. *European Journal of Soil Science, 66*(3), 438–450. https://doi.org/10.1111/ejss.12237

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.254

Modelos de IA para la detección y cuantificación de lodos post-DANA en Valencia mediante imágenes de dron y satélite

Xanxo Prilló, Rox [1] **Román Vázquez, Alejandro** [1] **Tovar Sánchez, Antonio** [1] **Navarro Almendros, Gabriel** [1]

[1] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAC-CSIC), España

ORCID: Xanxo Prilló 0009-0004-2154-1233 Román Vázquez 0000-0002-8868-9302 Tovar Sánchez 0000-0003-4375-1982 Navarro Almendros 0000-0002-8919-0060

Correspondencia: roc.xanxo.prillo@csic.es a.roman@csic.es a.tovar@csic.es gabriel.navarro@csic.es

RESUMEN

El 29 de octubre de 2024, un episodio de DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) provocó las inundaciones más catastróficas registradas en la historia reciente de España en la provincia de Valencia, causando más de 220 víctimas mortales y daños que superan los 13.000 millones de euros. Las aguas cargadas de sedimentos depositaron gruesas capas de lodo sobre extensas áreas urbanas y agrícolas, generando una urgente necesidad de cartografía rápida y precisa de las zonas afectadas. En este trabajo presentamos una metodología basada en modelos de inteligencia artificial (IA) para la detección y cuantificación de lodos, integrando datos multiespectrales de drones (sensor MicaSense RedEdge-MX de 10 canales) con imágenes del satélite Sentinel-2 MSI. Se implementa un flujo de trabajo basado en el algoritmo XGBoost en dos etapas: primero, una clasificación supervisada de alta resolución sobre ortomosaicos de dron para discriminar las clases lodo-tierra, urbano, vegetación y agua; y segundo, un modelo de escalado (upscaling) que transfiere estas clasificaciones centimétricas a la resolución de Sentinel-2 (10 m/px), utilizando bandas espectrales e índices normalizados como variables predictoras y coberturas fraccionarias como variable objetivo. Se incorpora además el índice FMI (Flood Mud Index), diseñado específicamente para la detección de lodos con alta carga de sedimentos, junto con una corrección del modelo mediante la base de datos de Microsoft Building Footprint. Los resultados preliminares muestran estadísticos robustos de clasificación tanto a escala local (dron) como regional (satélite), demostrando el potencial de esta aproximación para la gestión de emergencias ambientales.

Palabras clave: *DANA; Drones; Sentinel-2; XGBoost; Detección de lodos*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Modelos de IA para la detección y cuantificación de lodos post-DANA en Valencia mediante imágenes de dron y satélite

Xanxo Prilló, Roc [(1)], Román Vázquez, Alejandro [(1)], Tovar Sánchez, Antonio [(1)], Navarro Almendros, Gabriel [(1)]

[(1)] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN-CSIC), España.

0009-0004-2154-1233, roc.xanxo.prillo@csic.es ; 0000-0002-8868-9302, a.roman@csic.es

0000-0003-4375-1982, a.tovar@csic.es ; 0000-0002-8919-0060, gabriel.navarro@csic.es.

Resumen: El 29 de octubre de 2024, un episodio de DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) provocó las inundaciones más catastróficas registradas en la historia reciente de España en la provincia de Valencia, causando más de 220 víctimas mortales y daños que superan los 13.000 millones de euros. Las aguas cargadas de sedimentos depositaron gruesas capas de lodo sobre extensas áreas urbanas y agrícolas, generando una urgente necesidad de cartografía rápida y precisa de las zonas afectadas. En este trabajo presentamos una metodología basada en modelos de inteligencia artificial (IA) para la detección y cuantificación de lodos, integrando datos multiespectrales de drones (sensor MicaSense RedEdge-MX de 10 canales) con imágenes del satélite Sentinel-2 MSI. Se implementa un flujo de trabajo basado en el algoritmo XGBoost en dos etapas: primero, una clasificación supervisada de alta resolución sobre ortomosaicos de dron para discriminar las clases lodo-tierra, urbano, vegetación y agua; y segundo, un modelo de escalado (upscaling) que transfiere estas clasificaciones centimétricas a la resolución de Sentinel-2 (10 m/px), utilizando bandas espectrales e índices normalizados como variables predictoras y coberturas fraccionarias como variable objetivo. Se incorpora además el índice FMI (Flood Mud Index), diseñado específicamente para la detección de lodos con alta carga de sedimentos, junto con una corrección del modelo mediante la base de datos de Microsoft Building Footprint. Los resultados preliminares muestran estadísticos robustos de clasificación tanto a escala local (dron) como regional (satélite), demostrando el potencial de esta aproximación para la gestión de emergencias ambientales.

Palabras clave: DANA; Drones; Sentinel-2; XGBoost; Detección de lodos.

Artificial Intelligence Applied to Drones: Upscaling vs Super-Resolution in the Study of Coastal Systems

***Abstract**: On October 29, 2024, a cut-off low system (DANA) triggered the most catastrophic flooding in Spain's recent history in the province of Valencia, causing over 220 fatalities and more than €13 billion in damages. Sediment-laden floodwaters deposited thick layers of mud across extensive urban and agricultural areas, creating an urgent need for rapid and accurate mapping. This study presents an artificial intelligence (AI)-based methodology for mud detection and quantification, integrating multispectral drone data (10-channel MicaSense RedEdge-MX sensor) with Sentinel-2 MSI satellite imagery. We implement a two-stage XGBoost-based workflow: first, a high-resolution supervised classification on drone orthomosaics to discriminate mud, no-mud, and water classes; and second, an upscaling model that transfers centimeter-scale classifications to Sentinel-2 resolution (10 m/px), using spectral bands and normalized indices as predictors and fractional coverages as the target variable. The recently proposed Flood Mud Index (FMI), specifically designed for detecting sediment-laden flooded areas, is also incorporated as an input feature, alongside a model correction using the Microsoft Building Footprint database. Preliminary results show robust classification statistics at both local (drone) and regional (satellite) scales, demonstrating the potential of this approach for environmental emergency management.*

***Keywords**: DANA; Drones; Sentinel-2; XGBoost; Mud detection.*

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones constituyen uno de los desastres naturales más devastadores a escala global, causando daños generalizados en vidas humanas, medios de subsistencia e infraestructuras (Jonkman y Vrijling, 2008). En las últimas décadas, la frecuencia e intensidad de estos eventos se ha incrementado, impulsada en parte por el cambio climático que está generando episodios de precipitación cada vez más extremos

(Tabari, 2020). En este contexto, el 29 de octubre de 2024, un sistema de DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) provocó las inundaciones más catastróficas registradas en la historia reciente de España en la provincia de Valencia, con precipitaciones que superaron los 500 mm en apenas 8 horas en localidades como Chiva (AEMET, 2024). El evento causó más de 220 víctimas mortales, el desplazamiento de 15.000 personas y daños estimados en más de 13.000 millones de euros (Castro-Melgar *et al*., 2025).

Una característica particularmente relevante de este evento fue la enorme cantidad de sedimentos transportados por las aguas, que depositaron grandes cantidades de lodo sobre extensas áreas urbanas y agrícolas, así como en garajes de la población. La cartografía rápida y precisa de estas zonas afectadas resulta esencial para la coordinación de las labores de emergencia, la estimación de daños y la planificación de la recuperación. Las tecnologías de teledetección, tanto satelital como con drones, se han convertido en herramientas indispensables para la monitorización de inundaciones (Notti *et al*., 2018; Román *et al*., 2025). No obstante, la detección de áreas cubiertas de lodo presenta retos específicos, ya que los índices espectrales tradicionales como el NDWI (McFeeters, 1996) están diseñados para detectar masas de agua limpia y fallan al identificar zonas con alta turbidez y carga de sedimentos (Alcaras, 2025).

Recientemente, Alcaras (2025) propuso el Flood Mud Index (FMI), un nuevo índice espectral basado únicamente en las bandas roja y azul, específicamente diseñado para detectar áreas inundadas con alta carga de sedimentos, obteniendo una precisión global del 97,86% sobre imágenes Landsat 8 del evento de Valencia. Por otra parte, aproximaciones recientes basadas en aprendizaje automático, como las desarrolladas por Román *et al*. (2026) en el estudio de sistemas costeros, han demostrado el potencial de combinar datos de alta resolución espacial procedentes de drones con observaciones satelitales de Sentinel-2 mediante modelos de escalado (upscaling) basados en XGBoost (Chen y Guestrin, 2016).

El presente estudio implementa una metodología de escalado dron-satélite al contexto específico de la detección de lodos post-DANA. El objetivo principal es desarrollar un flujo de trabajo basado en IA que integre datos multiespectrales de drones y Sentinel-2 para generar cartografía rápida y precisa de las zonas afectadas por depósitos de lodo, a múltiples escalas espaciales utilizando la información espectral recolectadas durante el evento de la DANA.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la comarca de l'Horta Sud, en la provincia de Valencia (España), una de las zonas más afectadas por las inundaciones de la DANA de octubre de 2024 (Figura 1). Esta región se sitúa en la confluencia de las cuencas de los ríos Turia y Júcar, e incluye la llanura costera que se extiende hasta la Albufera, una laguna litoral de gran importancia ecológica. La zona seleccionada comprende municipios severamente dañados como Paiporta, Catarroja, Massanassa y Sedaví, donde las aguas cargadas de sedimentos procedentes de los barrancos del Poyo y del Magro depositaron capas de lodo de espesor variable sobre calles, edificios y parcelas agrícolas.

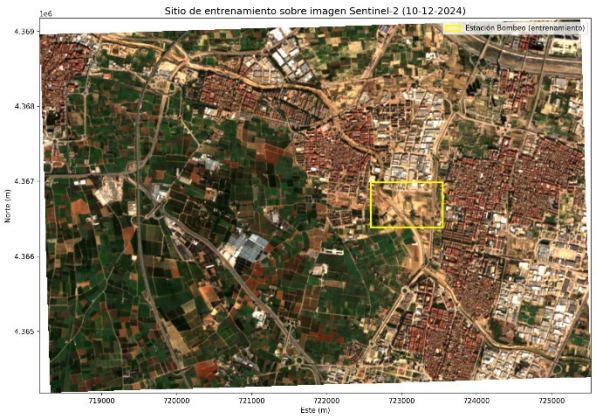


Figura 1. Localización de la zona de estudio. El rectángulo amarillo representa el vuelo de dron multiespectral para la zona de entrenamiento (Estación de bombeo). El fondo es la imagen Sentinel-2 para el día 10/12/2024.

2.2. Datos de teledetección

2.2.1. Datos de dron

Se empleó un multirrotor DJI Matrice 300 RTK equipado con el sensor multiespectral de 10 canales MicaSense RedEdge-MX Dual, cuyas bandas cubren desde el azul (444 nm) hasta el infrarrojo cercano (842 nm). Los vuelos se realizaron sobre las zonas afectadas en las semanas posteriores al evento, a una altitud de 120 m, alcanzando un GSD medio de 8,2 cm/px. Los mapas de reflectancia (adimensional, 0-1) fueron generados con el software Pix4D Mapper, aplicando la calibración radiométrica mediante panel de referencia y DLS.

2.2.2. Datos del satélite Sentinel-2

Se descargaron imágenes Sentinel-2 MSI BOA (Bottom of Atmosphere) armonizadas y remuestreadas a 10 m/px, adquiridas en fechas próximas a los vuelos de dron, a través de Google Earth Engine. Las bandas seleccionadas fueron equivalentes en longitud de onda (± 10 nm) a las del sensor MicaSense, siguiendo la metodología descrita en Román *et al*. (2026). Se emplearon escenas pre-evento (octubre 2024, antes del día 29) y post-evento (30–31 de octubre y semanas sucesivas) para el análisis bitemporal.

2.3. Modelo de escalado

2.3.1. Clasificación a escala de dron

Se realiza una clasificación supervisada sobre los ortomosaicos multiespectrales de dron empleando el algoritmo XGBoost (Chen y Guestrin, 2016). Las clases objetivo definidas son: lodo-tierra, no-lodo (superficies no afectadas, incluyendo vegetación, suelo expuesto y superficies urbanas) y agua. Como variables predictoras se emplean las 10 bandas espectrales del sensor MicaSense junto con índices espectrales derivados,

incluyendo el NDVI, el NDWI (McFeeters, 1996) y el FMI (Alcaras, 2025), calculado según la Ecuación 1:

$$FMI = (RED - BLUE) / (RED + BLUE) \quad (1)$$

2.3.2. Modelo de escalado dron-satélite

Para la generación de predicciones escaladas de cada clase de cobertura de lodo-tierra, se emplea un segundo flujo XGBoost que toma como entradas las bandas espectrales e índices normalizados de Sentinel-2, y como salida los porcentajes de cobertura fraccionaria obtenidos al agregar las clasificaciones de dron dentro de cada píxel de Sentinel-2. XGBoost minimiza la función objetivo regularizada (Eq. 2):

$$L(\emptyset) = \sum l(y_i, \hat{y}_i) + \sum \Omega(f_k) \quad (2)$$

El modelo de salida múltiple predice simultáneamente las tres clases de cobertura, normalizando las predicciones para que sumen 100%. Se entrena un ensamble de 20 particiones 70/30 para cuantificar la incertidumbre asociada a las predicciones.

2.3.4 Corrección del modelo de escalado con la integración de datos Microsoft Building Footprint

La comparación entre imágenes satelitales y el modelo de escalado evidenció una sobreestimación de la cobertura de lodos-tierra y una infraestimación de áreas urbanas, especialmente edificaciones. Este sesgo se debió a que la zona de entrenamiento (estación de bombeo) carecía de edificios, predominando polígonos industriales, lo que provocó una clasificación errónea al aplicar el modelo en la zona de estudio. Para corregirlo, se incorporó la base de datos Microsoft Building Footprint, generando una máscara aplicada al resultado previo. Esta se utilizó para reentrenar el modelo, ampliando la representación espectral de la clase urbana y optimizando el desempeño del modelo XGBoost.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La clasificación supervisada XGBoost sobre los ortomosaicos de dron (Figura 2) arrojó estadísticos robustos, con una precisión global OA = 91% y un índice kappa = 0,85. El modelo permitió discriminar eficazmente las tres clases objetivo en la zona de estudio. Los depósitos de lodo-tierra presentaron una firma espectral característica, con alta reflectancia en la banda roja y valores notablemente inferiores en el azul, lo que confirma la utilidad del FMI como variable predictora clave. La banda roja-650 resultó ser la variable con mayor importancia relativa en el modelo, seguidas del índice NDVI y la banda roja-705.

La clasificación a escala de dron reveló que la cobertura de lodo-tierra en la zona estudiada alcanzaba aproximadamente el 65% (2764 px) de la superficie total, concentrándose principalmente en las áreas urbanas y periurbanas próximas a los cauces de los barrancos, mientras que las zonas agrícolas presentaban una distribución más heterogénea con mezcla de lodo-tierra, suelo húmedo y agua residual.

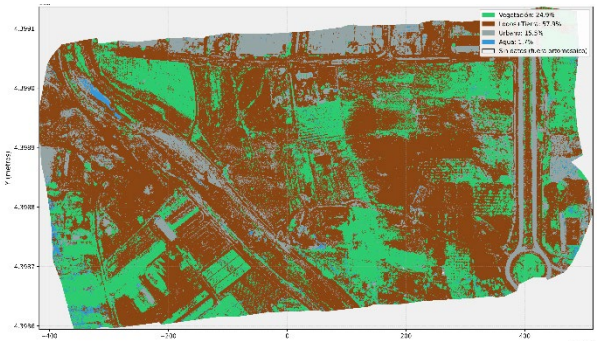


Figura 2. Resultado de la clasificación supervisada del modelo XGBoost para la zona de entrenamiento (Estación Bombeo).

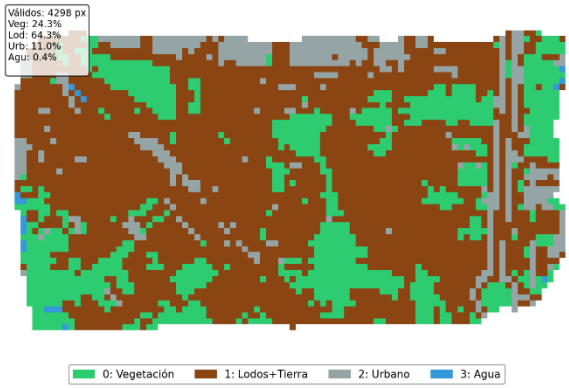


Figura 3. Reescalado a 10m de la clasificación supervisada para la zona de entrenamiento (Estación Bombeo).

Tras la aplicación del modelo de escalado a Sentinel-2 (Figura 3), se obtuvieron mapas de cobertura de lodo-tierra a 10 m/px que cubren toda el área metropolitana de Valencia (Figura 4). Como era esperable, el análisis estadístico muestra valores algo inferiores a los obtenidos con el dron (OA = 0,79 y kappa = 0,66), lo cual es consistente con los resultados reportados por Román *et al*. (2026) para la clasificación de coberturas costeras. Adicionalmente, con la corrección mediante los datos Microsoft Building Footprint se permitió reducir la confusión sistemática entre lodos y edificaciones, incrementando la coherencia espacial de la clase urbana y mejorando la exactitud global del modelo enriquecido (OA = 0,90 y kappa = 0,83). Este método demuestra ser rápido y eficiente, ya que no depende de la selección manual de regiones de entrenamiento sobre cada escena satelital, sino que transfiere el conocimiento adquirido a escala centimétrica con el dron.

La comparación con los resultados del FMI aplicado directamente sobre Sentinel-2 y Landsat 8 (Alcaras, 2025) muestra una elevada concordancia espacial entre ambos métodos, si bien el enfoque de escalado con XGBoost proporciona información cuantitativa adicional al generar porcentajes de cobertura fraccionaria de lodo-tierra dentro de cada píxel, lo que resulta especialmente útil para estimar volúmenes de sedimentos acumulados. Además, la incorporación de las bandas del infrarrojo cercano del sensor MicaSense permite detectar variaciones en el contenido de humedad de los lodos, una información crítica para la planificación de las labores de limpieza y retirada de escombros.

Una limitación del presente estudio es que los vuelos de dron se realizaron en las semanas posteriores al evento, cuando parte del lodo ya había sido retirado de determinadas zonas urbanas. Para tratar de solucionarlo, se aplicó una máscara de lodos-tierra a partir de la clasificación de los 3 días previos a la DANA (Figura 4, primera fila), separando los depósitos preexistentes (89,7 ha, entre un 7–15% del total detectado) de los atribuibles al evento. La atribución es más fiable entre noviembre 2024 y marzo 2025, ya que a partir de abril la actividad agrícola introduce suelo desnudo espectralmente similar al lodo a 10 m de resolución. Trabajos futuros contemplarán la aplicación de técnicas de super-resolución (SR) mediante redes generativas antagonistas (GAN), como las evaluadas por Román *et al*. (2026), que podrían mejorar la resolución espacial de las observaciones de Sentinel-2 hasta 1 m/px, así como la integración de datos SAR de Sentinel-1 para cubrir períodos con cobertura nubosa persistente.

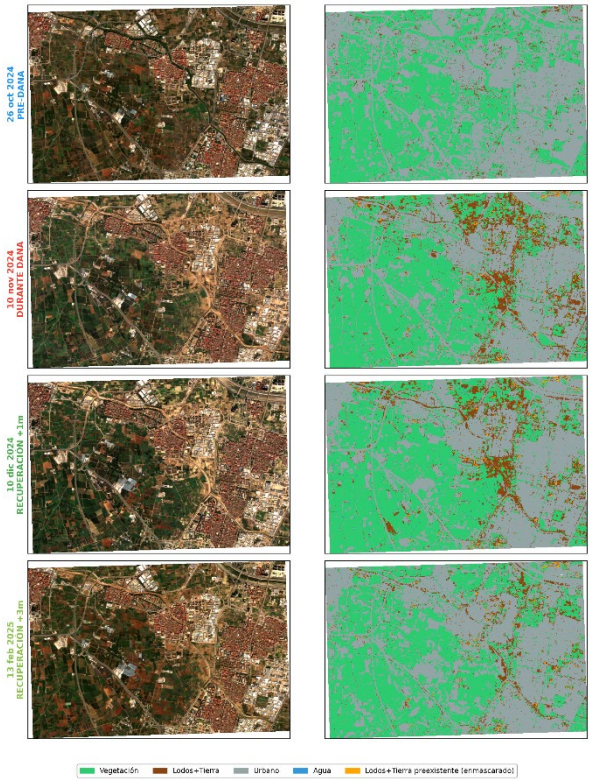


Figura 4. Imágenes RGB (izd) y clasificación final (dcha) para diferentes días de estudio.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio ponen de manifiesto el potencial de integrar herramientas de IA, en particular el algoritmo XGBoost, con datos de teledetección multiescala procedentes de drones y satélites para la detección y cuantificación de lodos en el contexto de emergencias por inundaciones. La metodología de escalado dron-satélite permite transferir clasificaciones de alta resolución a la escala regional de Sentinel-2, generando cartografía operativa útil para la gestión de la emergencia. La incorporación del FMI como variable predictora mejora significativamente la capacidad del modelo para discriminar zonas con alta carga de sedimentos frente a otros tipos de cobertura. Esta aproximación, desarrollada en el marco del proyecto DANADRON, sienta las bases para un sistema de monitorización rápido y escalable que podría aplicarse a futuros eventos similares en el Mediterráneo y otras regiones susceptibles de inundaciones con alto transporte de sedimentos.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible gracias a los proyectos DANADRON (PIE 202430E238) y DIGIDRON (MMT24-ICMAN-01). R. Xanxo-Prilló está contratado bajo la modalidad EMPJOV25_ICMAN_M2_C_137. A. Román, personal contratado bajo la iniciativa Generación D, promovida por Red.es, organismo adscrito al MTDFP, destinada a la atracción y retención de talento mediante becas y contratos de formación, financiada por el PRTR a través de los fondos Next Generation de la UE.

6. REFERENCIAS

AEMET (2024). Informe sobre el episodio meteorológico de precipitaciones torrenciales y persistentes ocasionadas por una DANA el día 29 de octubre de 2024. Agencia Estatal de Meteorología, Gobierno de España.

Alcaras, E. (2025). Flood Mud Index (FMI): A Rapid and Effective Tool for Mapping Muddy Areas After Floods—The Valencia Case. Remote Sensing, 17(5), 770. https://doi.org/10.3390/rs17050770

Castro-Melgar, I., Falaras, T., Basiou, E., y Parcharidis, I. (2025). Assessment of the October 2024 Cut-Off Low Event Floods Impact in Valencia (Spain) with Satellite and Geospatial Data. *Remote Sensing, 17*(13), 2145. https://doi.org/10.3390/rs17132145

Chen, T., y Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. En Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp. 785–794). https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

Jonkman, S. N., y Vrijling, J. K. (2008). Loss of life due to floods. *Journal of Flood Risk Management, 1*, 43–56. https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00006.x

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing, 17*, 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

Notti, D., Giordan, D., Caló, F., Pepe, A., Zucca, F., y Galve, J. P. (2018). Potential and limitations of open satellite data for flood mapping. *Remote Sensing, 10*, 1673. https://doi.org/10.3390/rs10111673

Román, A., Tovar-Sánchez, A., Xanxo, R., Vázquez, A., y Navarro, G. (2026). Inteligencia Artificial Aplicada a los Drones: Escalado vs Super-Resolución en el Estudio de Sistemas Costeros. En Actas del XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetcción, Cáceres, España.

Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports, 10*, 13768. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.275

Evaluación comparativa del LiDAR PNOA y LiDAR de alta densidad para la detección de estructuras arqueológicas: el castro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres) como caso de estudio

Herrera, Victorino [1] **Quirós Rosado, Elia** [2] **Pro Muñoz, Carmen** [3] **de Tena Rey, Maite** [4]

[1] Instituto de Arqueología-Mérida CSIC-Junta de Extremadura.

[2] Universidad de Extremadura, Escuela Politécnica, Depto. de Expresión Gráfica.

[3] Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida, Depto. de Física.

[4] Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida, Depto. de Expresión Gráfica.

ORCID: Herrera 0000-0002-1120-299X Quirós Rosado 0000-0002-8429-045X Pro Muñoz 0000-0001-8377-0972 de Tena Rey 0000-0002-8202-1782

Correspondencia: vmayoral@iam.csic.es equiros@unex.es cpro@unex.es mtdetena@unex.es

RESUMEN

Este estudio evalúa el rendimiento relativo de los datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) (IGN) y los datos LiDAR de alta densidad adquiridos específicamente mediante un vuelo con VANT para la detección de estructuras enterradas en sitios arqueológicos. El ensayo analiza, por un lado, las diferencias entre ambas fuentes para la identificación de anomalías topográficas relacionadas con la presencia de restos y, por otro, la correlación entre estas características del terreno y la existencia confirmada de elementos arqueológicos gracias a la disponibilidad de resultados de diversos métodos geofísicos (radar de penetración terrestre, tomografía de resistividad eléctrica y prospección geomagnética). Se toma como caso de estudio el castro de la Edad del Hierro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). Los resultados indican que, en las condiciones específicas del yacimiento estudiado, caracterizado por una cobertura vegetal moderada y una profundidad y un estado de conservación comparables, la densidad de datos LiDAR del IGN en su versión más actualizada es suficiente para identificar anomalías topográficas asociadas a estructuras enterradas. La capacidad de identificación positiva, incluso en un sitio intensamente arado para el cultivo durante siglos, demuestra la sensibilidad y eficacia del protocolo que utilizamos.

Palabras clave: *Arqueología no invasiva, LiDAR, métodos geofísicos.*

Fecha de recepción: 20 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 20 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación comparativa del LiDAR PNOA y LiDAR de alta densidad para la detección de estructuras arqueológicas: el castro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres) como caso de estudio

Herrera, Victorino [1], Quirós Rosado, Elia [2], Pro Muñoz, Carmen [3], de Tena Rey, Maite [4]
[1] Instituto de Arqueología-Mérida CSIC-Junta de Extremadura.
0000-0002-1120-299X, vmayoral@iam.csic.es.
[2] Universidad de Extremadura, Escuela Politécnica, Depto. de Expresión Gráfica.
0000-0002-8429-045X, equiros@unex.es.
[3] Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida, Depto. de Física.
0000-0001-8377-0972, cpro@unex.es.
[4] Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida, Depto. de Expresión Gráfica.
0000-0002-8202-1782, mtdetena@unex.es.

Resumen: Este estudio evalúa el rendimiento relativo de los datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) (IGN) y los datos LiDAR de alta densidad adquiridos específicamente mediante un vuelo con VANT para la detección de estructuras enterradas en sitios arqueológicos. El ensayo analiza, por un lado, las diferencias entre ambas fuentes para la identificación de anomalías topográficas relacionadas con la presencia de restos y, por otro, la correlación entre estas características del terreno y la existencia confirmada de elementos arqueológicos gracias a la disponibilidad de resultados de diversos métodos geofísicos (radar de penetración terrestre, tomografía de resistividad eléctrica y prospección geomagnética). Se toma como caso de estudio el castro de la Edad del Hierro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). Los resultados indican que, en las condiciones específicas del yacimiento estudiado, caracterizado por una cobertura vegetal moderada y una profundidad y un estado de conservación comparables, la densidad de datos LiDAR del IGN en su versión más actualizada es suficiente para identificar anomalías topográficas asociadas a estructuras enterradas. La capacidad de identificación positiva, incluso en un sitio intensamente arado para el cultivo durante siglos, demuestra la sensibilidad y eficacia del protocolo que utilizamos.

Palabras clave: Arqueología no invasiva, LiDAR, métodos geofísicos.

Comparative evaluation of PNOA LiDAR and high-density LiDAR for the detection of archaeological features: the hillfort of Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres) as a case study.

***Abstract**: This study evaluates the relative performance of terrain data in archaeological sites for the detection of buried structures, specifically the models generated from LiDAR data of the National Plan for Aerial Orthophotography (PNOA) (IGN) and the high-density LiDAR data acquired specifically with an UAV flight. The essay analyzes, on the one hand, the differences between the two sources for identifying topographic anomalies related to the presence of subsurface remains, and on the other hand, the correlation between these terrain features and the confirmed existence of archaeological elements thanks to the availability of results from various geophysical methods (ground-penetrating radar, electrical resistivity tomography, and geomagnetic surveying). The Iron Age hillfort of Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres) is taken as a case study. The results indicate that, under the specific conditions of the studied site, characterized by moderate vegetation cover and a comparable depth and state of preservation, the LiDAR data density from the most recent version of the IGN coverage is sufficient for identifying subtle topographic anomalies associated with buried structures. The capacity for positive identification, even in a site deeply ploughed for centuries, demonstrates the sensitivity and efficiency of the protocol we used.*

***Keywords**: Non invasive archaeology, LiDAR, geophysics.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ¿Más es mejor? El problema metodológico

En los últimos años se ha producido un extraordinario desarrollo de las aplicaciones de la teledetección y la geofísica para identificar restos arqueológicos ocultos en el subsuelo. En el caso del LiDAR, se ha mostrado eficaz para localizar anomalías topográficas generadas por alteraciones artificiales del terreno, desde terrazas a caminos, pasando por cimentaciones de edificios enterrados (Vinci *et al*., 2024). Sin embargo, persisten problemas relativos a la disponibilidad de datos y su resolución espacial, además de la necesidad de desarrollar una metodología formal. Así, productos como la 3ª cobertura del vuelo LiDAR del PNOA nos ofrecen capacidades increíbles, pero persiste una pobre explotación del potencial de herramientas para fusionar y comparar capas y así entender la estructura profunda de los datos. Más allá de una comparación intuitiva, esto nos permite formular diagnósticos cada vez más completos y fiables.

De manera concreta, en este caso se trata de formular dos preguntas principales. La primera es si con la cobertura de datos LiDAR del PNOA actualmente accesible podemos suplir la necesidad de vuelos específicos por encargo en sitios arqueológicos. La segunda es si podemos cuantificar el grado de coincidencia entre estas fuentes de teledetección, que nos informan sobre la superficie del terreno, y los datos sobre el subsuelo aportados por la geofísica.

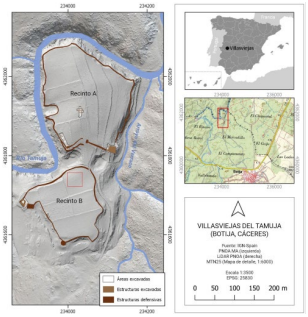


Figura 1. Localización del caso de estudio y la zona analizada.

1.2. Villasviejas como "*test site*" para la arqueología no invasiva.

El caso de estudio presentado es el sitio arqueológico de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, España) (fig.1). Se trata de un poblado fortificado que estuvo ocupado desde inicios del siglo IV hasta mediados del siglo I a.C. y comprende dos recintos amurallados (Norte y Sur) con un total de unas 7 hectáreas de superficie.

El tipo de estructuras presentes en el sitio, por su densidad, materiales y estado de conservación, lo han convertido en un lugar idóneo para el testeo de métodos no invasivos. Se han llevado a cabo prospecciones geofísicas mediante métodos magnéticos y tomografía eléctrica (ERT), así como georradar (GPR). Además, se han aplicado métodos de teledetección (imágenes térmicas y multiespectrales, LIDAR y fotogrametría). Con el análisis combinado de todos estos resultados se ha logrado alcanzar un conocimiento sobre la estructura interna del asentamiento y profundizar en las características geológicas del yacimiento (Mayoral *et al*. 2019; de Tena *et al*. 2020, Pro *et al*. 2020, Salgado *et al*. 2020).

Dentro de este programa general de trabajo, el presente análisis se basa en los resultados obtenidos en una publicación anterior dedicada a la comparación de los resultados de la aplicación de tres métodos de prospección geofísica en un sector del sitio arqueológico (Pro *et al*. 2020).

2. METODOLOGÍA

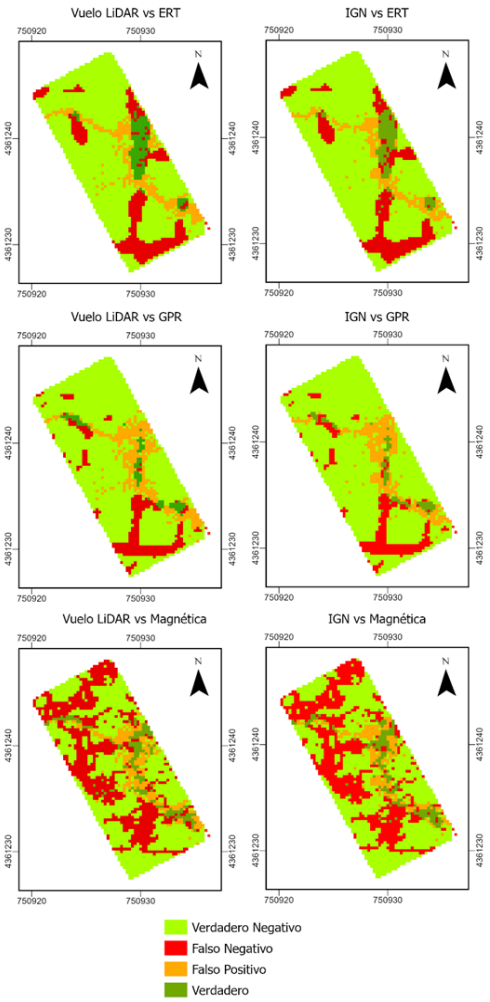


Figura 2. Comparativas entre técnicas geofísicas y los SLRM de ambas fuentes de datos LiDAR.

El flujo de trabajo que se ha seguido busca integrar una serie de fuentes de información de carácter no invasivo y compararlas con los datos LiDAR disponibles, para comprender las correlaciones entre unas y otras. Por tanto, era necesario tomar como referencia un sector del castro en el que se contaba con una multiplicidad de capas.

Los datos LiDAR del IGN fueron descargados y procesados con el software Fusion para generar un modelo digital de elevaciones (MDE) con una resolución de 25 cm de píxel. Siguiendo la metodología específica

para la detección de anomalías arqueológicas (Hesse, 2010), se generó a partir de dicho modelo un SLRM (Simple Local Relief Model) el cual permite aislar el relieve local eliminando la tendencia general del terreno. Se obtiene restando al MDE original una versión suavizada del mismo, lo que produce un raster donde destacan las irregularidades topográficas locales, como zanjas, túmulos o terrazas. Este modelo resulta especialmente útil en contextos arqueológicos porque resalta microformas antropogénicas sin la interferencia del relieve regional (por ejemplo, pendientes naturales o grandes valles).

En cuanto a las capas con los resultados de la geofísica, las imágenes binarias de ERT, GPR y magnética se remuestrearon a resolución de 0,25 m y se ajustaron para que coincidieran, a nivel de píxel, con las SLRM del IGN y del vuelo LiDAR.

La conversión a binarias de las dos imágenes SLRM se llevó a cabo poniendo como valores positivos a aquellos que se encuentran entre la media y la mediana del histograma de valores de ambas imágenes. Se definió el umbral dentro del intervalo delimitado por la media y la mediana de la distribución de intensidades, siguiendo enfoques de segmentación estadística que emplean estos parámetros para acotar el rango óptimo de umbralización, como los empleados en Triana *et al*. (2016) y Ahmad *et al*. (2014).

Una vez convertidas a binarias las imágenes SLRM, se compararon por pares con cada una de las imágenes de las técnicas geofísicas, construyendo las consiguientes matrices de confusión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2, se muestra la comparación de las imágenes SLRM, convertidas a binarias, con cada una de las imágenes de las técnicas geofísicas. Las matrices de confusión se presentan en la Tabla 1, en la que se muestran las superficies de acuerdos/desacuerdos entre las distintas técnicas.

Tabla 1. Matrices de confusión en m2 de todas las comparativas.

		ERT			ERT	
		Estructura	no Estructura		Estructura	no Estructura
V. LiDAR	Estructutra	8,94	25,25	IGN	9,06	25,12
	no Estructura	16,50	110,62		14,18	112,94
		GPR			GPR	
		Estructura	no Estructura		Estructura	no Estructura
V. LiDAR	Estructura	4,93	20,50	IGN	5,19	18,12
	no Estructura	18,37	117,50		18,06	119,94
		Magnética			Magnética	
		Estructura	no Estructura		Estructura	no Estructura
V. LiDAR	Estructutra	10,56	52,87	IGN	10,44	53,00
	no Estructura	14,87	83,0		12,81	85,06

Además, a partir de dichas matrices se derivaron los estadísticos de la Tabla 2.

Tabla 2. Evaluación de la exactitud global de la clasificación.

Método	Referencia	Exactitud global (%)	Sensibilidad (%)	Especificidad (%)	F1-score
ERT	V. LiDAR	74,1	35,1	81,4	0,30
ERT	IGN	75,6	39,0	81,8	0,32
GPR	V. LiDAR	75,9	21,2	85,1	0,20
GPR	IGN	77,6	22,3	86,9	0,22
Magnética	V. LiDAR	58,0	41,5	61,1	0,24
Magnética	IGN	59,2	44,9	61,6	0,24

La comparación de las métricas de exactitud obtenidas a partir de las matrices de confusión permite evaluar el rendimiento relativo de los modelos generados empleando como referencia el LiDAR de alta densidad adquirido específicamente para el yacimiento y el LiDAR de la 3ª cobertura del PNOA (IGN), con una densidad aproximada de 5 puntos/m².

En términos de exactitud global, los resultados muestran diferencias reducidas entre ambas fuentes de referencia. Para los tres métodos geofísicos evaluados (ERT, GPR y magnetometría), la exactitud global obtenida utilizando el modelo derivado del LiDAR del IGN es ligeramente superior a la obtenida con el vuelo LiDAR propio, con incrementos que oscilan entre aproximadamente 1 y 2 puntos porcentuales. Estas diferencias son sistemáticas en los tres métodos analizados, lo que sugiere una concordancia elevada entre ambas fuentes de datos LiDAR en la delimitación de las áreas consideradas como "estructura" y "no estructura".

La sensibilidad, entendida como la capacidad para detectar estructuras reales, muestra valores moderados o bajos en todos los casos, independientemente de la fuente LiDAR utilizada como referencia. Esto se explica por una prolongada labor de arado de los campos que ocupan el sitio arqueológico y que han sido cultivados desde hace siglos. Como consecuencia, las anomalías habitualmente generadas por la supervivencia de las cimentaciones de los edificios hace tiempo que han sido niveladas, y apenas ofrecen contraste con el resto del terreno. Sin embargo, en todos los métodos la sensibilidad es ligeramente mayor cuando se emplea el LiDAR del IGN. Esto indica que, desde el punto de vista de la detección de estructuras enterradas, la referencia del IGN no solo es comparable a la del LiDAR de alta densidad, sino que en este caso concreto produce resultados marginalmente más favorables en términos de coincidencia con los datos geofísicos. Podría considerarse que para esto la mayor resolución del vuelo de alta densidad introduce ruido parásito que oscurece la lectura de las variaciones de interés.

Por su parte, la especificidad presenta valores elevados en los métodos ERT y GPR, lo que refleja una buena capacidad para identificar correctamente las áreas sin estructura. En magnetometría la especificidad es menor, aunque sigue mostrando diferencias muy reducidas entre ambas referencias. La similitud de estos valores indica que la capacidad de discriminación entre zonas con y sin estructura es prácticamente equivalente cuando se emplea cualquiera de los dos modelos LiDAR. Esto abunda en la lectura ya planteada de un terreno fuertemente alterado por el cultivo.

El análisis conjunto de las métricas sugiere que el aumento de densidad de puntos del vuelo LiDAR propio (con valores que alcanzan hasta 300 puntos/m² en determinadas zonas) no se traduce en una mejora sustancial de la concordancia espacial con las anomalías

geofísicas detectadas. A pesar de la notable diferencia de resolución entre ambos conjuntos de datos, el modelo LiDAR del IGN (5 puntos/m²) ofrece resultados equivalentes e incluso ligeramente superiores en términos de exactitud global, sensibilidad y f1-score.

Este comportamiento puede explicarse por las características específicas del yacimiento analizado. La cobertura vegetal y el grado de soterramiento de las estructuras permiten que incluso un modelo digital de elevaciones derivado de una densidad de puntos moderada, sea capaz de reproducir adecuadamente las microtopografías asociadas a las estructuras arqueológicas. La sensibilidad del procedimiento empleado es especialmente relevante en un caso en el que las condiciones de entrada, con el intensivo y prolongado laboreo del terreno, son muy desfavorables. En este escenario, el incremento de densidad de puntos no supone necesariamente una mejora proporcional en la capacidad de detección indirecta de estructuras enterradas. Al contrario, el detalle es excesivo para discernir entre información útil y ruido.

En consecuencia, los resultados indican que la disponibilidad de datos LiDAR de alta densidad no garantiza por sí misma una mejora significativa en la detección de estructuras arqueológicas enterradas cuando las condiciones de visibilidad geomorfológica y de cobertura vegetal son favorables. En contextos similares al del presente estudio, la resolución ofrecida por la 3ª cobertura LiDAR del PNOA resulta suficiente para la identificación y delimitación de este tipo de evidencias. Si proyectamos esa eficacia sobre la amplia muestra de sitios arqueológicos en los que puede aplicarse esta metodología, se vislumbra un elevado potencial del LiDAR en este campo de conocimiento.

4. CONCLUSIONES

El análisis comparativo entre los modelos generados a partir del vuelo LiDAR de alta densidad y los datos LiDAR de la 3ª cobertura del PNOA (IGN) demuestra que ambos proporcionan resultados muy similares en la detección indirecta de estructuras arqueológicas enterradas. Las diferencias observadas en las métricas de exactitud son reducidas y, en todos los métodos geofísicos analizados, los valores obtenidos con el LiDAR del IGN son ligeramente superiores a los obtenidos con el vuelo LiDAR propio.

Estos resultados indican que, en las condiciones específicas del yacimiento estudiado la densidad de puntos del LiDAR del IGN (≈5 puntos/m²) resulta suficiente para la identificación de anomalías topográficas asociadas a estructuras enterradas. El incremento de resolución hasta valores muy superiores (≥300 puntos/m²) no se traduce en una mejora significativa de la capacidad de detección ni en un aumento sustancial de la concordancia con los datos geofísicos.

Por tanto, puede concluirse que los datos LiDAR de acceso abierto del PNOA constituyen una fuente adecuada y suficiente para la detección de estructuras arqueológicas soterradas en contextos similares al analizado, siempre que las condiciones de cobertura vegetal y profundidad de enterramiento sean comparables. Esta conclusión refuerza el potencial de los datos LiDAR públicos como herramienta de prospección arqueológica a escala regional, permitiendo optimizar recursos y reducir la necesidad de campañas específicas de adquisición LiDAR de muy alta densidad cuando las condiciones del terreno no lo requieran.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro de los proyectos: “Investigación arqueológica interdisciplinar para el análisis diacrónico de los paisajes del suroeste peninsular: la Segunda Edad del Hierro como paradigma” (PID2023-151243NB-I00) y “Revalorización del Paisaje Cultural de la Dehesa extremeña y su Patrimonio Arqueológico mediante tecnologías innovadoras” (IB24032).

6. REFERENCIAS

Ahmad, N. S., Zaki, Z. M., & Ismail, W. (2014, September). Region of adaptive threshold segmentation between mean, median and otsu threshold for dental age assessment. In 2014 I*nternational Conference on Computer, Communications, and Control Technology* (I4CT) (pp. 353-356). IEEE.

De Tena, M.T., C. Pro, C. Charro, J.A. Salgado, V. Mayoral (2020). Geological characterisation of the settlement of Villasviejas del Tamuja (Cáceres, Spain). *Quaternary International, 566-567*, 91-97, https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.024

Hesse, R. (2010). LiDAR-derived Local Relief Models–a new tool for archaeological prospection. *Archaeological prospection, 17*(2), 67-72.

Mayoral V., C. Charro, C., Salgado, J.A., Pro, C., M.T. de Tena, M., Chapa, T., Vallés, J., Terrón, J.M., y Quirós, E. (2019). Radiography of an Iron Age hillfort: non-invasive archaeology in the settlement of Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). T*rabajos de Prehistoria, 76*, nº 2 7-26, https://doi.org/10.3989/tp.2019.12239

Pro, C., Caldeira, B., De Tena, M., Charro, C., Oliveira R., Borges J. F. y Mayoral, V. (2020). Exploring the Consistency of Data Collected in Archaeological Geophysics: A Case Study from the Iron Age Hillfort of Villasviejas del Tamuja (Extremadura, Spain). *Remote Sensing, 12*, 1989 https://doi.org/10.3390/rs12121989

Salgado, J.A., Quirós, E.; Mayoral, V. y Charro, C. (2020). Assessing the potential of multispectral and thermal UAV imagery from archaeological sites. A case study from the Iron Age hillfort of Villasviejas del Tamuja (Cáceres, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports, 31*.

Triana, N., Jaramillo, A. E., Gutiérrez, R. M., & Rodríguez, C. A. (2016). Técnicas de umbralización para el procesamiento digital de imágenes de GEM-Foils. *Scientia et technica*, *21*(4), 352-359

Vinci, G., Vanzani, F., Fontana, A., Campana, S. (2024). LiDAR Applications in Archaeology: A Systematic Review. *Archaeological Prospection. 1-*21. 10.1002/arp.1931.

SESIÓN 08

Big GeoDATA

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.100

Ndvi2Gif: Análisis multi-estacional mediante Google Earth Engine

García Díaz, Diego [1]

[1] Estacion Biologica de Doñana, España

ORCID: García Díaz 0000-0002-2757-7112

Correspondencia: diegogarcia@ebd.csic.es

RESUMEN

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de computación en la nube para análisis geoespacial a escala planetaria. Sin embargo, la generación de composites multi-temporales requiere código extenso para filtrado, enmascaramiento de nubes, escalado a reflectividad y agregación temporal. Ndvi2Gif es un paquete Python de código abierto construido sobre GEE y geemap que simplifica enormemente estos flujos de trabajo. El concepto central es la creación de composites estadísticos multi-estacionales mediante organización temporal jerárquica basada en bandas: cada imagen anual contiene bandas temporales que almacenan, para cada píxel, el estadístico seleccionado del índice elegido, calculado sobre todas las imágenes disponibles en ese sub-periodo (estacional, mensual, quincenal, semanal o cualquier división personalizada del año). El paquete proporciona acceso unificado a 7 plataformas satelitales (Sentinel-1/2/3, Landsat 4-9, MODIS) y datos de reanálisis climático (ERA5-Land, CHIRPS), con 52 índices espectrales y radar predefinidos más 48 variables climáticas. Incluye procesamiento ARD de Sentinel-1 con corrección radiométrica del terreno, análisis de series temporales con detección de tendencias y métricas fenológicas, así como clasificación mediante aprendizaje automático.

Palabras clave: *Python, Google Earth Engine, Geemap, Automatización, Series Temporales*

Fecha de recepción: 13 diciembre 2025 · **Fecha de aceptación:** 5 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Ndvi2Gif: Análisis multi-estacional mediante Google Earth Engine

Diego García Díaz [1]

[1] Estación Biológica de Doñana (CSIC), 0000-0002-2757-7112, diegogarcia@ebd.csic.es.

Resumen: Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de computación en la nube para análisis geoespacial a escala planetaria. Sin embargo, la generación de composites multi-temporales requiere código extenso para filtrado, enmascaramiento de nubes, escalado a reflectividad y agregación temporal. Ndvi2Gif es un paquete Python de código abierto construido sobre GEE y geemap que simplifica enormemente estos flujos de trabajo. El concepto central es la creación de composites estadísticos multi-estacionales mediante organización temporal jerárquica basada en bandas: cada imagen anual contiene bandas temporales que almacenan, para cada píxel, el estadístico seleccionado del índice elegido, calculado sobre todas las imágenes disponibles en ese sub-periodo (estacional, mensual, quincenal, semanal o cualquier división personalizada del año). El paquete proporciona acceso unificado a 7 plataformas satelitales (Sentinel-1/2/3, Landsat 4-9, MODIS) y datos de reanálisis climático (ERA5-Land, CHIRPS), con 52 índices espectrales y radar predefinidos más 48 variables climáticas. Incluye procesamiento ARD de Sentinel-1 con corrección radiométrica del terreno, análisis de series temporales con detección de tendencias y métricas fenológicas, así como clasificación mediante aprendizaje automático.

Palabras clave: Google Earth Engine, índices estacionales, series temporales, fenología, Python.

Ndvi2Gif: Multi-Seasonal Remote Sensing Analysis via Google Earth Engine

***Abstract**: Google Earth Engine (GEE) is a cloud computing platform for planetary-scale geospatial analysis. However, generating multi-temporal composites requires extensive code for filtering, cloud masking, reflectance scaling, and temporal aggregation. Ndvi2Gif is an open-source Python package built on GEE and geemap that greatly simplifies these workflows. The core concept is the creation of multi-seasonal statistical composites through hierarchical band-based temporal organization: each annual image contains temporal bands that store, for each pixel, the selected statistic of the chosen index, computed over all available images within that sub-period (seasonal, monthly, bi-weekly, weekly, or any custom year division). The package provides unified access to 7 satellite platforms (Sentinel-1/2/3, Landsat 4-9, MODIS) and climate reanalysis data (ERA5-Land, CHIRPS), with 52 predefined spectral and radar indices plus 48 climate variables. It includes Sentinel-1 ARD processing with radiometric terrain correction, time series analysis with trend detection and phenology metrics, as well as machine learning classification.*

***Keywords**: Google Earth Engine, seasonal indexes, time series, phenology, Python*

1. INTRODUCCIÓN

El análisis multi-temporal de datos de teledetección es fundamental para el seguimiento de ecosistemas, la monitorización agrícola y la evaluación de cambios ambientales. *Google Earth Engine* (GEE) ha revolucionado este campo al proporcionar acceso gratuito a *petabytes* de datos satelitales y capacidad de procesamiento en la nube (Gorelick *et al*., 2017). Sin embargo, la generación de composites multi-temporales en GEE requiere código extenso que incluye filtrado de colecciones, enmascaramiento de nubes, escalado a reflectividad y agregación temporal. Algunos paquetes de Python han extendido GEE para simplificar estos flujos de trabajo: *eemont* (Montero, 2021) proporciona preprocesamiento y cálculo de índices espectrales, mientras que *wxee* (Zuspan, 2021) permite agregación temporal y exportación a *xarray*. Sin embargo, Ndvi2Gif adopta una estrategia de organización temporal diferente. Mientras eemont mantiene la estructura temporal nativa de los objetos *ee.ImageCollection* y *wxee* agrega series temporales en pasos secuenciales (por ejemplo, 480 compuestos mensuales para 40 años), Ndvi2Gif implementa una aproximación jerárquica basada en bandas donde cada imagen representa una unidad temporal con bandas codificando sub-periodos (por ejemplo, 40 imágenes/años con 12, 24 o 52 bandas cada una para compuestos mensuales, quincenales o semanales) al tiempo que mantiene la estructura de una colección de imágenes (*ee.ImageCollection),* lo que permite a su vez, seguir aplicando reductores para obtener un segundo nivel de simplificación estadística.

Sobre esta estructura se integran además tres módulos para análisis de series temporales, extracción de métricas fenológicas y clasificación mediante aprendizaje automático, conformando un flujo de trabajo completo dentro del mismo paquete.

Esta decisión arquitectónica surgió para abordar preguntas de investigación específicas en monitorización ecológica que requieren comparaciones multi-temporales directas a través de ventanas estacionales fijas. Esta organización basada en bandas permite consultas tales como: "¿Cuál es el percentil 95 del índice de cianobacterias (NDCI) en los embalses andaluces en los meses de agosto de los últimos 10 años?", lo cual se puede obtener simplemente con la ejecución de *collection.select('august').mean()*, o "¿En qué semana del año alcanza su máximo la clorofila (índice OCI) en lagos europeos?" mediante *collection.max().bandNames()* en lugar de requerir operaciones de filtrado temporal, agrupación y reducción sobre cientos de imágenes separadas. En la figura 1 se muestra un ejemplo que compara la mediana del percentil 85 del índice FAI (*Floating Algae Index*) de todos los píxeles de Landsat en el embalse de Valdecañas para dos periodos, uno anterior (2000-2005) a la construcción del complejo urbanístico y otro reciente (2020-2025) con el complejo ya construido y habitado. Este tipo de análisis es el que Ndvi2Gif permite hacer de manera muy ágil, con el añadido de que es aplicable, al estar montado sobre *Google Earth Engine*, a cualquier lugar del planeta y de que replicarlo cambiando de índice, estadístico o *dataset* es tan sencillo como cambiar una sola palabra a la hora de ejecutar la herramienta.

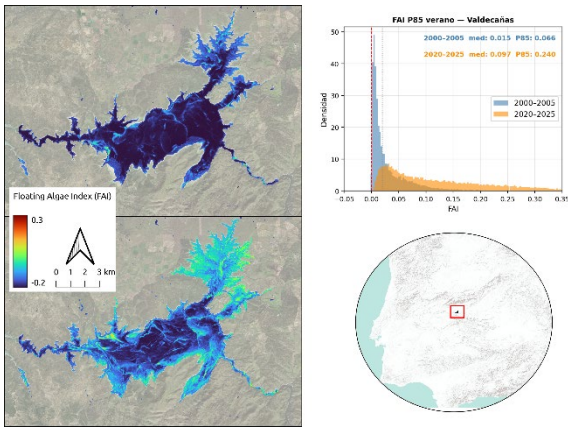


Figura 1. Comparativa de la Mediana del percentil 85 para los meses de verano en el embalse de Valdecañas entre los periodos 2000/05 y 2020/25.

El objetivo de este trabajo no es presentar un caso de aplicación específico de la herramienta, sino mostrar las capacidades y herramientas de la librería, con el fin de demostrar cómo Ndvi2Gif es capaz de simplificar enormemente el análisis multi-temporal de datos de teledetección.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Arquitectura del software

Ndvi2Gif está construido sobre la API de Python de GEE y *Geemap* (Wu, 2020), heredando de este último las capacidades de visualización interactiva. El módulo principal ndvi2gif se engloba en torno a la clase *NdviSeasonality, que* encapsula todo el flujo de trabajo: selección de sensor y región de interés, filtrado temporal, enmascaramiento de nubes, escalado a reflectividad (Landsat collection 2) y agregación estadística.

El método *get_year_composite* devuelve una *ee.ImageCollection* donde cada imagen representa un año con bandas nombradas según el periodo temporal (por ejemplo, periods=12 genera bandas *january*, *february*, *march*, *april*, ... *december*; periods=4 genera como bandas *winter*, *spring*, *summer*, *autumn*). Los estadísticos de agregación disponibles incluyen máximo, media, mediana, suma, mínimo y percentiles configurables, permitiendo adaptarse a diferentes aplicaciones: máximo para detección de picos de vegetación, mediana para robustez frente a nubes residuales, o percentiles específicos para análisis de sequía. Además se cuenta con un método *get_stats* que permite extraer estadísticas zonales directamente sobre polígonos sin necesidad de procesamiento SIG externo. El flujo de trabajo completo y capacidades de la librería se muestra en la Figura 2.

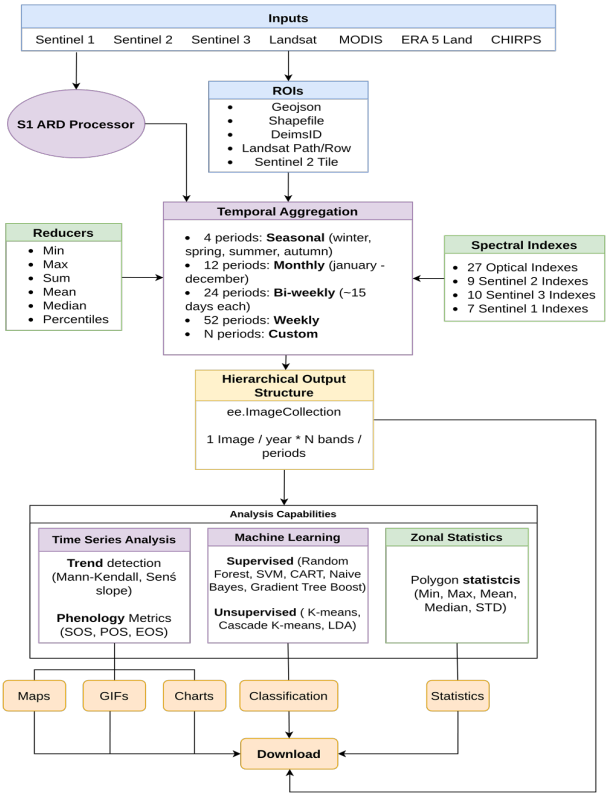


Figura 2. Esquema de la librería Ndvi2Gif. En azul datos de entrada, en verde procesos, en morado módulos principales y en naranja productos disponibles para descarga.

2.1.1. Datasets e *Inputs* soportados

El paquete proporciona acceso unificado a múltiples plataformas satelitales (tabla 1) y a dos *datasets* de reanálisis climático: Sentinel-2, Sentinel-3, Landsat 4-9, MODIS, Sentinel-1 GRD, ERA5-Land y CHIRPS. Actualmente hay predefinidos 52 índices y 48 variables climáticas. Respecto al nivel de procesado de los mismos, todos los sensores ópticos (Sentinel 2, MODIS y Landsat) se utilizan a nivel de reflectividad en superficie (SR), a excepción de Sentinel-3 OLCI, que proporciona radiancia en el techo de la atmósfera (TOA). Sentinel-1 trabaja en retrodispersión SAR (GRD). Los modelos de reanálisis climático ERA5-Land (ECMWF, ~11 km, desde 1950) y CHIRPS (~5,5 km, desde 1981) se incorporan como variables de contexto ambiental, permitiendo combinar en un mismo flujo de trabajo índices de teledetección con variables climáticas como temperatura, humedad del suelo o precipitación.

Tabla 1. Datasets soportados

Dataset	Resolución espacial	Año de inicio
Sentinel 1	10 m	2014
Sentinel 2	10-20 m	2017
Sentinel 3 OLCI	300 m	2016
MODIS	500 m	2000
Landsat 4-9	30 m	1984
ERA 5 Land	11 km	1950
CHIRPS	5.5 km	1981

Respecto a las regiones de interés (ROI) admitidas, Ndvi2Gif soporta múltiples formatos de ROI: geometrías nativas de GEE (ee.Geometry), *shapefiles* y *GeoJSON* locales, dibujo interactivo sobre el mapa, identificadores de sitios eLTER de DEIMS-SDR ('deimsid:'), códigos de teselas Sentinel-2 MGRS ('s2:') y códigos path-row de Landsat WRS ('wrs:').

2.2 Módulos especializados

Junto al módulo principal, se han elaborado otros tres módulos que añaden funcionalidades para trabajar de forma más precisa con datos radar, hacer análisis de series temporales (tendencias y fenología) y realizar clasificaciones basadas en los compuestos estacionales generados.

2.2.1. S1ARDProcessor implementa un *pipeline* completo de datos Analysis Ready Data (ARD) para Sentinel-1 basado en Vollrath *et al*. (2020). Incluye corrección radiométrica del terreno mediante el ángulo local de incidencia, con dos modelos de dispersión configurables: VOLUME para vegetación y SURFACE para suelo desnudo o agua. El módulo soporta cuatro DEMs (Copernicus 30/90m, SRTM 30/90m) y cinco algoritmos de filtrado de *speckle*: Refined Lee, Lee, Gamma MAP, Lee Sigma y Boxcar, con tamaño de *kernel* configurable. La salida puede generarse en escala lineal o decibelios.

2.2.2. TimeSeriesAnalyzer extrae series temporales para puntos o promedios zonales y proporciona herramientas de análisis temporal. La detección de tendencias incluye el test de Mann-Kendall, pendiente de Sen y regresión lineal con test de significancia. Para la extracción de métricas fenológicas ofrece tres métodos (umbral, derivada y ajuste logístico) que calculan: inicio (SOS), pico (POS) y fin de estación (EOS), duración, amplitud, valor máximo, tasas de crecimiento y senescencia, y área bajo la curva. Incluye suavizado Savitzky-Golay configurable, comparación inter-anual con detección de anomalías mediante *z-scores*, y visualización mediante *dashboards* multi-panel. Permite también la generación de rasters de tendencia (*slope*, *intercept* y *magnitude*).

2.2.3. LandCoverClassifier proporciona flujos de trabajo de clasificación supervisada y no supervisada sobre los compuestos estacionales generados. Los algoritmos supervisados incluyen *Random Forest*, *SVM*, *CART*, *Gradient Tree Boost* y *Naive Bayes*; los no supervisados incluyen *K-means* y *Cascade K-means*. El módulo construye automáticamente una imagen multi-banda combinando los compuestos de cada año y periodo temporal, a la que opcionalmente se añaden estadísticas inter-anuales (media, desviación típica, máximo y mínimo) y normalización al rango [0,1]. La evaluación de precisión genera matriz de confusión, exactitud global, coeficiente kappa, y exactitudes del productor y usuario por clase. Para *Random Forest* se incluye análisis de importancia de variables.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este trabajo no pretende mostrar una aplicación concreta, sino dar a conocer una librería de *Python* de utilidad para la comunidad teledetectora. Ndvi2Gif es una herramienta de uso habitual para la resolución de consultas en el Laboratorio de SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana, y ha sido aplicado en estudios de calibración y validación de productos de observación de la Tierra para fenología y monitorización de aguas superficiales en el Espacio Natural de Doñana (Díaz-Delgado & García-Díaz, 2025).

4. CONCLUSIONES

La principal aportación de Ndvi2Gif es su organización temporal basada en bandas que sintetizan estadísticamente los píxeles en base a ventanas estacionales fijas (quincenas, meses, estaciones, u otros periodos definidos), facilitando el análisis de cambio a largo plazo sin procesamiento adicional. Sobre esta base, los tres módulos especializados *S1ARDProcessor*, *TimeSeriesAnalyzer* y *LandCoverClassifier* extienden las capacidades hacia el preprocesamiento ARD de Sentinel-1, la extracción automatizada de métricas fenológicas y la clasificación mediante aprendizaje automático, cubriendo así los flujos de trabajo más habituales en teledetección aplicada a la monitorización ambiental. Otro aspecto a resaltar es que al tratarse de código abierto (*PyPI*, *conda-forge*), cualquier usuario puede coger el código e incorporar, y compartir, nuevos *datasets*, índices o funcionalidades. La documentación completa, incluyendo tutoriales de uso, está disponible en la siguiente página web, que se actualiza de forma frecuente con nuevos tutoriales: https://digdgeo.github.io/Ndvi2Gif/intro.html.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al equipo de *Google Earth Engine*, y a Qiusheng Wu por *Geemap*, base de las capacidades interactivas de Ndvi2Gif, así como por su incalculable labor en el desarrollo y difusión del software libre geoespacial.

6. REFERENCIAS

Díaz-Delgado, R., & García-Díaz, D. (2025). In-situ validation of Land Surface Phenology, Land Surface Temperature and Surface Water derived from Earth Observation products: Doñana protected area as a potential cal/val supersite. *Recent Advances in Remote Sensing,2*(9). https://doi.org/10.62880/rars25009

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment, 202*, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Montero, D. (2021). eemont: A Python package that extends Google Earth Engine. *Journal of Open Source Software, 6*(62), 3168. https://doi.org/10.21105/joss.03168

Vollrath, A., Mullissa, A., & Reiche, J. (2020). Angular-based radiometric slope correction for Sentinel-1 on Google Earth Engine. *Remote Sensing, 12*(11), 1867. https://doi.org/10.3390/rs12111867

Wu, Q. (2020). geemap: A Python package for interactive mapping with Google Earth Engine. *Journal of Open Source Software, 5*(51), 2305. https://doi.org/10.21105/joss.02305

Zuspan, A. (2021). wxee: A Python interface between Earth Engine and xarray [Software]. GitHub. https://github.com/aazuspan/wxee

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.123

TSGenerator: librería R de código abierto para el procesado integrado de productos fenológicos HR-VPP de Copernicus

Valero-Jorge, Alexey [1] **Casterad, Mª Auxiliadora** [1] **Alcalá, José-Tomás** [2]

[1] Dpto. de Sistemas Agrícolas, Forestales y Medio Ambiente (Unidad asociada a EEAD-CSIC Suelos y Riegos), Centro de Investigación y Tecnologías Agroalimentaria de Aragón, España

[2] Dpto. de Métodos Estadísticos, Instituto Universitario de Investigación en Matemáticas y Aplicaciones (IUMA), Universidad de Zaragoza, España

ORCID: Valero-Jorge 0000-0002-5993-7346 Casterad 0000-0003-4458-6966 Alcalá 0000-0001-7549-8825

Correspondencia: avalero@cita-aragon.es acasterad@cita-aragon.es jtalcala@unizar.es

RESUMEN

El conjunto de productos *High Resolution Vegetation Phenology and Productivity* del *Copernicus Land Monitoring Service* proporciona series temporales de índices de vegetación y parámetros fenológicos derivados de Sentinel-2, con creciente aplicación en agricultura y monitorización de ecosistemas. Sin embargo, su explotación operativa requiere flujos complejos de descarga, filtrado de calidad y análisis temporal que limita su uso por usuarios no expertos. Este trabajo presenta TSGenerator, una librería R de código abierto que integra el procesamiento de productos HR-VPP, incluyendo descarga, preprocesamiento, extracción espacial y análisis de calidad e imputación, junto con aplicaciones Shiny orientadas a usuarios sin experiencia en programación. Su funcionalidad se valida mediante la monitorización de 1809 parcelas agrícolas durante el periodo 2018–2023, mostrando alta eficiencia en preprocesamiento y extracción espacial en equipos convencionales, siendo la descarga el principal cuello de botella. En el estudio se detecta una elevada variabilidad en la completitud de las series, así como patrones estacionales no aleatorios de datos ausentes, poniendo de relieve la importancia del análisis de calidad. TSGenerator reduce barreras técnicas y facilita el uso operativo de productos HR-VPP en aplicaciones agrícolas y ambientales..

Palabras clave: *Sentinel-2; NDVI; series temporales, programación, cultivos*

Fecha de recepción: 5 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 5 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

TSGenerator: librería R de código abierto para el procesado integrado de productos fenológicos HR-VPP de Copernicus

Valero-Jorge, Alexey [(1)], Casterad, Mª Auxiliadora [(1)], Alcalá, José-Tomás [(2)]

[(1)] Dpto. de Sistemas Agrícolas, Forestales y Medio Ambiente (Unidad asociada a EEAD-CSIC Suelos y Riegos), Centro de Investigación y Tecnologías Agroalimentaria de Aragón, España.

0000-0002-5993-7346, avalero@cita-aragon.es.

0000-0003-4458-6966, acasterad@cita-aragon.es.

[(2)] Dpto. de Métodos Estadísticos, Instituto Universitario de Investigación en Matemáticas y Aplicaciones (IUMA), Universidad de Zaragoza, España.

0000-0001-7549-8825, jtalcala@unizar.es.

Resumen: El conjunto de productos *High Resolution Vegetation Phenology and Productivity* del *Copernicus Land Monitoring Service* proporciona series temporales de índices de vegetación y parámetros fenológicos derivados de Sentinel-2, con creciente aplicación en agricultura y monitorización de ecosistemas. Sin embargo, su explotación operativa requiere flujos complejos de descarga, filtrado de calidad y análisis temporal que limita su uso por usuarios no expertos. Este trabajo presenta *TSGenerator*, una librería R de código abierto que integra el procesamiento de productos HR-VPP, incluyendo descarga, preprocesamiento, extracción espacial y análisis de calidad e imputación, junto con aplicaciones *Shiny* orientadas a usuarios sin experiencia en programación. Su funcionalidad se valida mediante la monitorización de 1809 parcelas agrícolas durante el periodo 2018–2023, mostrando alta eficiencia en preprocesamiento y extracción espacial en equipos convencionales, siendo la descarga el principal cuello de botella. En el estudio se detecta una elevada variabilidad en la completitud de las series, así como patrones estacionales no aleatorios de datos ausentes, poniendo de relieve la importancia del análisis de calidad. *TSGenerator* reduce barreras técnicas y facilita el uso operativo de productos HR-VPP en aplicaciones agrícolas y ambientales.

Palabras clave: Sentinel-2; NDVI; series temporales, programación, cultivos

TSGenerator: open-source R library for integrated processing of Copernicus HR-VPP phenological products

***Abstract**: The High Resolution Vegetation Phenology and Productivity product suite from the Copernicus Land Monitoring Service provides time series of vegetation indices and phenological parameters derived from Sentinel-2, with growing applications in agriculture and ecosystem monitoring. However, its operational use requires complex workflows involving data download, quality filtering, and temporal analysis, which limits its use by non-expert users. This paper presents TSGenerator, an open-source R library that integrates HR-VPP product processing, including downloading, preprocessing, spatial extraction, quality analysis, and imputation, along with Shiny applications designed for users with no programming experience. Its functionality is validated by monitoring 1,809 agricultural plots during the 2018–2023 period, demonstrating high efficiency in preprocessing and spatial extraction on conventional hardware, with downloading being the main bottleneck. The study detects high variability in the completeness of the time series, as well as non-random seasonal patterns of missing data, highlighting the importance of quality analysis. TSGenerator reduces technical barriers and facilitates the operational use of HR-VPP products in agricultural and environmental applications.*

***Keywords**: Sentinel-2; NDVI; time series, programming, crops*

1. INTRODUCCIÓN

Los productos *High Resolution Vegetation Phenology and Productivity* (HR-VPP) del *Copernicus Land Monitoring Service* (CLMS), disponibles en la plataforma WEkEO—de acceso libre previa autenticación y disponibilidad condicionada por los tiempos de procesado del servicio—ofrecen series temporales de alta resolución de índices de la vegetación (NDVI, LAI, fAPAR, PPI) y parámetros fenológicos derivados de Sentinel-2, esenciales para aplicaciones en agricultura de precisión, monitorización de ecosistemas y

evaluación de impactos del cambio climático en España y Europa (CLMS, 2022). Sin embargo, su procesado implica desafíos significativos en cuanto a la descarga autenticada vía API de acceso a datos armonizados (HDA API WEkEO), el filtrado de píxeles de baja calidad mediante el indicador de calidad QFLAG2, el manejo de grandes volúmenes de datos y una extracción espacial de datos eficiente, lo que restringe su uso por usuarios con experiencia limitada en programación.

El paquete oficial *hdar* desarrollado por WEkEO/EEA proporciona acceso nativo en R a la HDA API para descarga directa de productos CLMS, incluyendo HR-VPP, pero carece de flujos integrados específicos para limpieza, extracción temporal e interfaces accesibles para usuarios no expertos.

TSGenerator resuelve estas limitaciones mediante un paquete R de código abierto que integra descarga (actualmente vía *reticulate* y *hda* Python, con posible migración futura a *hdar*), descarga de datos, preprocesamiento, extracción de series temporales y análisis de calidad e imputación, complementado con aplicaciones Shiny (Chang *et al*., 2021) interactivas para un uso intuitivo sin programación avanzada. El objetivo de este trabajo es presentar *TSGenerator*, demostrar su funcionalidad con un caso práctico agrícola y promover su adopción en la comunidad de la teledetección.

2. EL PAQUETE TSGenerator

2.1. Arquitectura del paquete

TSGenerator se estructura en cuatro módulos funcionales interconectados que implementan un flujo de trabajo completo para el procesamiento de productos HR-VPP. El módulo de **descarga** (Tabla 1), permite búsquedas parametrizadas por producto: índices de vegetación incluido el producto de calidad QFLAG2, las trayectorias estacionales del PPI y los diferentes parámetros fenológicos; extensión espacial y rango temporal. La autenticación exigida para acceder a los datos se gestiona con el protocolo de autorización OAuth2 con la HDA API mediante la integración de la librería Python *hda* a través del paquete R *reticulate*.

El módulo de **preprocesamiento** implementa el análisis automatizado de la banda QFLAG2, identificando píxeles afectados, siguiendo las especificaciones técnicas del producto (CLMS, 2022). Los usuarios pueden definir configuraciones predeterminadas correspondientes a las clases de cielo despejado, proximidad de nubes, proximidad de sombras de nubes, proximidad de nubes extendidas y proximidad de sombras de nubes extendidas.

Tabla 1. Principales funciones del paquete TSGenerator.

Módulos	Funciones principales
Descarga	Download.VI; Download.VPP; Download.STPPI
Preprocesamiento	QFLAG2.Mask; get.Stack; renames.VI; renames.VPP
Extracción espacial	get.series.median; get.series.mean; get.series.VPP
Análisis de calidad e imputación	TSImpute; GAM.missing; general.Quality

El módulo de **extracción espacial** se utiliza para extraer series temporales de geometrías poligonales. La extracción implementa estrategias eficientes de agregación espacial mediante estadísticos descriptivos (media, mediana, desviación estándar) y gestión optimizada de memoria para *datasets* de gran escala. Para ello, utiliza las capacidades vectoriales y las funcionalidades ráster de las librerías *sf* (Pebesma, 2018) y *terra* (Hijmans, 2023).

Finalmente, el módulo de **análisis de calidad e imputación** calcula métricas cuantitativas de completitud temporal (porcentaje de observaciones válidas, distribución de gaps), identifica patrones *outliers* mediante un Modelo Aditivo Generalizado (GAM, ver fórmula en Valero-Jorge *et al*., 2025). Como método de imputación, se ofrece el Filtro de Kalman, ampliamente usado en series temporales.

2.2. Interfaz gráfica Shiny

Complementariamente a las funciones programáticas, *TSGenerator* incorpora 8 aplicaciones *Shiny* que eliminan la barrera de entrada para usuarios sin experiencia en programación R. Las 3 aplicaciones de descarga permiten configurar consultas HDA mediante formularios interactivos y gestionar descargas masivas con seguimiento de progreso. Las 4 aplicaciones de preprocesamiento conforman un módulo completo para el preprocesamiento interactivo de las series temporales de imágenes descargadas. Y la aplicación GAM que permite realizar el análisis y visualización de patrones ausentes en las series temporales de índices espectrales extraídas. Todas estas aplicaciones pueden ser lanzadas utilizando la función *runTSapp*.

3. CASO DE ESTUDIO: MONITORIZACIÓN DE CULTIVOS HERBÁCEOS

3.1. Procedimiento

Para validar la funcionalidad de *TSGenerator*, se implementó un caso de uso en agricultura sobre 1809 parcelas agrícolas de cultivos herbáceos–cebada, trigo, guisante, maíz bajo sistema de mono y doble cultivo y girasol de doble cultivo–ubicadas en las zonas de riego de Monegros y Zaidín, en Aragón, España (Figura 1).

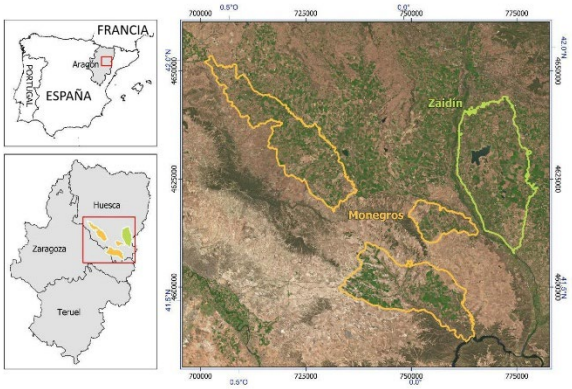


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

Los pasos seguidos para la monitorización se esquematizan en la Figura 2. Primero, se descargaron

los productos NDVI, la banda de calidad QFLAG2 y parámetros fenológicos correspondientes al período 2018-2023, cubriendo la extensión territorial de todas las parcelas, mediante consultas parametrizadas a la API HDA. Luego se aplicó una máscara conservadora sobre QFLAG2 (clases cielo despejado, QFLAG = 1).

Las series temporales de NDVI se extrajeron agregando espacialmente la mediana por parcela, tras filtrar previamente los píxeles de baja calidad mediante QFLAG2. Se asegura así que la agregación se realiza únicamente sobre los píxeles válidos disponibles en cada fecha. Finalmente, se evaluó la calidad temporal de las series y los patrones de datos ausentes.

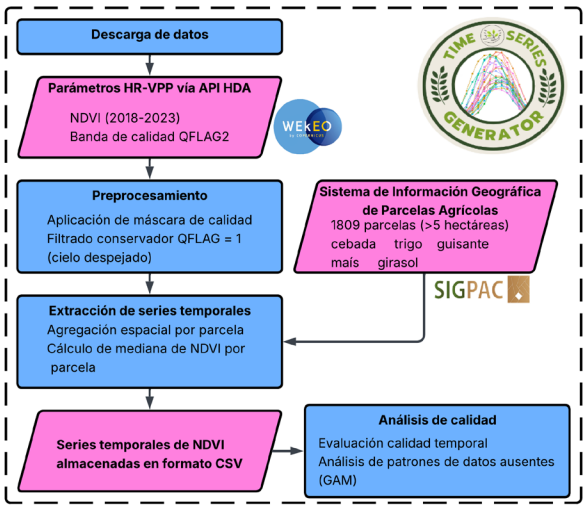


Figura 2. Flujo de procesos desarrollado.

Los cultivos presentes en cada parcela se identificaron utilizando registros anónimos de las declaraciones de la Política Agrícola Común proporcionadas por el Gobierno de Aragón. La información espacial y la delimitación geográfica de las parcelas se obtuvieron del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC) en formato *shapefile*. Es importante resaltar que el objetivo del caso de uso propuesto no es presentar aplicaciones complicadas y análisis profundos, sino ejemplos sencillos y didácticos de cómo implementar el paquete *TSGenerator*. Todo el procesamiento computacional se llevó a cabo en un ordenador equipado con un procesador Intel Core i9-12900 de 12ª generación (16 núcleos y 24 hilos), 32 GB de memoria RAM y unidad de almacenamiento SSD de 500 GB.

3.2. Eficiencia operacional

La adquisición autenticada de 252 productos Sentinel-2 (NDVI y QFLAG2) para la escena 30TYM (período 2018–2023) a través de la HDA API de WEkEO tomó 8 horas y 24 minutos en total. El proceso es dominado por factores de red (ancho de banda del servidor y conexión del usuario), con un volumen aproximado de 80–90 GB, convirtiéndolo en una tarea intensiva en transferencia de datos. En equipos con hardware inferior, el impacto en el tiempo total sería mínimo, ya que el cuello de botella radica en la latencia y rendimiento de la red, no en las capacidades locales de CPU o RAM.

El preprocesamiento de los 252 productos (incluyendo enmascaramiento y renombrado de bandas) tomó aproximadamente 3 horas y 42 minutos en total, con un uso de memoria pico inferior a 8 GB incluso al manejar paquete de imágenes multianuales. Esta optimización permite procesar grandes volúmenes sin requerir hardware especializado, y el módulo automatiza la selección de clases de calidad, reduciendo errores manuales y tiempo de ejecución en comparación con flujos *ad-hoc*.

El tiempo total para extraer series NDVI correspondientes a 6 años, para todas las parcelas fue de 54 minutos, con un consumo eficiente de recursos gracias al procesamiento por “trozos” y la gestión optimizada de memoria. La función *get.series.median* implementa paralelismo implícito, lo que le permite escalar adecuadamente a conjuntos de mayor tamaño. Este rendimiento se debe principalmente a dicho paralelismo y a una gestión eficiente de la memoria, más que al hardware específico utilizado, lo que sugiere una buena escalabilidad en equipos convencionales. En comparación con enfoques manuales como los utilizados en QGIS, *TSGenerator* reduce el tiempo en un factor de 5–10 al integrar todo el flujo en un solo paquete. Alternativamente, para análisis exploratorios sobre subconjuntos de parcelas, podrían emplearse enfoques basados en servicios remotos que eviten la descarga completa de imágenes.

3.3. Calidad de series temporales

El análisis de las series de NDVI mostró una alta variabilidad de calidad temporal tanto interanual como entre cultivos en la disponibilidad de observaciones válidas tras aplicar un QFLAG2 conservador (Figura 3).

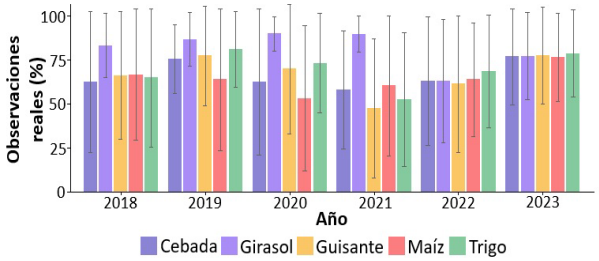


Figura 3. Porcentaje medio anual de observaciones disponibles.

El año 2023 registró el mayor porcentaje de observaciones disponibles (76,6–78,5 %) para todos los cultivos, constituyéndose como un año de baja cobertura nubosa, en general aceptable para la construcción de series temporales. Por el contrario, 2021 presentó los valores más bajos (47,6–89,5 %), lo que refleja condiciones meteorológicas adversas caracterizadas por mayor nubosidad persistente, que limitaron significativamente la adquisición de datos ópticos de calidad en la región de estudio, como es habitual en años con patrones climáticos más inestables en el noreste peninsular.

3.4. Patrones de datos ausentes

Los GAM ajustados para la probabilidad de datos ausentes en las series temporales de NDVI mostraron patrones estacionales significativos ($p < 0,05$) en todos los cultivos, evidenciando una variación no lineal a lo largo del año (Figura 4). Al agrupar por ciclo fenológico,

los cultivos de invierno (cebada, trigo y guisante) presentaron una varianza explicada media del 7,0 % (rango 6,5–7,6 %), reflejando un componente estacional detectable pero débil, dominado por la alta variabilidad aleatoria inherente a los datos de calidad óptica de Sentinel-2. En contraste, los cultivos de verano (maíz y girasol) alcanzaron una varianza explicada media del 19,0 % (rango 17,2–20,8 %), indicando patrones de ausencias más estructurados y predecibles, probablemente asociados a periodos de nubosidad persistente durante sus fases críticas de desarrollo. En ambos grupos, las curvas GAM confirman que la ausencia de datos no es aleatoria, con máximos notorios en invierno-primavera y otoño, lo que subraya la necesidad de imputación robusta en esos periodos clave para garantizar series temporales fiables en monitorización fenológica agrícola. Estos resultados son coherentes con trabajos que destacan la necesidad de considerar la estructura temporal en imputación y análisis fenológicos (Simões *et al*., 2021; Kong *et al*., 2022 y Valero-Jorge *et al*., 2025).

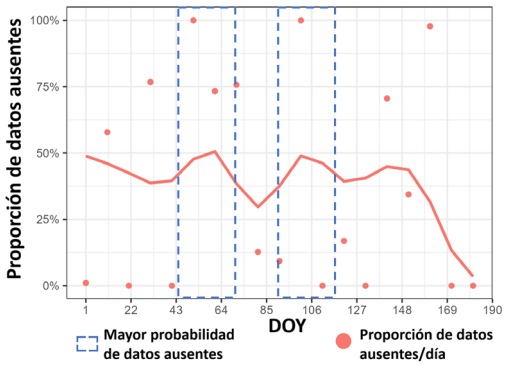


Figura 4. Probabilidad de datos ausentes en cebada de 2018.

4. CONTRIBUCIÓN Y CONCLUSIONES

TSGenerator constituye una solución de código abierto para el procesamiento integrado de productos HR-VPP, con beneficios operacionales. Integra en un único paquete R las etapas principales del procesamiento de productos HR-VPP, reduciendo la dependencia de herramientas externas y facilitando el uso de estos datos por usuarios sin mucha experiencia en programación. Los resultados operacionales evidencian que la descarga es el principal cuello de botella, condicionado por la red, en coherencia con lo descrito previamente para flujos Sentinel-2 por Ranghetti *et al*. (2020).

El preprocesamiento, la extracción espacial y el análisis temporal son computacionalmente eficientes en equipos convencionales. El caso de estudio demuestra tiempos de ejecución compatibles con aplicaciones de monitorización a nivel de parcela y valida la utilidad del análisis de calidad para identificar patrones de gaps relevantes para series fenológicas. La relevancia del módulo de análisis de calidad se confirma al evidenciarse la marcada variabilidad interanual y entre cultivos en la completitud de las series, particularmente en 2021.

La disponibilidad de aplicaciones *Shiny* amplía el alcance de la herramienta respecto a otras del ecosistema R, facilitando la adopción operacional de HR-VPP por parte de usuarios no programadores.

El desarrollo futuro se orienta a integrar *hdar* y agregar otros métodos de imputación convencionales, reforzando la relevancia del paquete para el análisis fenológico basado en teledetección. *TSGenerator* está disponible actualmente en **GitHub** (https://github.com/avalero92/TSGenerator) y **Zenodo** (https://zenodo.org/records/14936909).

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto LAIKcA, I+D+i PID2021-124029OR-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER/UE. El primer autor agradece la ayuda PRE2022-102328 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

6. REFERENCIAS

Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Sievert, C., Schloerke, B., Xie, Y., Allen, J., McPherson, J., Dipert, A., & Borges, B. (2021). shiny: Web Application Framework for R. R package version 1.7.1. https://CRAN.R-project.org/package=shiny

Copernicus Land Monitoring Service. (2022). Product user manual of seasonal trajectories and VPP parameters: High Resolution Vegetation Phenology and Productivity (HR-VPP) (Issue 2.5). European Environment Agency. https://land.copernicus.eu/en/technical-library/product-user-manual-of-seasonal-trajectories/@@download/file

European Environment Agency. (s.f.). hdar: R client for the Harmonised Data Access (HDA) API of WEkEO [Paquete de software R]. CRAN. Recuperado el 24 de diciembre de 2025, de https://cran.r-project.org/package=hdar.

Hijmans, R. J. (2023). terra: Spatial data analysis. *CRAN: Contributed packages*. https://CRAN.R-project.org/package=terra

Kong, D. (2020). phenofit: A state-of-the-art vegetation phenology extraction package (Versión 0.3.9) [R software package]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.3605560.

Pebesma, E. (2018). Simple features for R: standardized support for spatial vector data. https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009

Ranghetti, L., Boschetti, M., Nutini, F., & Busetto, L. (2020). "sen2r": An R toolbox for automatically downloading and preprocessing Sentinel-2 satellite data. *Computers & Geosciences, 139*, 104473. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104473

Simões, R., Camara, G., Queiroz, G., Souza, F., Andrade, P. R., Santos, L., Carvalho, A., & Ferreira, K. (2021). Satellite image time series analysis for big Earth observation data. *Remote Sensing, 13*(13), Article 2428. https://doi.org/10.3390/rs13132428

Valero-Jorge, A.; Casterad, M.A.; Alcalá, J.-T. Evaluating the Influence of Missing Data from the Crop Vegetation Index Time Series on Copernicus HR-VPP Phenological Products. *Eng. Proc. 2025, 94*, 4. https://doi.org/10.3390/engproc2025094004

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.168

Cambio de modelo productivo en el PNOA-LiDAR: clasificación semántica automática a escala nacional

Garrido Sáenz de Tejada, Jesús María [1] **Ballestero García-Asenjo, Ernesto** [1] **Puchol Sola, Guillermo** [1]

[1] Instituto Geográfico Nacional, España

ORCID: Garrido Sáenz de Tejada 0009-0003-6632-5422 Ballestero García-Asenjo 0009-0003-3991-0706 Puchol Sola 0009-0006-1841-3403

Correspondencia: jmgarrido@transportes.gob.es isdefe.eballesteros@externomf.es gpuchol@transportes.gob.es

RESUMEN

La tercera cobertura del Plan Nacional Observación Aérea LiDAR (PNOA-LiDAR) incrementa significativamente la densidad de puntos y el número de clases objetivo, haciendo inviable mantener el flujo tradicional de clasificación basado en edición manual exhaustiva. Para abordar esta limitación, el Instituto Geográfico Nacional evaluó la implantación de un modelo de producción basado en clasificación semántica automática mediante aprendizaje profundo. Se desarrolló un proceso progresivo de validación que incluyó el análisis del estado del arte, tres proyectos piloto en ámbitos representativos del territorio (Castilla y León, Extremadura y Aragón) y su posterior incorporación al flujo productivo. Los pilotos permitieron comprobar la viabilidad inicial, la capacidad de generalización territorial y la estabilidad del modelo ante el aumento del número de clases. El análisis comparativo identificó como factores determinantes la calidad y representatividad del conjunto de entrenamiento, el entrenamiento iterativo y la integración de pre y postprocesado espacial. Las clases mayoritarias alcanzaron valores de F1 superiores a 0,90 y el postprocesado mejoró significativamente las clases minoritarias. Tras la validación, la clasificación automática se incorporó a producción, permitiendo generar productos multinivel (NPC1-NPC3) con más de veinte fenómenos geográficos y fiabilidad compatible con los estándares cartográficos oficiales. La producción se encuentra en ejecución para la totalidad del territorio nacional. La experiencia demuestra la madurez tecnológica de la clasificación automática y su viabilidad operativa a escala nacional, constituyendo un cambio de modelo productivo desde la edición manual hacia un sistema automatizado supervisado.

Palabras clave: *LiDAR, PNOA-LiDAR, IA, nube de puntos.*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Cambio de modelo productivo en el PNOA-LiDAR: clasificación semántica automática a escala nacional

Garrido Sáenz de Tejada, Jesús María [(1)], Puchol Sola, Guillermo [(1)], Ballestero García-Asenjo, Ernesto [(2)]

[(1)] Instituto Geográfico Nacional, España.

0009-0003-6632-5422, jmgarrido@transportes.gob.es ; 0009-0006-1841-3403, gpuchol@transportes.gob.es.

[(2)] Ingeniería de Sistemas para la Defensa.

0009-0003-3991-0706, isdefe.eballesteros@externomf.es.

Resumen: La tercera cobertura del Plan Nacional Observación Aérea LiDAR (PNOA-LiDAR) incrementa significativamente la densidad de puntos y el número de clases objetivo, haciendo inviable mantener el flujo tradicional de clasificación basado en edición manual exhaustiva. Para abordar esta limitación, el Instituto Geográfico Nacional evaluó la implantación de un modelo de producción basado en clasificación semántica automática mediante aprendizaje profundo. Se desarrolló un proceso progresivo de validación que incluyó el análisis del estado del arte, tres proyectos piloto en ámbitos representativos del territorio (Castilla y León, Extremadura y Aragón) y su posterior incorporación al flujo productivo. Los pilotos permitieron comprobar la viabilidad inicial, la capacidad de generalización territorial y la estabilidad del modelo ante el aumento del número de clases. El análisis comparativo identificó como factores determinantes la calidad y representatividad del conjunto de entrenamiento, el entrenamiento iterativo y la integración de pre y postprocesado espacial. Las clases mayoritarias alcanzaron valores de F1 superiores a 0,90 y el postprocesado mejoró significativamente las clases minoritarias. Tras la validación, la clasificación automática se incorporó a producción, permitiendo generar productos multinivel (NPC1-NPC3) con más de veinte fenómenos geográficos y fiabilidad compatible con los estándares cartográficos oficiales. La producción se encuentra en ejecución para la totalidad del territorio nacional. La experiencia demuestra la madurez tecnológica de la clasificación automática y su viabilidad operativa a escala nacional, constituyendo un cambio de modelo productivo desde la edición manual hacia un sistema automatizado supervisado.

Palabras clave: LiDAR, PNOA-LiDAR, IA, nube de puntos.

Implementation of Artificial Intelligence methodologies for point cloud classification in the PNOA-LIDAR project

***Abstract**: The third coverage of the Spanish National Aerial LiDAR Observation Plan (PNOA-LiDAR) significantly increases point density and the number of target classes, making the traditional classification workflow based on exhaustive manual editing no longer feasible. To address this limitation, the Spanish National Geographic Institute evaluated the implementation of a production model based on automatic semantic classification using deep learning. A progressive validation process was carried out, including a state-of-the-art review, three pilot projects in representative areas (Castilla y León, Extremadura and Aragón), and their subsequent integration into the production workflow. The pilots allowed verification of initial feasibility, territorial generalization capability, and model stability when increasing the number of classes. Comparative analysis identified the most relevant factors as the quality and representativeness of the training dataset, iterative training, and the integration of spatial pre- and post-processing. Major classes achieved F1 scores above 0.90, while post-processing significantly improved minority classes. After validation, automatic classification was incorporated into production, enabling multi-level products (NPC1–NPC3) with more than twenty geographic phenomena and reliability compatible with official cartographic standards. Production is currently underway for the entire national territory. The experience demonstrates the technological maturity of automatic classification and its operational feasibility at national scale, representing a shift from manual editing towards a supervised automated production model.*

***Keywords**: LiDAR, PNOA-LiDAR, AI, pointcloud*

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) es responsable, entre otras competencias, de la generación y actualización de la información altimétrica oficial del territorio español mediante el Plan Nacional de Observación Aérea - LiDAR (PNOA-LiDAR), iniciado en 2008 y actualmente en su tercera cobertura (2022-2026) (Tabla 1).

Tabla 1. Evolución PNOA LiDAR

Cobertura	1	2	3
Fechas	2008-2015	2015-2021	2022-2026
Pulso (Hz)	85.000	300.000	800.000
Barrido (Hz)	40	100	200
Velocidad	150	170	180
H_{AMSL} (m)	3.200	3.600	3.500
Nº retornos	4	4	8
R. Ver. (m)	3,5	0,7	0,7
Int. (bits)	8	8	16
Pre. Z (m)	0,15	0,10	0,10
Pts/m^2	0,5	1,5	5
Nº Clases	5	6	>13

La evolución tecnológica de los sensores ha permitido reducir progresivamente los tiempos de captura y aumentar la precisión y nivel de detalle de los datos adquiridos. Paralelamente, el desarrollo reciente de técnicas basadas en Inteligencia Artificial ha supuesto una mejora significativa en el procesamiento de información LiDAR, permitiendo la clasificación semántica automática de nubes de puntos de alta densidad en un mayor número de clases.

En las coberturas anteriores, con densidades entre 0,5 y 1,5 pts/m², la clasificación se realizaba mediante una metodología convencional basada en una primera clasificación automática mediante algoritmos geométricos y radiométricos —principalmente análisis de pendientes— seguida de una edición manual interactiva completa del ámbito. Este proceso permitía alcanzar una fiabilidad cercana al 90 % en las clases mayoritarias (suelo, vegetación y edificaciones) y aproximadamente un 95 % tras la edición manual, pero implicaba un elevado coste en tiempo y recursos, retrasando la disponibilidad de la nube de puntos clasificada y de los productos derivados.

La tercera cobertura del PNOA - LiDAR, con densidades de 5 pts/m², multiplica proporcionalmente el volumen de información y hace inviable mantener exclusivamente esta metodología debido al incremento de tiempos de edición manual. El aumento de densidad permite aplicar modelos de aprendizaje profundo capaces de identificar entidades geográficas con mayor nivel semántico que en coberturas anteriores.

En 2023 el IGN realizó una Consulta Pública al Mercado (CPM) con participación de empresas privadas y equipos universitarios para conocer el grado de implantación de estas técnicas en el sector. Las conclusiones indicaron una madurez tecnológica suficiente para abordar su incorporación a producción.

La contribución principal del trabajo es la validación y adopción operativa de la clasificación semántica automática como nuevo modelo de producción del PNOA-LiDAR, sustituyendo el flujo tradicional basado en edición manual exhaustiva por un proceso automatizado supervisado, viable para la totalidad del territorio nacional.

2. ESTADO DEL ARTE

Dado el objeto del estudio —la segmentación semántica de nubes de puntos tridimensionales— el análisis se centró en algoritmos de aprendizaje automático basados en Deep Learning mediante redes neuronales. Estas técnicas presentan una elevada complejidad computacional, requieren el ajuste de numerosos hiperparámetros y el uso de hardware especializado basado en GPU para entrenamiento e inferencia.

Se revisó la literatura reciente y las principales librerías, frameworks y arquitecturas disponibles, evaluando no solo su rendimiento en métricas de clasificación sino también su madurez tecnológica, mantenimiento, estabilidad y aplicabilidad en entornos productivos.

Entre las arquitecturas analizadas (Figura 1), modelos tempranos como PointNet (2017) y PointCNN (2018) mostraban limitaciones frente a propuestas más recientes. KPConv (2019) ofrecía buenas métricas durante el entrenamiento, aunque con restricciones en el número de puntos procesables durante la inferencia, requiriendo estrategias adicionales de vecindad y submuestreo.

RandLA-Net (2019), implantada en IGN Francia, permitía trabajar con grandes volúmenes de datos con mejor rendimiento, aunque penalizando las métricas en algunas clases. Por su parte, Point Transformer (2021) presentaba resultados comparables a KPConv con mayor grado de evolución y actualización.

El objetivo de esta revisión no fue determinar la arquitectura óptima, sino verificar la disponibilidad de soluciones con madurez suficiente para su aplicación en producción cartográfica nacional.

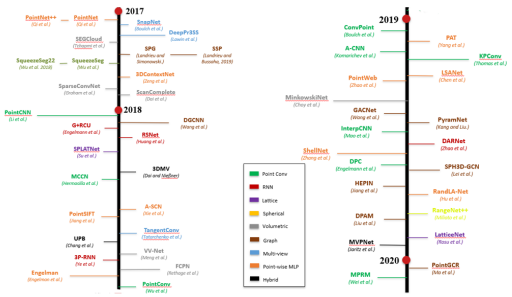


Figura 1. Y.Guo H Wang, Q Hu, H Liu, L Liu, M Bennamoun 2020 Deep learning for 3 D point clouds a survey IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 43 12 pp 4338 4364

3. PRUEBAS PILOTO

Se realizaron tres proyectos piloto sobre ámbitos representativos del territorio nacional con el objetivo de

evaluar la viabilidad técnica del modelo, su capacidad de generalización territorial y su estabilidad ante el aumento del número de clases.

En 2023 se desarrolló una primera prueba en el suroeste de Castilla y León (19.345 km²)., utilizando datos de la segunda cobertura PNOA-LiDAR con una densidad similar a la tercera cobertura. En esta fase se entrenó un modelo con ocho clases semánticas (Tabla 2) a partir de nubes previamente clasificadas mediante metodología convencional y sometidas a un control de calidad, con el objetivo de comprobar la viabilidad del entrenamiento en condiciones controladas.

Tabla 2. Clases semánticas. Prueba piloto 1.

Clases	Descripción	Clases	Descripción
2	Suelo	9	Torres eléctricas
3	Veg. Baja (<30cm)	10	Vehículos
4	Veg media/alta	11	Cables eléctricos
6	Edificios	17	Puentes

Durante 2024 se ejecutaron dos nuevas pruebas en Extremadura y Aragón, (41.774 km²) con datos correspondientes a la tercera cobertura, ampliando el número de clases a catorce categorías (Tabla 3) y comparando distintos enfoques de entrenamiento basados en KPConv y Point Transformer.

Tabla 3. Clases semánticas. Prueba piloto Extremadura y Aragón

Clases	Descripción	Clases	Descripción
2	Suelo	11	Carreteras
3	Veg. Baja	64	Vehículos
4	Veg media	66	Señalización vertical carreteras
5	Veg. alta	7/18	Ruido/Artefactos
6	Edificios	1	S/C
9	Agua	14	Cables eléctricos
12	Exceso densidad	15	Torres eléctricas
17	Puentes	67	Paneles solares
10	Vías ffcc	68	Aerogeneradores

Las métricas obtenidas mediante F1-score mostraron resultados homogéneos entre las diferentes regiones, confirmando la capacidad de generalización territorial del modelo. Los resultados permitieron comprobar la estabilidad del entrenamiento y evaluar la clasificación de los fenómenos con una mayor complejidad semántica.

Cada piloto permitió validar de forma progresiva la viabilidad inicial, la generalización territorial y la estabilidad del modelo antes de su implantación operativa.

4. RESULTADOS Y LECCIONES APRENDIDAS

El análisis comparativo de los proyectos piloto permitió identificar factores determinantes para la implantación operativa del proceso en producción.

El factor más determinante en la calidad del resultado fue el conjunto de entrenamiento: calidad del etiquetado, número de muestras y, especialmente, su diversidad territorial; influyendo directamente en la capacidad del modelo para generalizar comportamientos. Se evaluaron distintas estrategias de selección de muestras para cada zona piloto, adoptándose finalmente un enfoque similar al descrito en el dataset FRACTAL del IGN francés por ofrecer el mejor rendimiento en paisajes heterogéneos.

La variabilidad intrínseca asociada a la densidad en las nubes LiDAR, hizo necesario homogeneizar los ejemplos de entrenamiento mediante la subdivisión de las muestras en tiles con un número fijo de puntos. Este proceso permitió evitar sesgos derivados de la variabilidad geométrica de los datos durante el aprendizaje del modelo.

Asimismo, la normalización de las características resultó fundamental para el entrenamiento. Las coordenadas se ajustaron a rangos homogéneos, utilizando una normalización relativa en X e Y respecto al tamaño del tile y una normalización relativa en Z respecto a la cota mínima local, evitando dependencias de posición absoluta.

El entrenamiento se realizó de forma iterativa. En cada iteración se evaluaron las predicciones sobre el conjunto de validación mediante métricas objetivas, incorporando nuevas muestras representativas hasta alcanzar los umbrales de calidad definidos en la especificación.

Las métricas obtenidas mostraron que las clases básicas mayoritarias alcanzaban valores de F1-score superiores a 0,90. Para clases más avanzadas, la aplicación de técnicas de aumento de datos y postprocesado espacial mejoró significativamente los resultados.

Tabla 4. Métricas modelos DL Proyectos Piloto

	Modelo Dataset 1 Extremadura			Modelo Dataset 2 Aragón			Media F1
	KPConv		PT	KPConv		PT	
Suelo	90,69			99,00			
Ferrocarril	80,54	89,60	95,30	58,40	97,92	98,78	95,40
Carreteras	79,48			70,10			
Veg. Baja	33,31			75,20			
Veg. Media	85,88	73,59	91,22	95,20	95,81	96,11	89,18
Veg. Alta	91,15			99,30			
Edificios	95,85		96,05	97,90		97,62	96,86
Agua	96,09						96,09
Puentes	88,57		83,18	76,70		71,38	79,96
Vehículos	74,41		77,72	88,50		89,41	82,51
Torres eléctricas	78,01		91,14	48,70		57,58	68,86
Cables eléctricos	91,60		96,73	94,20		96,60	94,78
Paneles solares	87,45		85,83	98,60		98,70	92,64
Aerogeneradores	67,74		90,85	80,70		96,34	83,91

Los resultados mostraron estabilidad en clases mayoritarias y mejora progresiva en clases minoritarias, lo que confirma la aplicabilidad del modelo en entornos heterogéneos.

La inferencia se ejecutó en centros de supercomputación mediante GPU, con un tiempo medio aproximado de 10 minutos por km², con escalabilidad

lineal respecto al número de nodos disponibles (por ejemplo, aproximadamente diez días para procesar más de 20.000 km² con 16 máquinas).

El postprocesado mediante técnicas GIS —basadas en análisis de vecindad, estadística espacial y reglas de decisión— permitió mejorar sensiblemente la calidad final, especialmente en clases lineales y elementos singulares como carreteras, ferrocarriles, torres eléctricas y aerogeneradores. La disponibilidad de fuentes cartográficas auxiliares resultó clave para la detección de errores y control de calidad.

En conjunto, los valores obtenidos y su estabilidad entre zonas piloto demostraron que la calidad alcanzada es compatible con los estándares de producción cartográfica oficial, permitiendo sustituir la fase de edición manual exhaustiva por un proceso de validación y control de calidad.

5. IMPLANTACIÓN Y PRODUCCIÓN NACIONAL

Tras la validación en los proyectos piloto, la clasificación semántica automática se incorporó al flujo productivo oficial del PNOA - LiDAR.

La implantación de la inteligencia artificial ha permitido ampliar el número de clases respecto a coberturas anteriores, identificándose más de veinte tipos de fenómenos geográficos en el nivel de procesamiento avanzado (NPC3), con fiabilidad superior al 90 % en trece clases básicas (NPC2) y superior al 70 % en las clases minoritarias adicionales.

Tabla 5. Niveles NPC y clases y fiabilidad

Clasificación	Clases	Fiabilidad F1 (%)
NPC1. Clasificación Automática	2 – Suelo	90,0 %
	3,4,5 – Veg. b/m/a	90,0 %
	6 – Edificios	90,0 %
NPC2. Clasificación Básica	2 – Suelo	95,0 %
	3,4,5 – Veg. b/m/a	95,0 %
	6 – Edificios	95,0 %
	9 – Agua	90,0 %
	14 – Cables eléctricos	90,0 %
	15 – Torres eléctricas	90,0 %
	17 – Puentes	90,0 %
	64 - Vehículos	90,0 %
	67 – Paneles solares	90,0 %
	68 - Aerogeneradores	90,0 %
NPC3. Clasificación Avanzada	65 – Cerramientos / muros	85,0 %
	69 – Presas	85,0 %
	71 – Cubierta edificio plana	70,0 %
	72 – Cubierta edificio inclinada	70,0 %
	73 – Cubierta edificio vegetal	70,0 %
	74 – Fachada	70,0 %
	75 – Patio interior	70,0 %

Adicionalmente, se publica de forma temprana una versión preliminar automática de la nube de puntos en cinco clases (NPC1) con un nivel de fiabilidad estadística cercano al 90 %, permitiendo el acceso anticipado a la información por parte de los usuarios.

Para estos nuevos productos se han definido especificaciones técnicas que incluyen precisiones, definición de clases y procedimientos de control de calidad. La mejora de las capacidades del producto de nube de puntos clasificada permite dar respuesta a nuevas demandas de usuarios y ampliar sus aplicaciones.

Actualmente se dispone de producto NPC2 en las comunidades autónomas de Cantabria, Illes Balears, Extremadura, Aragón y Canarias, encontrándose en producción País Vasco, Galicia, La Rioja, Andalucía y Madrid. La producción se irá completando progresivamente durante los años 2026 y 2027 empleando infraestructuras de supercomputación, entre ellas el centro SCAYLE de la Junta de Castilla y León.

La automatización del proceso permite generar información clasificada de forma temprana y reduce la necesidad de edición manual exhaustiva, que pasa a centrarse en tareas de control de calidad.

La disponibilidad de resultados operativos a gran escala confirma la transición desde un proceso de clasificación manual asistida hacia un sistema de producción automatizado supervisado.

6. CONCLUSIONES

La aplicación de estas técnicas a la clasificación semántica de nubes de puntos LiDAR ha demostrado una madurez tecnológica suficiente para su implantación en una producción cartográfica oficial a escala nacional.

Los resultados obtenidos en los proyectos piloto muestran que la calidad final depende principalmente de la representatividad del conjunto de entrenamiento, del proceso iterativo de validación y de la integración de técnicas de pre y post procesado espacial, más que de la arquitectura concreta utilizada.

La implantación operativa ha permitido ampliar el número de clases disponibles, mejorando la precisión temática y permitiendo generar productos preliminares de forma temprana, manteniendo niveles de fiabilidad compatibles con los estándares de producción, reduciendo la dependencia de la edición manual exhaustiva, pasando a centrarse en tareas de control de calidad.

La implantación en curso para la totalidad del territorio nacional confirma el paso de un modelo de producción basado en clasificación manual a un modelo automatizado supervisado. Este cambio permite aumentar el nivel semántico del producto, mejorar la disponibilidad temporal de la información y optimizar los costes de producción por unidad de superficie, constituyendo una evolución estructural en la generación de información altimétrica oficial del PNOA-LiDAR.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.175

A Resolution-Preserving Area Projection Algorithm for Multi-Mission Earth Observation

Garcia-Espriu, Aina [1,2] **González-Haro, Cristina** [1] **González-Gambau, Verónica** [1] **Ruiz-Sebastian, Arnau** [1] **Olmedo, Estrella** [1] **Turiel, Antonio** [1] **Marti-Burillo, Ruben** [1]

[1] Institute of Marine Sciences (ICM), CSIC

[2] CommSensLab – UPC, Universitat Politècnica de Catalunya –BarcelonaTech

ORCID: Garcia-Espriu 0000-0001-9793-5547 González-Haro 0000-0003-4602-852X González-Gambau 0000-0002-6380-3754 Ruiz-Sebastian 0009-0002-7596-9185 Olmedo 0000-0002-3178-1554 Turiel 0000-0001-6103-224X Martí-Burillo 0009-0006-1795-8778

Correspondencia: ainagarcia@icm.csic.es cgharo@icm.csic.es vgonzalez@icm.csic.es arnauruiz@icm.csic.es olmedo@icm.csic.es turiel@icm.csic.es rubenbm@icm.csic.es

ABSTRACT

We present a fast area projection algorithm for mapping satellite measurements onto geo-graphical grids while preserving the instrument's native spatial resolution. Standard interpola-tion methods either introduce white noise (Nearest Neighbor), smooth fine-scale features (Bi-linear), or are computationally prohibitive. Our approach tessellates each measurement foot-print into equal-area sub-elements and performs a single, weighted projection onto the target grid, avoiding the error cascading caused by successive coordinate transformations. As an example, we walidate on SMOS Sea Surface Salinity over three years: area projection meth-ods achieve lower biases and standard deviations than existing operational products, and maintain the correct spectral slope down to ~0.6°—close to the instrument's 35–50 km native resolution. We also apply this approach to Sea Surface Temperature and Brightness Tempera-ture maps, as well as for downscaling in numerical and machine learning models. It offers a general-purpose, computationally efficient solution for Big Data management in Earth observa-tion.

Keywords: *Big data, geographical data representation, remote sensing*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

A Resolution-Preserving Area Projection Algorithm for Multi-Mission Earth Observation

Garcia-Espriu, Aina [1,2], González-Haro, Cristina [1], González-Gambau, Verónica [1], Ruiz-Sebastian, Arnau [1], Olmedo, Estrella [1], Turiel, Antonio [1], Marti-Burillo, Ruben [1]

[1] Institute of Marine Sciences (ICM), CSIC;

[2] CommSensLab – UPC, Universitat Politècnica de Catalunya –BarcelonaTech

0000-0001-9793-5547, ainagarcia@icm.csic.es ; 0000-0003-4602-852X, cgharo@icm.csic.es;
0000-0002-6380-3754, vgonzalez@icm.csic.es ; 0009-0002-7596-9185, arnauruiz@icm.csic.es;
0000-0002-3178-1554, olmedo@icm.csic.es ; 0000-0001-6103-224X, turiel@icm.csic.es;
0009-0006-1795-8778, rubenbm@icm.csic.es.

Abstract: We present a fast area projection algorithm for mapping satellite measurements onto geographical grids while preserving the instrument's native spatial resolution. Standard interpolation methods either introduce white noise (Nearest Neighbor), smooth fine-scale features (Bilinear), or are computationally prohibitive. Our approach tessellates each measurement footprint into equal-area sub-elements and performs a single, weighted projection onto the target grid, avoiding the error cascading caused by successive coordinate transformations. As an example, we walidate on SMOS Sea Surface Salinity over three years: area projection methods achieve lower biases and standard deviations than existing operational products, and maintain the correct spectral slope down to ~0.6°—close to the instrument's 35–50 km native resolution. We also apply this approach to Sea Surface Temperature and Brightness Temperature maps, as well as for downscaling in numerical and machine learning models. It offers a general-purpose, computationally efficient solution for Big Data management in Earth observation.

Keywords: Big data, geographical data representation, remote sensing

Un algoritmo de proyección por área con preservación de resolución para observación de la Tierra multimisión

Resumen: *En este trabajo se presenta un algoritmo rápido de proyección por área para mapear mediciones satelitales sobre mallas geográficas preservando la resolución espacial nativa del instrumento. Los métodos de interpolación estándar introducen ruido blanco (vecino más cercano), suavizan las estructuras de pequeña escala (bilineal) o resultan computacionalmente prohibitivos. En el enfoque propuesto, cada huella de medición se tesela en subelementos de igual área y se realiza una única proyección ponderada sobre la malla objetivo, evitando la propagación de errores causada por transformaciones de coordenadas sucesivas. Como ejemplo, validamos con salinidad superficial del mar (SSS) de SMOS durante tres años: los métodos de proyección por área tienen sesgos y desviaciones estándar más bajos que los productos operacionales existentes, y se mantiene la pendiente espectral correcta hasta ~0,6°, cerca de la resolución nativa del instrumento, 35–50 km. Aplicamos también el algoritmo al procesamiento de temperatura superficial del mar y temperatura de brillo, así como a la reducción de escala en modelos numéricos y de aprendizaje automático. El algoritmo es una solución de propósito general y computacionalmente eficiente para la gestión de grandes volúmenes de datos en observación de la Tierra.*

Palabras clave: *Big data, representación geográfica de datos, teledetección*

1. INTRODUCTION

Satellite dataset complexity grows with longer time series and greater instrument resolution, making efficient and accurate projection onto geographic grids a critical challenge. Converting measurements from one grid to another generates errors through successive projections, degrading the intrinsic spatial resolution, and requiring high computational cost. Standard interpolation methods have their own limitations: Nearest Neighbor is fast but noisy and spatially incoherent; Bilinear interpolation smooths fine-scale features; Optimal Interpolation and kriging are computationally expensive and over-smooth data-sparse regions. We present a novel, fast area projection algorithm that enhances spatial coherence. A first prototype was developed and tested on the SMOS Sea Surface Salinity (SSS) Level 2 processor, yielding promising results (Garcia *et al*. 2026). Here, we review those

findings and present further applications of the methodology, which may benefit a broad range of communities—from remote sensing scientists to specialists of numerical modeling and machine learning–based data assimilation.

2. DATASETS

SMOS-Based SSS Products: Three years (2014, 2017, 2018) of L3 SSS daily maps with a 9-day moving window, 0.25° regular grid. We used four projection algorithms were compared: (1) Nearest Neighbor, (2) AP-IDW (Area projection, 24-triangle tessellation with inverse distance weighting), (3) AP-Bilinear (Area projection, with inverse Bilinear distance function), and (4) Bilinear interpolation. Two publicly available products were used: BEC SMOS SSS Global L3 v2.0 (Olmedo *et al*., 2021) and CATDS SMOS SSS L3 V10 (Boutin *et al*., 2024).

In-Situ Reference: PI-MEP Argo float data, quality flags 1-2 , "surface" taken as top 10 m.

Other satellite SSS Datasets. SMAP RSS SSS L3 V6.0 product (Remote Sensing Systems, 2024) as incorrelated error source for Correlated Triple Collocation (CTC) for 2017-2018.

Other datasets: ESA SST CCI and C3S Sea Surface Temperature (DMI & Met Office, 2024), used for downscaling applications (0.05º daily products). Copernicus Sentinel-3A/3B SLSTR Level-2 Sea Surface Temperature Product (EUMETSAT, 2016) used in level 3 Mediterranean Sea product generation.

3. CONTEXT ON THE SSS PROCESSOR

The SMOS mission acquires Brightness Temperature (TB) snapshots by 2D interferometry. Measurements are defined in cosine coordinates (xi, eta) over a hexagonal field of view. BEC Debiased Non-Bayesian (DNB) retrieval (Olmedo *et al*., 2017) works as follows. First, TBs and telemetry are georeferenced. Then, SSS is retrieved by direct inversion from each TB measurement and auxiliary variables as SST and wind speed. A multi-year SSS reference is computed at each geographical and antenna point; the difference between each retrieval and this reference yields SMOS debiased SSS anomalies. An external climatology (e.g., World Ocean Atlas) is added to produce the final SSS. Level 3 products are generated by filtering, projecting to an Earth grid, and aggregating into 9-day maps, with empirical corrections for temporal drifts and latitudinal-seasonal biases (Olmedo *et al*., 2021).

To implement the area projection algorithm, we redefined all algorithms to antenna coordinates. Retrieved SSS are kept in antenna coordinates with their geolocation stored as metadata. Auxiliary data are collocated to each geolocation. More details can be found in Garcia-Espriu et. al 2026.

4. PROJECTION METHODOLOGY

Each original-grid pixel is tessellated into equal-area subelements (in the SMOS case, 24 equilateral triangles; see Fig. 1). Each sub-element's center of mass is a linear combination of neighboring pixel centers, first in the original grid , and then mapped to Earth coordinates using two approximations: (1) Earth as a perfect sphere (~0.34% maximum radius error), and (2) local flatness of each pixel footprint (~70 km, negligible curvature error). Each value is interpolated at each sub-element using a distance function (inverse distance weighting or Bilinear) between the central pixel and its neighbors. Sub-elements are then projected to the final geographic grid using standard libraries, with measurements weighted by radiometric error. The number of discretization divisions controls the precision-computation trade-off, as illustrated in Fig. 2.

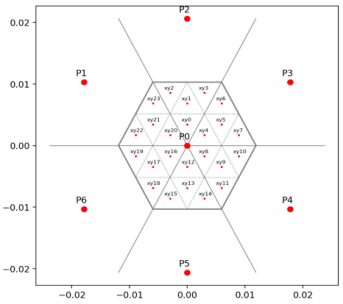


Figure 1. SMOS tesselation by 24 triangles. Adapted from Garcia-Espriu et. al 2026.

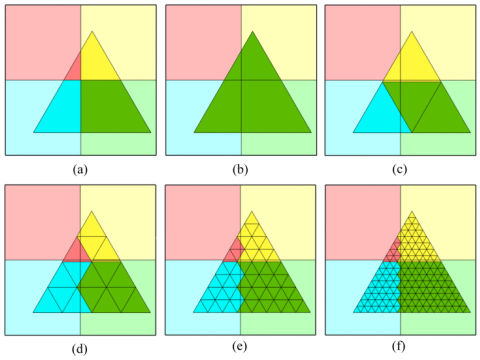


Figure 2. Impact on the tessellation trade-off. Adapted from Garcia-Espriu et. al 2026.

5. RESULTS

Different validation techniques have been applied: comparison to in-situ data, spectral validation and error analysis by CTC.

5.1. In-Situ Validation.

We performed a comparison with Argo data (3 years) to ensure that the processing chain introduces no errors or biases. Results show in all new algorithms that absolute biases are around 0.082 (smaller than BEC v2.0's 0.105) and standard deviations of ~0.20 for area projection methods, (BEC v2.0's ~0.279 and CATDS V10's are ~0.213) (Tab. 1).

Table 1. Mean and Standard Deviation of differences with respect to Argo.

Product	Avg Bias	Abs Bias	Avg STD
NN	-0.025	0.086	0.234
AP-IDW	-0.022	0.082	0.203
AP-BL	-0.024	0.082	0.201
Bilinear	-0.021	0.082	0.214
BEC	-0.011	0.105	0.279
CATDS	0.001	0.065	0.213

6. SPECTRAL VALIDATION.

We show the Power Spectral Density (PSD) (Hoareau *et al*., 2018) analysis over the region ARC, defined as [39º–45º S, 30º–94º E], but similar results were obtained when analyzing other regions. Fig. 3 shows that AP-IDW and AP-Bilinear maintain the expected spectral slope of $k^{-5/3}$ (Hoareau *et al*., 2018) down to wavelengths of ~0.6 degrees, close to the instrument's native resolution. By contrast, Nearest Neighbor flattens below 2 degrees (white noise), and BEC and CATDS products show energy loss at scales of 0.75-1.5 degrees, indicative of correlated noise artifacts. Area projection algorithms preserve fine-scale oceanographic features that other methods cannot resolve.

6.1. Error Analysis.

Correlated Triple Collocation (CTC) (González-Gambau *et al*., 2020) using SMAP as an uncorrelated reference shows that AP-IDW and AP-Bilinear exhibit the lowest error standard deviations (Fig 4.). AP-Bilinear achieves marginally lower noise but slightly reduces effective spatial resolution, suggesting a noise-resolution trade-off.

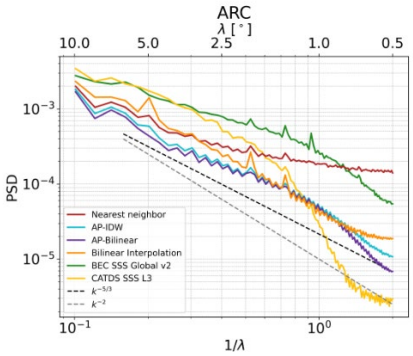


Figure 3. PSD function for three years of SSS. Adapted from Garcia-Espriu et. al 2026.

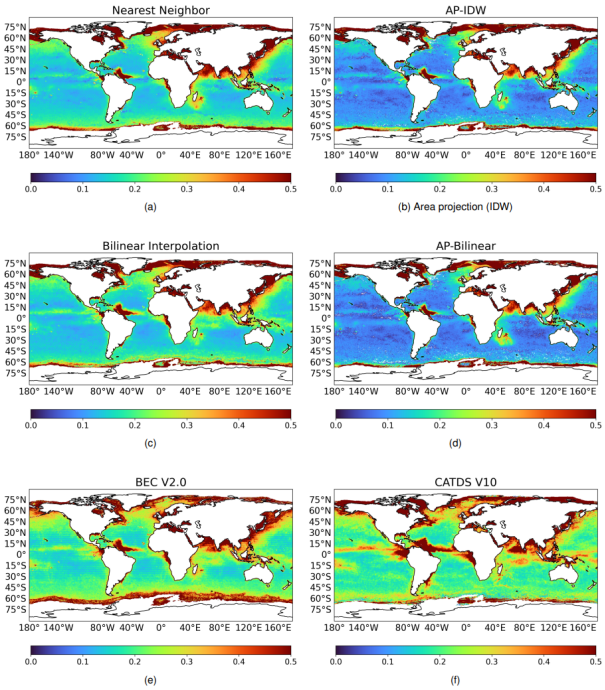


Figure 4. CTC SSS error estimation. Adapted from Garcia-Espriu et. al 2026.

7. FURTHER APPLICATIONS

The algorithm is been applied for the development of a Level 3 Mediterranean SST product based on Sentinel 3 data for ICATMAR (https://www.icatmar.cat/es/)(see Fig. 5), and also in the generation of a SMOS Brightness Temperature product.

Our algorithm can be used not only for the generation of Earth observation products, but for creating coarser-resolution fields suitable for ingestion in numerical and machine learning models. Owing to its capability to correctly representing spatial gradients, the area projection algorithm avoids having an extra loss of resolution due to smoothing.

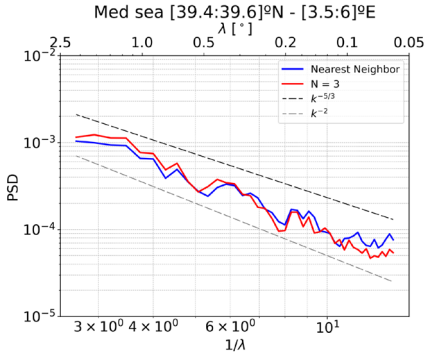


Figure 5. Combined level 3 SST product and PSD function for the region marked as 'R'.

Analysis of the PDS reveals that bilinear interpolation introduces noise at high wave-numbers, a behavior also present in the original data. In contrast, our method maintains consistent energy levels up to the target grid scale, effectively filtering out sub-grid noise, leading to a physi-

cally meaningful PSD (Fig. 6). Thanks to that, downstream models can produce more physically consistent, accurate forecasts.

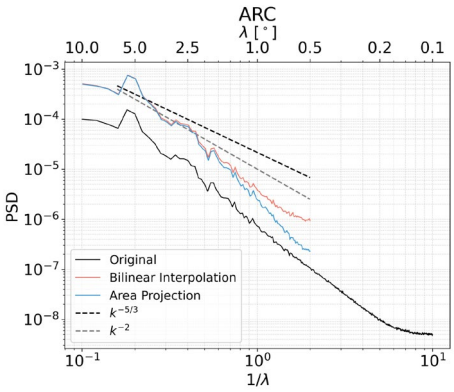


Figure 6. PSD of the original SST and two downscaled products using different projections.

8. CONCLUSIONS AND DISCUSSION

We have shown that the area projection algorithm is a robust, versatile framework that outperforms standard interpolation methods. It achieves ~0.25 degree resolution for SMOS, close to the 35-50 km native resolution, without the white noise of Nearest Neighbor or the correlated noise of existing products. AP-IDW provides the best trade-off between spatial resolution, noise level, and computational cost. The methodology is adaptable to other satellite missions and antenna geometries. Current work is focused in using this methodology for a TB processor, for the monitoring of other ECVs such as soil moisture or sea ice thickness.

Its application to the Level 3 Mediterranean SST and SMOS Brightness Temperature processors proves its versatility. When used for down-scaling, our approach outperforms bilinear interpolation by avoiding the injection of spurious high-frequency noise, making the resulting fields more suitable as inputs for numerical models and machine learning-based data assimilation schemes. Taken together, the further applications confirm that the area projection paradigm is not tied to a single mission or product type, but constitutes a general-purpose tool for Big Data management in Earth observation wherever spatial fidelity and computational efficiency must be balanced simultaneously.

9. ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been funded by the European Space Agency through the SMOS Expert Support Laboratory (ESL) for SMOS Level 1 and Level 2 (4000130567/20/I-BG) and by MCIN/-AEI/10.13039/501100011033 through the projects EO4TIP (PID2023-149659OB-C21) and INTERACT (PID2020-114623RB-C31) with the institutional support of the "Severo Ochoa Centre of Excellence" accreditation (CEX2019-000928-S). The authors gratefully acknowledge the SGAI-CSIC for its assistance while using the DRAGO Supercomputer.

10. REFERENCES

Boutin, J., Vergely, J. L., & Khvorostyanov, D. (2024). Debiased SMOS SSS L3 V10 maps generated by LOCEAN/ACRI-ST Expertise Centre [Dataset]. SEANOE. https://doi.org/10.17882/52804

DMI & Met Office. (2024). ESA SST CCI and C3S reprocessed sea surface temperature analyses, Level 4, 0.05° daily global [Dataset]. Copernicus Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.48670/moi-00169

EUMETSAT. (2016–present). Copernicus Sentinel-3 SLSTR Level-2 Water Surface Temperature (SL_2_WST) product, Collection 003 [Dataset]. EUMETSAT Data Store. https://user.eumetsat.int/catalogue/EO:EUM:DAT:SENTINEL-3:SL_2_WST___NRT

García-Espriu, A., González-Haro, C., González-Gambau, V., Ruiz-Sebastián, A., Olmedo, E., & Turiel, A. (2026). Preserving native spatial resolution in long-term satellite datasets through improved projection algorithms. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 19*, 4501–4519. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2026.3652583

González-Gambau, V., Turiel, A., González-Haro, C., Martínez, J., Olmedo, E., Oliva, R., & Martín-Neira, M. (2020). Triple collocation analysis for two error-correlated datasets. *Remote Sensing, 12(*20), Article 3381. https://doi.org/10.3390/rs12203381

Hoareau, N., Turiel, A., Portabella, M., Ballabrera-Poy, J., & Vogelzang, J. (2018). Singularity power spectra: A method to assess geophysical consistency of gridded products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56*, 5525–5536. https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2819240

Olmedo, E., González-Haro, C., Hoareau, N., Umbert, M., González-Gambau, V., Martínez, J., Gabarró, C., & Turiel, A. (2021). Nine years of SMOS sea surface salinity global maps at the Barcelona Expert Center. *Earth System Science Data, 13*(2), 857–888. https://doi.org/10.5194/essd-13-857-2021

Olmedo, E., Martínez, J., Turiel, A., Ballabrera-Poy, J., & Portabella, M. (2017). Debiased non-Bayesian retrieval: A novel approach to SMOS sea surface salinity. *Remote Sensing of Environment, 193*, 103–126. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.023

Remote Sensing Systems. (2024). RSS SMAP Level 3 sea surface salinity standard mapped image 8-day running mean V6.0 [Dataset]. NASA PO.DAAC. https://doi.org/10.5067/SMP60-3SPCS

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.259

Clasificación de usos de suelo en las Illes Balears a partir de datos en abierto mediante UNet

Bravo Núñez, Andrés [1,2] **González, Isabel** [1] **Martín-Alcón, Santiago** [1] **Crespo-Peremarch, Pablo** [2] **Ruiz, Luis Ángel** [2]

[1] Agresta COOP, España

[2] Universitat Politècnica de València

ORCID: Bravo Núñez 0009-0003-6650-3487 González 0009-0002-1455-9174 Martín-Alcón 0000-0002-5327-5695 Crespo-Peremarch 0000-0003-2241-4493 Ruiz 0000-0003-0073-7259

Correspondencia: abravo@agresta.org igonzalez@agresta.org smalcon@agresta.org pabcrepe@cgf.upv.es laruiz@cgf.upv.es

RESUMEN

La clasificación de usos del suelo es fundamental para la gestión de territorio y puede abordarse mediante técnicas de aprendizaje profundo. Sin embargo, estos métodos suelen requerir grandes volúmenes de datos de entrenamiento. En este trabajo se presenta un flujo de trabajo para la clasificación de usos del suelo en las Illes Balears utilizando datos en abierto y una arquitectura UNet. Se integran imágenes multiespectrales Sentinel-2 con métricas derivadas de datos LiDAR del PNOA, y se armonizan distintas fuentes cartográficas abiertas (SIGPAC, Mapa Forestal Español y Mapa Topográfico Nacional) para generar las muestras de entrenamiento. Se consideran siete clases de uso del suelo: artificial, cultivos leñosos, cultivos herbáceos, pastizal, matorral, coníferas y frondosas. La evaluación sobre un conjunto independiente de validación alcanza una precisión global del 84,2% y un índice Kappa de Cohen de 0,785, con mejores resultados en las clases artificial y coníferas. Los resultados demuestran el potencial de los datos abiertos para la generación de cartografía de usos del suelo fiable a escala regional.

Palabras clave: *Datos abiertos, UNet, Segmentación semántica, LIDAR, Sentinel2*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Clasificación de usos de suelo en las Illes Balears a partir de datos en abierto mediante UNet

Bravo Núñez, Andrés [(1)], González, Isabel [(1)], Martín-Alcón, Santiago [(1)], Crespo-Peremarch, Pablo [(2)], Ruiz, Luis Ángel [(2)]

[(1)] Agresta COOP, España, Universitat Politècnica de València.

0009-0003-6650-3487, abravo@agresta.org ; 0009-0002-1455-9174, igonzalez@agresta.org

0000-0002-5327-5695, smalcon@agresta.org

[(2)] Universitat Politècnica de València.

0000-0003-2241-4493, pabcrepe@cgf.upv.es ; 0000-0003-0073-7259, laruiz@cgf.upv.es

Resumen: La clasificación de usos del suelo es fundamental para la gestión de territorio y puede abordarse mediante técnicas de aprendizaje profundo. Sin embargo, estos métodos suelen requerir grandes volúmenes de datos de entrenamiento. En este trabajo se presenta un flujo de trabajo para la clasificación de usos del suelo en las *Illes Balears* utilizando datos en abierto y una arquitectura UNet. Se integran imágenes multiespectrales Sentinel-2 con métricas derivadas de datos LiDAR del PNOA, y se armonizan distintas fuentes cartográficas abiertas (SIGPAC, Mapa Forestal Español y Mapa Topográfico Nacional) para generar las muestras de entrenamiento. Se consideran siete clases de uso del suelo: artificial, cultivos leñosos, cultivos herbáceos, pastizal, matorral, coníferas y frondosas. La evaluación sobre un conjunto independiente de validación alcanza una precisión global del 84,2% y un índice Kappa de Cohen de 0,785, con mejores resultados en las clases artificial y coníferas. Los resultados demuestran el potencial de los datos abiertos para la generación de cartografía de usos del suelo fiable a escala regional.

Palabras clave: Datos abiertos, UNet, Segmentación semántica, LIDAR, Sentinel2

Classification of land use in the Balearic Islands based on open data using UNet

***Abstract**: Land use classification is a key task for territorial management and can be effectively addressed using deep learning techniques, although these approaches usually require large training datasets. This study presents a workflow for land use classification in the Balearic Islands based on open data and a UNet architecture. Multispectral Sentinel-2 imagery is combined with metrics derived from PNOA LiDAR data, while several open cartographic sources (SIGPAC, Spanish Forest Map and National Topographic Map) are harmonized to generate training samples. Seven land use classes are considered: artificial surfaces, woody crops, herbaceous crops, grassland, shrubland, coniferous forest and broadleaf forest. Validation on an independent dataset yields an overall accuracy of 84.2% and a Cohen's Kappa index of 0.785, with particularly strong performance for artificial and coniferous classes. These results highlight the potential of open data for reliable regional-scale land use mapping.*

***Keywords**: Open data, UNet, Semantic segmentation, LIDAR, Sentinel2*

1. INTRODUCCIÓN

La monitorización precisa de los usos y coberturas del suelo es fundamental para la gestión del territorio. El conocimiento de cómo se distribuyen los usos del suelo resulta esencial en ámbitos como la planificación urbanística, la gestión de los recursos naturales o la evaluación del impacto del cambio climático. A pesar de su importancia, la actualización de esta información sigue representando un desafío técnico y económico. Esta brecha entre la demanda de información y la capacidad de producción ha favorecido la adopción de técnicas basadas en el aprendizaje profundo (*Deep Learning*) para la segmentación semántica capaces de generar cartografía de manera casi automática.

Sin embargo, estos métodos necesitan grandes cantidades de datos de entrenamiento y la obtención de estos es costosa tanto en trabajo como económicamente. Para mitigar esta problemática existen diferentes estrategias. Una de ellas conocida como *active learning* busca reducir el esfuerzo de anotación seleccionando de forma iterativa un conjunto estratégico de muestras para ser anotadas por un experto (Chen, 2020). Otras estrategias habituales son la creación de nuevas muestras a partir de las disponibles (*data augmentation*) y la utilización de muestras que no están

completamente etiquetadas conocido como *weakly supervised learning* (Liang, 2020).

En este contexto, este trabajo propone un flujo de trabajo para la clasificación de usos de suelo, integrando datos espectrales de Sentinel-2 con información derivada de nubes de puntos LiDAR del PNOA (Instituto Geográfico Nacional) y el uso de técnicas de aprendizaje profundo. La metodología se centra en la armonización de fuentes cartográficas abiertas existentes con el objetivo de obtener un conjunto de etiquetas robusto que permita entrenar un modelo capaz de generalizar la clasificación en toda la zona de estudio, y se evalúan los resultados obtenidos para un conjunto de datos de las *Illes Balears*.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a las *Illes Balears* con una superficie de 5040 km^2. Las *Illes Balears* son un archipiélago de islas mediterráneas cuyas principales islas son Mallorca, Menorca, Formentera e Ibiza. A nivel de isla, Menorca posee una cubierta de bosques y de pastos para ganado en explotación extensiva. Formentera es semidesértica con vegetación dispersa dominada por arbustos, sabinas (*Juniperus phoenica*) y pino carrasco (*Pinus halepensis*); y Mallorca e Ibiza tienen un paisaje similar dominado por tierras agrícolas y bosques de pino carrasco, aunque como particularidad, Mallorca contiene, la sierra de Tramontana. Además, en las últimas décadas las *Illes Balears* han tenido un gran desarrollo turístico. Todo esto causa que sea una región con gran diversidad paisajística lo que se traduce en un mayor desafío a la hora de realizar una clasificación de usos de suelo. Por otra parte, otra ventaja de tomar como zona de estudio las *Illes Balears es* que es una de las regiones que dispone de datos de la tercera cobertura LiDAR-PNOA que es la más actual (2024).

2.2. Fuentes de datos

Se utilizaron datos procedentes de fuentes abiertas, tanto para la construcción de las variables de entrada del modelo como para la generación de las muestras de entrenamiento.

Como datos de entrada se utilizaron datos LiDAR y Sentinel-2. Las imágenes Sentinel-2 corresponden a cuatro compuestos estacionales para el año 2024. Para su construcción se seleccionaron imágenes de 2024 con un porcentaje de nubes inferior al 30% y nivel de procesado L2A. Además, se enmascararon los píxeles cuya probabilidad de nube superaba el 30%. Los compuestos estacionales se construyeron calculando el valor mediano por píxel utilizando todas las imágenes. Se trabajó con 10 bandas (B, G, R, RE1, RE2, RE3, NIR, NNIR, SWIR1 y SWIR2) y un tamaño de píxel de 10 m. Los datos LiDAR provienen de la tercera cobertura del PNOA, corresponden al año 2024 en las *Illes Balears* y tienen una densidad nominal de 5 puntos m^2. Estos datos se rasterizaron en R utilizando la función *gridmetrics* del paquete *lidR* (Roussel, 2021; Auty, 2023), generando un ráster de 53 métricas LiDAR alineado con la cuadrícula de píxeles de 10 m de Sentinel-2.

Para la construcción de las muestras de entrenamiento se utilizaron el Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC) del año 2025 (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, s.f.), el Mapa Forestal Español (MFE) a escala 1:25000 (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, s.f.) y el Mapa Topográfico Nacional (MTN) 1:25000 (Ministerio de transportes y movilidad sostenible, s.f.). Además, como apoyo al proceso se utilizó la ortoimagen PNOA de máxima actualidad (2024).

2.3. Metodología

2.3.1. Construcción de las muestras de entrenamiento, prueba y validación

Para la generación de las muestras de entrenamiento (definidas como polígonos), se han armonizado el SIGPAC, el MFE y el MTN. Se han considerado siete clases en la clasificación: artificial, cultivo leñoso, cultivo herbáceo, pastizal, matorral, coníferas y frondosas. Habitualmente estas clasificaciones contienen una clase Agua, en nuestro caso se eliminó para simplificar el modelo, considerando la superposición de la clase agua a partir del mapa topográfico para obtener buenos resultados.

A partir de las clases del SIGPAC y el MFE, se realizó un reagrupamiento de clases para que coincidieran con las siete mencionadas. En los casos donde ninguna clase correspondía con las planteadas, se descartó el polígono. Únicamente se conservaron los polígonos con un área mínima de 1000 m2. Únicamente se conservaron como polígonos aquellas zonas en las que la clase indicada por el SIGPCA y el MFE coincidía,

Para intentar reducir la heterogeneidad en los polígonos, es decir, minimizar los casos en que el interior de un polígono contuviese más de una clase, se calculó el rango intercuartílico (IQR) del NDVI para cada combinación de cada polígono con cada uno de los cuatro compuestos estacionales. Para cada estación y clase de uso de suelo se eliminó el 20% de polígonos con mayor IQR. Este cálculo se realizó ignorando los píxeles correspondientes a agua y zonas edificadas (cuando el polígono no pertenecía a la clase artificial). Estos píxeles se detectaron con dos máscaras ráster una de agua y otra de zonas edificadas generadas con el Mapa Topográfico Nacional.

Los polígonos finales se dividieron en tres conjuntos: uno de entrenamiento, otro de prueba y un último de validación. Los conjuntos se construyeron mediante muestreo aleatorio estratificado por clase, de forma que representaran el 70%, el 10% y el 20% de la superficie total de cada clase en cada conjunto, respectivamente. La distribución del número y la superficie de los polígonos en las diferentes clases se muestra en la Tabla 1 donde se puede apreciar que las clases están desequilibradas. Concretamente, las clases de cultivo y coníferas tienen un orden de magnitud mayor, tanto en número como en superficie, con respecto al resto de clases.

A partir de la selección de polígonos de entrenamiento, las imágenes Sentinel-2 y el ráster LiDAR se generaron

chips de 128 × 128 píxeles con un solape del 50%, cubriendo toda la superficie de las islas. Las máscaras se limpiaron utilizando las máscaras creadas con el Mapa Topográfico Nacional, de modo que los píxeles de agua se marcaron como sin información y los píxeles artificiales se excluyeron de las clases no artificiales. Solo se conservaron aquellos chips que contenían algún polígono de entrenamiento. Esto dio la cantidad de 11560 chips. Para los polígonos de prueba y validación se realizó el mismo proceso, pero sin solape, obteniendo 2447 y 2694 chips, respectivamente.

Tabla 1. Distribución de los polígonos en los conjuntos de entrenamiento, prueba y validación y en las clases

Clase		Ent.	Prueba	Validación
Artificial	Nº	3951	638	864
	Área(ha)	4078	581	1164
C. leñoso	Nº	31014	4380	8890
	Área(ha)	21588	3084	6167
C. herbáceo	Nº	55990	7703	16389
	Área(ha)	39345	5620	11239
Pastizal	Nº	1227	200	324
	Área(ha)	1807	258	516
Matorral	Nº	1517	236	468
	Área(ha)	4646	514	1272
Coníferas	Nº	10824	1647	3085
	Área(ha)	17596	2498	5021
Frondosas	Nº	2232	240	688
	Área(ha)	6254	852	1775

2.3.2. Arquitectura del modelo y entrenamiento

Utilizando los datos descritos en el apartado anterior, se entrenó una red UNet desde su comienzo. Esta arquitectura de red convolucional ha demostrado ser efectiva en tareas de clasificación semántica con datos de satélite (Kotaridis, 2022; Solórzano, 2021). Se utilizó la entropía cruzada pesada como función de pérdida para el entrenamiento de la red. Para los píxeles sin clase se hizo que el peso entropía cruzada valiera 0 lo que fuerza al modelo a no tener en cuenta las regiones sin clase durante el entrenamiento. Para las siete clases se utilizó un peso proporcional a la raíz de la inversa de la proporción del área total representada por esa clase en los datos de entrenamiento. Es decir, se penalizó más a la red por los fallos en las clases de las que tenemos menos área en los datos de entrenamiento.

Todas las bandas y métricas fueron estandarizadas restando su media y dividiendo por su desviación típica. Se aumentaron los datos aplicando simetrías verticales y horizontales y rotaciones de 90, 180 y 270 grados de manera aleatoria a los datos. El modelo fue entrenado durante 200 épocas en lotes de 64 unidades y con una tasa de aprendizaje de 0.0001.

2.3.3. Evaluación del modelo

Se utilizo el conjunto de datos de validación, el cual no fue utilizado durante el entrenamiento. Se utilizaron las predicciones del modelo sobre estas zonas para construir una matriz de confusión normalizada. Además, para cada clase se calculó la fiabilidad de productor y usuario. Debido al desequilibrio entre clases, la precisión global puede ser engañosa. Por ello, se calculó el índice Kappa de Cohen, un índice que mide la precisión global del clasificador, pero descontando los aciertos que podrían darse por puro azar. Un valor de Kappa alto nos indica que el buen comportamiento del modelo no se debe a una predicción sistemática de las clases mayoritarias.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvo una precisión del 84,2% sobre los píxeles pertenecientes a los polígonos reservados para la validación. Una descripción más detallada de los resultados, junto con la matriz de confusión puede verse en la Tabla 2 y la Figura 1. De entre todas las clases, la clase artificial y coníferas se clasifican especialmente bien con precisiones superiores al 90%. Las clases de cultivo tienen cierta confusión entre ellas, en torno al 15% de las observaciones de cada cultivo son confundidas con el otro tipo de cultivo. La clase frondosas, matorral y pastizal también tienen confusión entre sí, pero en menor medida. En general la confusión entre clases se sucede entre clases similares. La confusión entre tipos de cultivo puede deberse a la propia incertidumbre que existe en el SIGPAC, cuya base de datos se ha utilizado tanto en el entrenamiento como en la evaluación. La confusión entre matorral y pastizal también es habitual, siendo difícil distinguir entre ambas clases en entornos mediterráneos. Quizás sorprende la cantidad de polígonos de frondosas que se predicen como matorral. Esto puede deberse a que un monte bajo de frondosas puede parecerse estructuralmente a un matorral. La Kappa de Cohen obtenida (0.785) muestra que los resultados no se deben a la sobrepredicción de las clases mayoritarias.

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que es posible construir un modelo de clases de usos del suelo con una fiabilidad razonable únicamente a partir de datos abiertos, si bien es cierto que el modelo no ha sido validado a partir de datos de campo o manualmente etiquetados. Consideramos que, aunque las fuentes originales de etiquetado (MFE y SIGPAC) no son totalmente fiables para la validación, el resultado obtenido demuestra su utilidad para incrementar o mejorar conjuntos de datos de entrenamiento para uso en modelos de aprendizaje profundo. En el futuro se prevé utilizar conjuntos de validación más fiables ya sean procedentes de campo u obtenidos mediante fotointerpretación.

Una limitación del estudio es la ausencia de comparativa con otros métodos convencionales como pueden ser *random forest* o *support vector machines*. Estudios previos muestran que por la capacidad de las redes neuronales convolucionales para extraer patrones espaciales estas suelen ofrecer resultados superiores a otras aproximaciones en tareas de segmentación semántica (Boston, 2022). Aun así, en el futuro planeamos realizar una comparativa con otras

aproximaciones para determinar si en nuestro caso concreto esto se cumple.

Una última debilidad de la aproximación es que habitualmente hay grupos contiguos de polígonos. Esto provoca que pueda haber información de los polígonos de entrenamiento en los de prueba y validación debido a la autocorrelación espacial. Como solución tentativa a este problema se plantea agrupar polígonos cercanos de tal manera que estos grupos acaben de manera completa en los conjuntos de entrenamiento, test o validación.

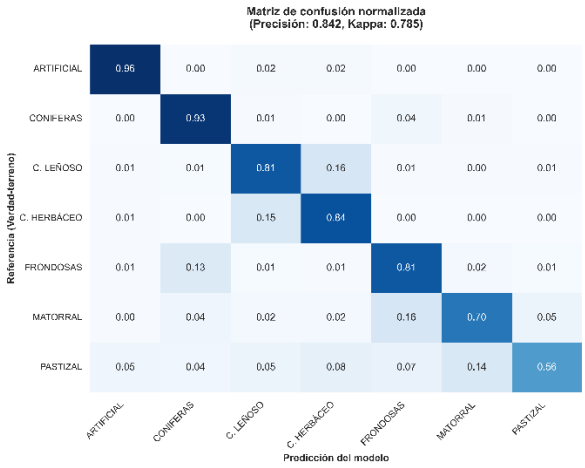


Figura 1. Matriz de confusión normalizada, precisión total (84,2%) y Kappa de Cohen (0.785)

Tabla 2. Comparación de la fiabilidad del productor y del usuario

Clase	Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Artificial	0.958	0.881
C. leñoso	0.811	0.738
C. herbáceo	0.837	0.896
Pastizal	0.561	0.591
Matorral	0.698	0.794
Coníferas	0.932	0.921
Frondosas	0.812	0.755

5. AGRADECIMIENTOS

El trabajo que se recoge en esta publicación es parte de las ayudas DIN2024-013484 y PID2024-158591OB-100, financiadas por el MICUI/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

Se agradece a la Subdirección General Cartografía y Observación del Territorio, Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible el acceso temprano a la tercera cobertura del PNOA.

6. REFERENCIAS

Auty, J.-R. R. (2023). Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications. https://cran.r-project.org/package=lidR

Boston, T. a. (2022). Comparing CNNs and Random Forests for Landsat Image Segmentation Trained on a Large Proxy Land Cover Dataset. *Remote Sensing, 14*(14). https://doi.org/10.3390/rs14143396

Chen, W. a. (2020). Accelerating the Training of Convolutional Neural Networks for Image Segmentation with Deep Active Learning. IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (págs. 1-7). IEEE .

Instituto Geográfico Nacional. (s.f.). Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Recuperado el 9 de 2 de 2026, de https://pnoa.ign.es/

Kotaridis, I. &. (2022). Semantic segmentation using a UNet architecture on Sentinel-2 data. The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences(43)*, 119-126.

Liang, B. L. (2020). Weakly Supervised Semantic Segmentation Based on Deep Learning. Proceedings of the 11th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC2019).

Ministerio de Agricultura, P. y. (s.f.). Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC). Fondo Español de Garantía Agraria (FEGA). https://www.fega.gob.es/es/banner/sigpac

Ministerio de transportes y movilidad sostenible. (s.f.). Mapa topográfico nacional 1:25000. https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/mapa-topografico-nacional

Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (s.f.). Mapa Forestal de España a escala 1:25.000 (MFE25). https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/mapa-forestal-espana/mfe_25.html

Roussel, J. A. (Agosto de 2021). lidR : An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment, 251*(112061). https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061

Solórzano, J. V.-C. (2021). Land use land cover classification with U-net: Advantages of combining sentinel-1 and sentinel-2 imagery. *Remote Sensing(13(18))*, 3600.

Ye, R. L. (2025). Strategic sampling for training a semantic segmentation model in operational mapping: Case studies on cropland parcel extraction. *Remote Sensing of Environment, 331*, 115034.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.271

Procesamiento de datos Sentinel-2 en entornos de Big Data: evaluación de Google Earth Engine frente a procesamiento local para la generación de índices de vegetación aplicados a predicción de incendios

Jiménez Romanillos, José [1] **Martínez García, Francisco Manuel** [2] **García Ramajo, Jorge Juan** [2] **Quirós, Elia** [2]

[1] Junta de Extremadura, España

[2] Universidad de Extremadura

ORCID: Jiménez Romanillos 0009-0009-0612-4390 Martínez García 0000-0002-0862-9933 García Ramajo 0009-0000-7296-3082 Quirós 0000-0002-8429-045X

Correspondencia: jose.jimenez@juntaex.es fmmgarcia@unex.es jjgarciar@unex.es equiros@unex.es

RESUMEN

La disponibilidad masiva de imágenes Sentinel-2 ha impulsado el uso de entornos Big Data para aplicaciones ambientales, planteando la necesidad de evaluar su eficiencia y coherencia metodológica. Este trabajo compara la generación de series temporales de índices de vegetación mediante Google Earth Engine (GEE) y procesamiento local. Se utilizaron imágenes Sentinel-2 L2A entre el 29 de marzo y el 13 de septiembre de 2019, implementando un flujo de trabajo equivalente que incluyó filtrado espacial y temporal, enmascarado de nubes, cálculo de índices espectrales y composición temporal. La comparación se realizó mediante métricas de rendimiento computacional, almacenamiento, automatización y consistencia radiométrica. Los resultados muestran diferencias relevantes en eficiencia y escalabilidad, con mejor rendimiento de GEE en términos de automatización y procesamiento distribuido. Las discrepancias radiométricas fueron reducidas y no afectan de forma significativa la consistencia de los índices.

Palabras clave: *Sentinel-2, Google Earth Engine, incendios forestales, Big Data*

Fecha de recepción: 19 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Procesamiento de datos Sentinel-2 en entornos de Big Data: evaluación de Google Earth Engine frente a procesamiento local para la generación de índices de vegetación aplicados a predicción de incendios

José Jiménez-Romanillos [(1)], Francisco Manuel Martínez García [(2)], Jorge Juan García-Ramajo [(2)], Elia Quirós [(2)]

[(1)] Junta de Extremadura.

0009-0009-0612-4390, jose.jimenez@juntaex.es

[(2)] Universidad de Extremadura.

0000-0002-0862-9933, fmmgarcia@unex.es ; 0009-0000-7296-3082, jjgarciar@unex.es

0000-0002-8429-045X, equiros@unex.es

Resumen: La disponibilidad masiva de imágenes Sentinel-2 ha impulsado el uso de entornos Big Data para aplicaciones ambientales, planteando la necesidad de evaluar su eficiencia y coherencia metodológica. Este trabajo compara la generación de series temporales de índices de vegetación mediante *Google Earth Engine* (GEE) y procesamiento local. Se utilizaron imágenes Sentinel-2 L2A entre el 29 de marzo y el 13 de septiembre de 2019, implementando un flujo de trabajo equivalente que incluyó filtrado espacial y temporal, enmascarado de nubes, cálculo de índices espectrales y composición temporal. La comparación se realizó mediante métricas de rendimiento computacional, almacenamiento, automatización y consistencia radiométrica. Los resultados muestran diferencias relevantes en eficiencia y escalabilidad, con mejor rendimiento de GEE en términos de automatización y procesamiento distribuido. Las discrepancias radiométricas fueron reducidas y no afectan de forma significativa la consistencia de los índices.

Palabras clave: Sentinel-2, Google Earth Engine, incendios forestales, Big Data

Sentinel-2 Data Processing in Big Data Environments: Evaluation of Google Earth Engine versus local processing for Vegetation Index Generation Applied to Wildfire Prediction

***Abstract**: The large availability of Sentinel-2 imagery has promoted the use of Big Data environments for environmental applications, requiring evaluation of their efficiency and methodological consistency. This study compares the generation of vegetation index time series using Google Earth Engine (GEE) and local processing. It focuses on Sentinel-2 L2A imagery acquired between March 29 and September 13, 2019, implementing an equivalent workflow that included spatial and temporal filtering, cloud masking, computation of spectral indices, and temporal compositing. The assessment considered computational performance, storage requirements, automation level, and radiometric consistency. Results indicate notable differences in efficiency and scalability, with GEE showing superior automation and distributed processing capabilities. Radiometric discrepancies among platforms were minimal and did not significantly affect radiometric consistency.*

***Keywords**: Sentinel-2, Google Earth Engine, wildfire modeling, Big Data*

1. INTRODUCCIÓN

El incremento exponencial de datos procedentes de los programas de observación de la tierra ha consolidado el paradigma *Big Data* en el ámbito de la teledetección. La misión Sentinel-2, con imágenes multiespectrales de hasta 10 m de resolución espacial, 13 bandas y una frecuencia de revisita de cinco días en condiciones nominales, genera volúmenes masivos de información (Berra *et al*., 2024; Drusch *et al*., 2012). Esta disponibilidad masiva de datos plantea nuevos retos técnicos y metodológicos, especialmente en lo que respecta a la capacidad de almacenamiento, la escalabilidad del procesamiento y la eficiencia computacional.

En este contexto han cobrado protagonismo las plataformas en la nube basadas en el enfoque *compute-*

to-data, donde el procesamiento se realiza junto al dato, evitando su descarga masiva (Berra *et al*., 2024). Entre ellas destacan *Google Earth Engine* (GEE) y *EO Browser*, que permiten trabajar directamente sobre colecciones completas de imágenes. En particular, GEE ofrece un entorno de programación basado en *JavaScript* o *Python* con capacidad de procesamiento distribuido a escala planetaria (Gorelick *et al*., 2017; Saad El Imanni *et al*., 2022).

Sin embargo, el procesamiento local continúa siendo una alternativa relevante, especialmente en entornos donde se requiere control completo sobre el flujo de trabajo, reproducibilidad estricta o integración directa con pipelines de análisis avanzados (Yang *et al*., 2024). El enfoque tradicional *data-to-compute* implica la descarga de las escenas, su almacenamiento local y el procesamiento mediante herramientas como GDAL, SNAP o librerías científicas en *Python*, lo que puede suponer elevados costes de almacenamiento y tiempos de procesamiento cuando se manejan series temporales extensas.

La generación de índices espectrales derivados, principalmente índices de vegetación y humedad, constituye un paso crítico en los estudios ambientales. Su cálculo a gran escala exige recursos computacionales significativos y, al mismo tiempo, una elevada consistencia radiométrica y reproducibilidad (Saad El Imanni *et al*., 2022), ya que de ello depende la fiabilidad de análisis posteriores en ámbitos como la gestión ambiental o la planificación territorial.

A pesar de la creciente adopción de plataformas *cloud*, existe aún una limitada evaluación comparativa entre entornos de procesamiento en términos de rendimiento computacional, volumen de almacenamiento requerido, reproducibilidad y consistencia radiométrica de los productos generados. El objetivo de este trabajo es evaluar comparativamente dos enfoques de procesamiento (GEE y procesamiento local) para la generación de series temporales de índices de vegetación derivados de Sentinel-2. A través del análisis de métricas de rendimiento, eficiencia de almacenamiento, automatización, reproducibilidad y coherencia numérica de los índices generados.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y datos

El estudio se centró en la descarga y análisis de imágenes Sentinel-2 L2A correspondientes a la tesela 29TPH (Figura 1) ubicada al noroeste de la Península Ibérica (Lugo), para el periodo comprendido entre el 29 de marzo y el 13 de septiembre de 2019 donde ocurrieron tres incendios con una superficie superior a 100 ha. La resolución final de análisis fue de 10 m tras el remuestreo de todas las bandas.

2.2. Índices de vegetación

Se calcularon los siguientes índices de vigor y actividad fotosintética, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada); GNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde); SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo); MSAVI2 (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado 2) y el índice NDI45 (Índice de Diferencia Normalizada 4-5), así como indicadores de humedad del combustible (NDMI (Índice de Humedad de Diferencia Normalizada); MSI (Índice de Estrés Hídrico). Además, se incorporaron variables estructurales biofísicas como el CI (Índice de Clorofila) y BI (Índice de brillo). Todos estos índices espectrales están ampliamente contrastados en el desarrollo de trabajos técnicos y científicos en teledetección, lo que respalda su idoneidad para el análisis.

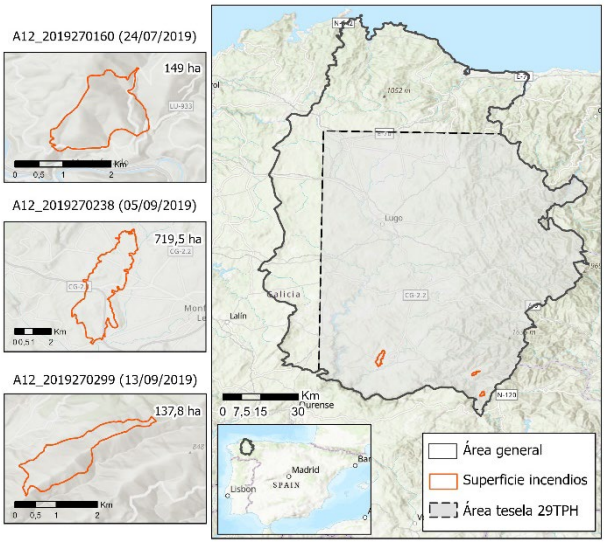


Figura 1. Área de estudio que recoge los incendios estudiados.

2.3. Flujo de procesamiento

Se diseñó un flujo de trabajo equivalente en ambas plataformas:

- Filtrado espacial y temporal. Se seleccionaron las fechas a descargar indicando el inicio y el final, y las coordenadas en formato EPSG:4326.
- Enmascarado de nubes. Se seleccionaron las imágenes con menos de un 20% de nubes, y dentro de estas imágenes se descartaron los píxeles que sean nieve, nubes y *thin cirrus*, de acuerdo con la *Scene Classification Layer* (SCL) de Sentinel-2 L2A.
- Remuestreo de imágenes. Se realizó un remuestreo con el objetivo de mantener una resolución de 10 m.
- Cálculo de índices. A partir de las bandas de cada imagen, se calcularon todos los índices deseados.
- Composición temporal. Para cada índice se generó una serie temporal de tres meses anteriores a la fecha del incendio, a partir de la cual se calcularon valores medios agregados para intervalos de 7, 14 y 30 días.

2.4. Características del procesamiento local

Para el procesamiento local se utilizaron 13 imágenes Sentinel-2 L2A correspondientes a la tesela de estudio, previamente filtradas para excluir aquellas con un porcentaje de nubes superior al 20%. Estas se

procesaron en un equipo con CPU Intel Xeon Gold 5218 @ 2.30 GHz y 128 GB de RAM a 2666 MHz, con almacenamiento distribuido en tres discos de 444 GB, 3.63 TB y 3.63 TB. El procesamiento se realizó mediante el uso de las librerías de *Python* geopandas, pandas, rasterio, xarray, rioxarray y esa_snappy, configurando las operaciones para mantener una resolución de 10 m y asegurar equivalencia con el flujo de trabajo implementado en GEE.

2.5. Métricas de evaluación

La comparación entre plataformas se realizó considerando cuatro dimensiones principales: rendimiento computacional, eficiencia de almacenamiento, consistencia radiométrica y operatividad del flujo de trabajo.

2.5.1. Rendimiento computacional

Se registró el tiempo total de procesamiento (*end-to-end*) desde la ejecución inicial hasta la obtención del producto final (raster o tabla de variables). Cuando fue posible, se desglosó por etapas: filtrado de colección, enmascarado de nubes, cálculo de índices, composición temporal y exportación.

Para permitir la comparación entre plataformas y escenarios con diferente tamaño de área o número de fechas, se definió un tiempo normalizado (Eq. 1):

$$T_{norm} = \frac{T_{total}}{(Área/100) \cdot (Fechas/100) \cdot Índices} \quad (1)$$

donde Área se expresa en km² y Fechas corresponde al número de composiciones temporales generadas. Esta métrica permite comparar eficiencia relativa independientemente de la escala del experimento.

2.5.2. Eficiencia de almacenamiento y transferencia

Se cuantificó el tamaño total de los productos generados (GB), diferenciando entre datos intermedios y salida final. En el caso del procesamiento local, se consideró además el volumen total descargado de escenas Sentinel-2. Se evaluó la eficiencia de almacenamiento en términos de tamaño por fecha y por km² procesado.

2.5.3. Consistencia radiométrica

Para evaluar la coherencia numérica entre plataformas, se compararon los valores de los índices calculados sobre las mismas fechas y áreas, tomando como referencia los índices de procesamiento local. Se emplearon métricas de error estándar:

- Error cuadrático medio (RMSE)
- Sesgo medio (bias)
- Coeficiente de correlación de Pearson (r)

Las comparaciones se realizaron a partir de estadísticas agregadas del área de estudio, garantizando la equivalencia espacial y temporal entre ambos enfoques. Asimismo, el análisis incluyó una evaluación a nivel de píxel, comparando para cada fecha los valores correspondientes a las mismas ubicaciones espaciales en ambas plataformas.

2.5.4. Operatividad y reproducibilidad

Se evaluaron cualitativamente aspectos relacionados con:

- Posibilidad de reproducir exactamente el proceso mediante scripting.
- Limitaciones operativas (cuotas, tamaño máximo de exportación, concurrencia).

Estas dimensiones permiten valorar no solo la eficiencia técnica, sino también la idoneidad de cada entorno para flujos de trabajo *Big Data* orientados a modelado predictivo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Rendimiento computacional

El tiempo total de procesamiento fue de 21 min en GEE y 76 min en local; en este último caso, 54 min correspondieron al procesamiento (cálculo de índices, reproyección, composición y exportación) y 22 min a la descarga y preparación de las imágenes (Tabla 1). El tiempo normalizado (Eq. 1) mostró una mayor eficiencia relativa en GEE, con una reducción del 72.4% respecto al procesamiento local. Cabe señalar que estos resultados se obtuvieron bajo una licencia no comercial. En entornos de producción, con cuotas de procesamiento comercial, la mayor capacidad de paralelización permitiría reducir los tiempos de ejecución y exportación.

Tabla 1. Comparación de rendimiento computacional.

Plataforma	Tiempo (min)	Tiempo relativo	Tamaño salida (MB)	Espacio ocupado (GB)
GEE	21	2.6602	27.7	0
Local	76	9.6274	29.9	68.6

3.2. Almacenamiento y transferencia de datos

El volumen total generado como salida final, es decir, los CSV finales, fue de 27.7 MB (GEE) y 29.9 MB (local). En el caso del procesamiento local, el volumen total descargado de escenas Sentinel-2 junto a su procesamiento ascendió a 68.6 GB, lo que incrementó significativamente las necesidades de almacenamiento. La descarga previa consistió en un total de 10.3 GB, mientras que las imágenes procesadas ocuparon un total de 58.3 GB.

Las diferencias observadas se relacionan con:

- Nivel de la máscara a la hora de descartar nubes, nieve y *thin cirrus*.
- Enmascarado de imágenes a partir de porcentaje de nubes.
- Nivel de compresión aplicado.
- Generación o no de productos intermedios.

Desde una perspectiva Big Data, el enfoque *compute-to-data* (GEE) reduce sustancialmente el movimiento de datos, mientras que el enfoque *data-to-compute* (local) implica mayores costes de transferencia y almacenamiento.

3.3. Consistencia radiométrica

Los resultados numéricos entre plataformas mostraron una alta concordancia (Tabla 3) , lo que se refleja en la coincidencia de sus distribuciones (Figura 2). El índice con mayor discrepancia fue MSI (RMSE = 0.11982),

mientras que BI presentó la mayor similitud con un RMSE de 0.00721.

Tabla 2. Métricas comparando ambas fuentes.

Índice	RMSE	Sesgo medio	Pearson
BI	0.007212	0.000295	0.976184
CI	0.038827	-0.000699	0.970586
GNDVI	0.041317	0.002066	0.963288
MSAVI2	0.045119	0.006784	0.970575
MSI	0.119822	0.001228	0.941064
NDI45	0.060906	0.003336	0.934917
NDMI	0.042988	0.001011	0.975850
NDVI	0.048766	0.001137	0.969170

En la Figura 2 se muestran los valores obtenidos para cada índice, apreciándose ligeras diferencias entre ambos procesamientos. Estas se relacionan con la construcción de mosaicos, el enmascarado de nubes, el tratamiento de píxeles parcialmente cubiertos, los ajustes radiométricos de GEE y las estrategias de reproyección, pero no afectaron la coherencia espacial ni la interpretación ambiental de los índices. Estos resultados muestran que GEE es más eficiente que el procesado local, especialmente con grandes volúmenes de datos.

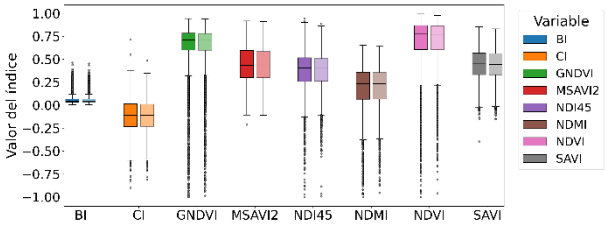


Figura 2. Boxplot comparativo por índice.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo compara el procesamiento de datos Sentinel-2 mediante GEE y procesamiento local para la generación de índices de vegetación aplicados al modelado de incendios forestales. Las principales conclusiones son:

GEE destaca por su elevada eficiencia computacional y su capacidad de automatización, lo que lo convierte en una herramienta especialmente adecuada para flujos de trabajo basados en *Big Data* e integrados en pipelines de *machine learning*.

Por su parte, el procesamiento en local ofrece un control total sobre el flujo de trabajo y favorece la reproducibilidad de los análisis. No obstante, implica mayores requerimientos de almacenamiento y tiempos de descarga, lo que puede constituir una limitación relevante en estudios con grandes volúmenes de datos o amplias áreas de estudio.

Por tanto, la elección de la plataforma debe fundamentarse en factores como el volumen de datos, la necesidad de escalabilidad, la infraestructura disponible y el grado de automatización requerido. Para análisis a gran escala y la generación sistemática de variables destinadas a modelado predictivo, los entornos *cloud* con capacidades avanzadas de *scripting* se perfilan como la opción más eficiente.

5. AGRADECIMIENTOS

Cofinanciado por la Unión Europea a través del Programa Interreg VI-A España-Portugal (POCTEP) 2021-2027.

"Redes de alertas tempranas, para la teledetección de riesgos derivados del cambio climático, por satélites de observación de la tierra para respuesta de protección civil (RAT_EOS_PC)".

6. REFERENCIAS

Berra, E. F., Fontana, D. C., Yin, F., & Breunig, F. M. (2024). Harmonized Landsat and Sentinel-2 Data with Google Earth Engine. *Remote Sensing*, *16*(15). https://doi.org/10.3390/rs16152695

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, *120*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, *202*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Saad El Imanni, H., El Harti, A., & El Iysaouy, L. (2022). Wheat Yield Estimation Using Remote Sensing Indices Derived from Sentinel-2 Time Series and Google Earth Engine in a Highly Fragmented and Heterogeneous Agricultural Region. *Agronomy*, *12*(11). https://doi.org/10.3390/agronomy12112853

Yang, L., He, W., Qiang, X., Zheng, J., & Huang, F. (2024). Research on remote sensing image storage management and a fast visualization system based on cloud computing technology. *Multimedia Tools and Applications*, *83*(21). https://doi.org/10.1007/s11042-023-17858-6

SESIÓN 09

Cartografía, Geodesia y Fotogrametría

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.101

Reto de la Cartografía en las Vegas Cultivadas: Impacto de Errores de los MDE Oficiales en la elaboración de Mapas de Riesgo de Inundación

Fragoso-Campón, Laura [1] **Rodríguez Mayoral, Javier** [1] **Antolín Salazar, Alicia** [1] **Quirós, Elia** [1]

[1] Universidad de Extremadura, España

ORCID: Fragoso-Campón 0000-0003-0397-6247 Antolín Salazar 0000-0002-9869-8149 Quirós 0000-0002-8429-045X

Correspondencia: laurafragoso@unex.es jrodriguvh@alumnos.unex.es asalazar@unex.es equiros@unex.es

RESUMEN

La modelización hidráulica en aguas someras conlleva la resolución de ecuaciones diferenciales a través de las cuales se determinan, para un caudal de avenida especificado, la profundidad y velocidades del flujo de agua sobre el terreno. Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) constituyen la representación discreta del espacio sobre el que se calculan gradientes, direcciones de flujo y profundidades; de su exactitud dependen directamente los resultados de calados y velocidades, y por tanto, la veracidad de los Mapas de Riesgo de Inundación. La exactitud de un MDE derivado de datos LiDAR está condicionada por los errores de clasificación de la nube de puntos dependiendo de la capacidad de penetración del láser en áreas con cobertura vegetal densa, aspecto especialmente crítico en vegas cultivadas. Este trabajo realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos en la modelización hidráulica a partir de tres productos cartográficos digitales oficiales españoles comparando sus resultados respecto de la cartografía oficial de peligrosidad del SNCZI (Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables) y evalúa su influencia en la elaboración de cartografía de riesgo bajo la Directiva Europea 2007/60/EC.

Palabras clave: *LiDAR, MDE, Inundaciones, ARPSI*

Fecha de recepción: 13 enero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Reto de la Cartografía en las Vegas Cultivadas: Impacto de Errores de los MDE Oficiales en la elaboración de Mapas de Riesgo de Inundación

Fragoso-Campón, Laura [1], Rodríguez Mayoral, Javier [1], Antolín Salazar, Alicia [1], Quirós, Elia [1]

[1] Universidad de Extremadura, España.

0000-0003-0397-6247, laurafragoso@unex.es ; jrodriguvh@alumnos.unex.es.

0000-0002-9869-8149, asalazar@unex.es ; 0000-0002-8429-045X, equiros@unex.es.

Resumen: La modelización hidráulica en aguas someras conlleva la resolución de ecuaciones diferenciales a través de las cuales se determinan, para un caudal de avenida especificado, la profundidad y velocidades del flujo de agua sobre el terreno. Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) constituyen la representación discreta del espacio sobre el que se calculan gradientes, direcciones de flujo y profundidades; de su exactitud dependen directamente los resultados de calados y velocidades, y por tanto, la veracidad de los Mapas de Riesgo de Inundación. La exactitud de un MDE derivado de datos LiDAR está condicionada por los errores de clasificación de la nube de puntos dependiendo de la capacidad de penetración del láser en áreas con cobertura vegetal densa, aspecto especialmente crítico en vegas cultivadas. Este trabajo realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos en la modelización hidráulica a partir de tres productos cartográficos digitales oficiales españoles comparando sus resultados respecto de la cartografía oficial de peligrosidad del SNCZI (Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables) y evalúa su influencia en la elaboración de cartografía de riesgo bajo la Directiva Europea 2007/60/EC.

Palabras clave: LiDAR, MDE, Inundaciones, ARPSI

Challenge of Cartography in Cultivated Floodplains: Impact of Errors in Official DEMs on Flood Risk Map Production

***Abstract**: Shallow-water hydraulic modelling involves the solution of differential equations through which, for a specified flood discharge, water depth and flow velocities over the terrain are determined. Digital Elevation Models (DEMs) provide the discrete representation of the surface on which gradients, flow directions, and water depths are computed; their accuracy directly controls the reliability of simulated water depths and velocities and, consequently, the validity of Flood Risk Maps. The accuracy of DEMs derived from LiDAR data is strongly conditioned by point-cloud classification errors, which depend on the laser's penetration capability in areas with dense vegetation cover, an aspect that is particularly critical in cultivated floodplains. This study performs a comparative analysis of hydraulic modelling results obtained using three official Spanish digital cartographic products, comparing their outputs against the official flood hazard maps of the SNCZI (National System for Floodplain Cartography). Furthermore, the influence of these DEM products on flood risk mapping developed under the European Floods Directive 2007/60/EC is evaluated.*

***Keywords**: LiDAR, DEM, Flood, ARPSI*

1. INTRODUCCIÓN

La representación topográfica del terreno es un componente fundamental en la modelización hidráulica de sistemas fluviales, y de su exactitud dependen directamente los resultados obtenidos en un estudio hidráulico. La modelización hidráulica de un cauce conlleva la resolución de las ecuaciones diferenciales de Saint-Venant, a partir de las cuales se obtienen los valores de calado y velocidad del flujo de agua sobre el terreno. Estas ecuaciones son extremadamente sensibles a la topografía del cauce y llanura de inundación (Ali, Solomatine, & Di Baldassarre, 2015).

Los avances en las tecnologías de adquisición de datos han incrementado notablemente la disponibilidad de Modelos Digitales de Elevación (MDE), y en España destacan los productos oficiales del Instituto Geográfico Nacional (IGN), como los MDT05 y MDT02 derivados de coberturas LiDAR del proyecto PNOA (Proyecto PNOA-LiDAR, 2026), ampliamente utilizados en modelización hidráulica. Su uso generalizado responde tanto a la confianza en la calidad asociada a su origen institucional como a limitaciones técnicas y computacionales que hacen más operativo el empleo de productos cartográficos procesados frente al uso directo de nubes de puntos LiDAR.

La exactitud con la que un MDE, obtenido a partir de datos LiDAR representa el terreno, depende de la densidad de pulsos, la penetración láser y los algoritmos de filtrado. Uno de los problemas que afectan a los estudios hidráulicos es la existencia de sesgo positivo en las cotas en parcelas con alta densidad de vegetación en las que la cota superior del dosel se clasifica erróneamente como terreno desnudo (Wallace *et al.*, 2016). Este factor resulta de vital importancia en la elaboración de mapas de riesgo de inundación en llanuras fluviales cultivadas donde la vegetación densa compromete la exactitud de los MDE y su aplicación directa puede comprometer la veracidad de los resultados en la implementación de la Directiva 2007/60/CE para la delimitación de Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI).

El objetivo de este trabajo es analizar comparativamente tres MDE obtenidos a partir de productos cartográficos oficiales españoles evaluando su impacto en la elaboración de los mapas de riesgo conforme a la Directiva 2007/60/CE.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El tramo estudiado corresponde al río Ruecas a su paso por Madrigalejo (Cáceres), catalogado como área de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI ES040_EXT_006), con posibles impactos humanos, ambientales y económicos. Sus vegas se destinan a cultivos herbáceos, predominando el maíz entre los usos agrarios de las zonas regables del Guadiana.

2.2. Modelo Digitales de Elevaciones

2.2.1. Modelo digital de elevaciones oficiales del IGN (ING_MDT02 y IGN_MDT05)

Se ha trabajado con dos MDE disponibles en el catálogo de productos del centro de descargas del IGN (Instituto Geográfico Nacional [IGN], 2026): MDT05 y MDT02. Según la descripción facilitada en la web del Proyecto (Proyecto PNOA-LiDAR, 2026) la generación de estos modelos, se realizó a partir de la clase terreno (clase 2) de la nube de puntos LiDAR en cada caso:

- MDT05: es el un modelo digital del terreno con una resolución espacial de 5 metros obtenido a partir de la 1ª Cobertura (2010), que tiene una densidad de 0.5 puntos por m².
- MDT02: es el modelo digital del terreno con una resolución espacial de 2 metros obtenido a partir de la 2ª Cobertura (2018) que tiene una densidad de 2 puntos por m².

2.2.2. Modelo digital de elevaciones procesado *ad-hoc* a partir de datos LiDAR 3ª cobertura (MDE_LiDAR)

Se ha elaborado un MDE *ad-hoc* a partir de la nube de puntos LiDAR de la 3ª cobertura (2023), nivel de procesamiento NPC02, que cuenta con una densidad de 5 puntos/m². Para cubrir la zona de estudio se han procesado un total 24 archivos LAZ, con ayuda del software ArcGISPRO se ha generado el MDE a partir de la clase del terreno a una resolución espacial de 2 m, coincidiendo con la mejor de las resoluciones ofertadas por el IGN. Para su obtención se ha aplicado una interpolación mediante *binning*, asignando el valor medio de las cotas en cada celda.

2.3. Modelo Hidráulico

La modelización hidráulica se ha realizado utilizando el software IBER v3.3.1 (Bladé *et al.*, 2014) y se ha implementado un modelo bidimensional en el tramo ARPSI del río Ruecas, generando tres escenarios que difieren únicamente en la cota asignada a la malla según la cartografía empleada.

2.3.1. Caudal

Se ha estudiado la zona de inundación de la avenida de 100 años de período de retorno tomando caudal de referencia de 206 m³/s, coincidiendo con la información disponible en la cartografía oficial disponible.

2.3.2. Estimación de las pérdidas de carga por fricción (Manning)

La asignación del número de Manning se ha realizado conforme a las recomendaciones del Anexo 5 de la Guía de Elaboración de Cartografía de Zonas Inundables (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2026b) tomando como referencia los usos del suelo de la base de datos SIOSE AR obtenida del centro de descargas del IGN.

2.3.3. Parámetros de la modelización en IBER

Se ha definido una malla no estructurada con discretización variable para representar con mayor precisión los gradientes de velocidad y las variaciones locales del flujo en zonas inundadas. Se ha adoptado un tamaño de 2 m en el cauce, 5 m en las riberas y entre 10–20 m en áreas periféricas.

2.4. Evaluación de las llanuras de inundación

La evaluación de las llanuras de inundación se realizó mediante una matriz de confusión que cuantifica las coincidencias y discrepancias las distintas cartografías, evaluándose específicamente el F1-*score*, una métrica que ofrece una visión integrada de la capacidad de detección de zonas inundables y de los errores de omisión y comisión asociados al análisis espacial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Valoración de los MDE

En la Figura 1 se representa una zona representativa de cada MDE y la nube de puntos desde la que se han generado. Se observa claramente como el modelo IGN MDT05 (1ª cobertura LiDAR), presenta importantes errores de clasificación en parcelas con cultivos vigorosos, en las que la cota superior del cultivo se clasifica como terreno, sin que el láser llegue a penetrar hasta la superficie real del suelo, confirmando que el MDE presenta un sesgo positivo de la altitud en las áreas cultivadas (Wallace *et al.* 2016). En caso del MDE IGN MDT02 (2ª cobertura LiDAR), se observa un patrón similar en ciertas parcelas con vegetación vigorosa, sin embargo, las deficiencias del MDE no parecen deberse exclusivamente a errores en la clasificación de los puntos, si no, también a errores en el filtrado de puntos a la hora de generar el MDE, ya que se observa la superficie del terreno en zonas clasificadas como

vegetación, correspondiéndose a un modelo de superficie y no de terreno. En este sentido aclarar que desconocemos, si posibles errores en la clasificación de la nube de puntos, se hayan podido subsanar en el archivo LAZ con posterioridad a la fecha de elaboración del MDE. Por último, la 3ª cobertura, sí que tiene una correcta clasificación de la nube de puntos y esto se traduce en un MDE_LiDAR mucho más exacto en la representación del terreno en las zonas cultivadas.

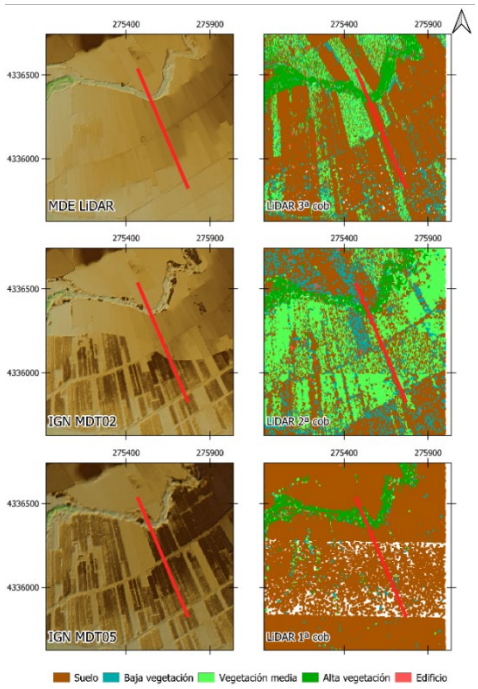


Figura 1. Detalle de las nubes de puntos LiDAR y los MDE elaborados a partir de ellas. MDE-LiDAR (elaborado ad-hoc), IGN MDT02 (producto oficial del IGN derivado de la 2º cobertura), y IGN MDT05 (producto oficial del IGN derivado de la 1º cobertura). La línea roja representa la sección transversal que se visualiza en el Figura 2.

En cualquier caso, estas deficiencias en la generación de los modelos suponen cambios de cota notables en la topografía de la llanura de inundación, dependiendo además de la estacionalidad de los cultivos y fecha de vuelo LiDAR, observándose desfases del orden 1.5 m en las cotas (Fig. 2).

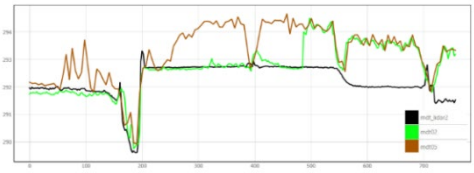


Figura 2. Perfil transversal comparativo de los MDE derivados de datos LiDAR: en negro MDE-LiDAR (ad-hoc de la 3ª cobertura), en verde el MDE IGN MDT02 (2º cobertura), y en marrón el MDE IGN MDT05 (1º cobertura)

3.2. Resultados de la modelización hidráulica y evaluación de las llanuras de inundación

Los resultados obtenidos en los modelos hidráulicos bidimensionales confirman que las extensiones de la llanura de inundación varían de forma significativa en función del MDE empleado (Fig. 3), poniendo de manifiesto la sensibilidad de las simulaciones a las variaciones de la topografía de la zona inundable.

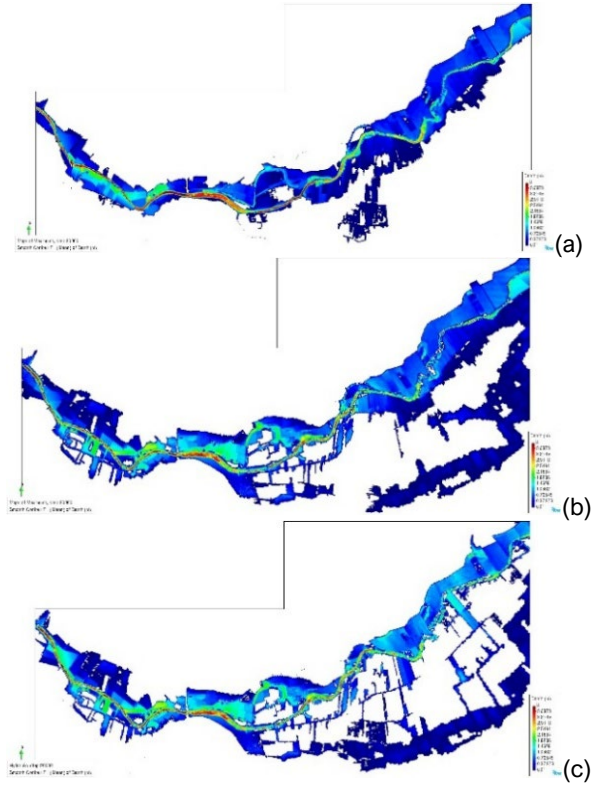


Figura 3. Resultados del calado (m) y extensión de la inundación (a) MDE LiDAR, (b) MDE IGN MDT02 (c) MDE IGN MDT05

El análisis comparativo de los MDE confirma que el modelo *ad-hoc* generado a partir de la 3ª cobertura LiDAR ofrece la representación topográfica más exacta del área de estudio y por tanto, resulta ser el más fiable para analizar la inundación más probable en caso de avenida (Bodoque *et al.*, 2023). Tomando esta referencia, la Figura 4 muestra los resultados de la matriz de confusión.

En el primer caso, llanura obtenida del LiDAR frente la llanura oficial ARPSI se alcanza un F1-*score* de 0.74, evidenciando una detección muy completa de las áreas inundables si bien, en ciertos tramos, se subestima la extensión real de la llanura, implicando una posible infravaloración de los daños potenciales en términos socioeconómicos y ambientales (Bodoque *et al.*, 2023b; Dottori *et al.*, 2022).

Por el contrario, la cartografía oficial del IGN tiende a generar extensiones de inundación mayores y muestran un rendimiento notablemente inferior, obteniéndose unos valores del F1-*score* de 0.66 y 0.62 para las llanuras derivadas del MDT02 (Fig. 4b) y del MDT05 (Fig. 4c) respectivamente. Estos valores evidencian un

incremento de errores de comisión asociado errores topográficos, especialmente debidos a la elevación artificial de cotas en parcelas cultivadas, lo que provoca una redistribución irreal del flujo y amplifica el área inundada (Saksena & Merwade, 2015; Muthusamy *et al.*, 2021; Bodoque *et al.*, 2023). Estas diferencias resaltan la importancia de utilizar MDE realistas para realizar los mapas de riesgo conforme a la Directiva de Inundaciones (2007/60/CE). Es importante subrayar que este trabajo no evalúa la influencia de la resolución del MDE en la modelización hidráulica, ya documentada (Muthusamy *et al.*, 2021), sino el uso de cartografía oficial en la delimitación de zonas inundables; aunque la precisión del MDE *ad hoc* podría mejorarse con la alta densidad LiDAR, este aspecto queda fuera del alcance del estudio.

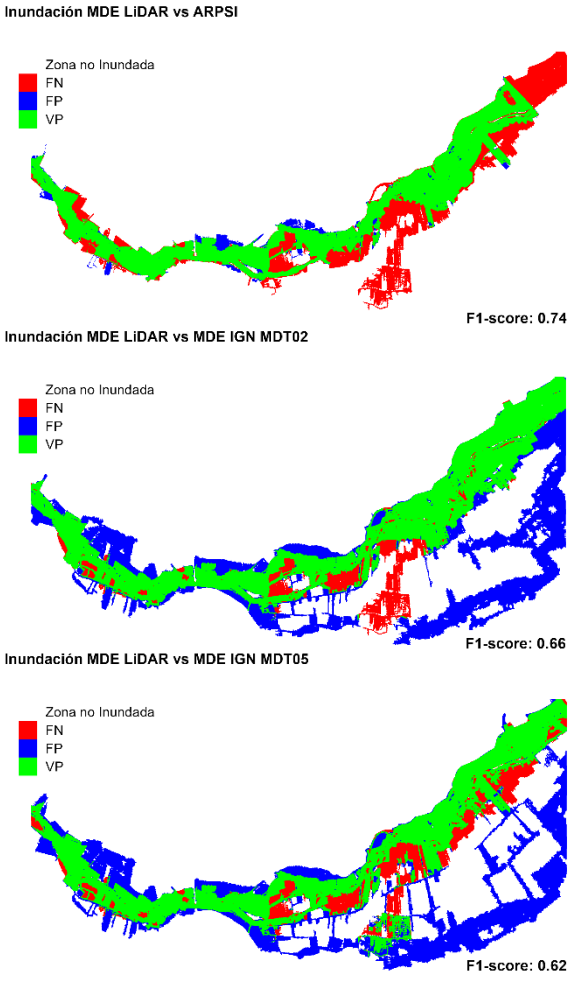


Figura 4. Mapas de las matrices de confusión.

4. CONCLUSIONES

Los MDE analizados muestran diferencias significativas en la representación topográfica del cauce y las vegas de cultivo. Los MDE derivados de las primeras coberturas LiDAR oficiales del IGN (MDT05 y MDT02) presentan errores sistemáticos en áreas con vegetación densa que distorsionan la llanura de inundación. Sin embargo, el MDE-LiDAR elaborado *ad hoc* a partir de la tercera cobertura logra proporciona una topografía más fiable del área de estudio. Estas variaciones topográficas se trasladan directamente a los modelos hidráulicos bidimensionales, donde las extensiones de inundación difieren notablemente según el MDE empleado, debido a su influencia en la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant, afectando a la propagación del flujo, las profundidades y el alcance de la llanura inundable.

En comparación con la llanura ARPSI oficial, el MDE LiDAR de referencia revela subestimaciones de la cartografía oficial en tramos críticos, mientras que los productos IGN generan sobreestimaciones por redistribución artificial del flujo hacia parcelas accesibles por gravedad. Ello subraya la necesidad de MDE realistas y validados localmente para cumplir la Directiva 2007/60/CE, evitando tanto infravaloraciones, que comprometen la prevención como sobreestimaciones que incrementan costes innecesarios de mitigación.

5. REFERENCIAS

Ali, A. M., Solomatine, D. P., & Di Baldassarre, G. (2015). Assessing the impact of different sources of topographic data on 1-D hydraulic modelling of floods. *Hydrology and Earth System Sciences, 19*(2), 631–643. https://doi.org/10.5194/hess-19-631-2015

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M. E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). IBER: River modelling simulation tool (Versión 3.3.1) [Software]. Universitat Politècnica de Catalunya. https://www.iberaula.es

Bodoque, J. M., Aroca-Jiménez, E., Eguibar, M. Á., & García, J. A. (2023). Developing reliable urban flood hazard mapping from LiDAR data. *Journal of Hydrology, 617*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128975

Dottori, F., Szewczyk, W., & other. (2022). A new dataset of river flood hazard maps for Europe and the globe. *Earth System Science Data, 14*(4), 1549–1569. https://doi.org/10.5194/essd-14-1549-2022

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2026b). Guía de elaboración de cartografía de zonas inundables: Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI). Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es

Proyecto PNOA-LiDAR. (s.f.). PNOA-LiDAR: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea – LiDAR. Instituto Geográfico Nacional. https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea)

Muthusamy, M., Casado, M. R., Butler, D., & Leinster, P. (2021). Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modelling. *Journal of Hydrology, 596*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126088

Saksena, S., & Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology, 530*, 180-194. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.069

Wallace, L. O., Lucieer, A., Malenovský, Z., Turner, D., & Vopěnka, P. (2016). Assessment of UAV–LiDAR accuracy in vegetated terrain. International Journal of *Applied Earth Observation and Geoinformation, 52*, 129–137. https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.008

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.105

Reconstrucción del cauce usando altimetría fotogramétrica SfM: El "Método del Dominio Fluvial"

Escobar Villanueva, Jairo [1] **Pérez Montiel, Jhonny** [1] **Nardini, Andrea** [2]

[1] Universidad de La Guajira, Colombia

[2] Fundación CREACUA—Centro Recuperación Ecosistemas ACUÁticos, Colombia

ORCID: Escobar Villanueva 0000-0002-2558-3500 Pérez Montiel 0000-0003-0826-5452 Nardini 0000-0002-8486-7597

Correspondencia: jrescobar@uniguajira.edu.co jpemon@uniguajira.edu.co nardini@gmail.com

RESUMEN

En planicies aluviales, un buen modelo digital de elevación (MDE) es decisivo para simular inundaciones. El problema es que la fotogrametría (con UAV/SfM) suele “perder” el fondo del cauce cuando hay agua, dejando un canal poco realista y afectando la conectividad del flujo. Presentamos una versión resumida del Método de Dominio Fluvial, que aprovecha la altimetría obtenida por fotogrametría (llano y bordes del canal en estiaje) y la complementa con pocos datos de campo para reconstruir una geometría de cauce idealizada e integrada al MDE del llano. El caso de estudio es el delta del río Ranchería (Riohacha, Caribe colombiano) en un tramo de ~26 km. Se combinaron productos SfM-MVS de (2017; GSD ~20 cm) con GNSS-RTK (2022–2023), secciones transversales (2015) y puntos del fondo (2023). Se reconstruye el perfil longitudinal aplicando principios de consistencia hidráulica (pendiente monotónica) e integra en el MDT de la llanura de inundación. La validación mostró una discrepancia del 11.7% en el perfil longitudinal del cauce respecto a secciones transversales medidas y un RMSE de 0.38 m en la llanura de inundación frente a datos GNSS-RTK. El método ofrece una solución accesible y costo-efectiva para la gestión del riesgo de inundaciones en contextos donde tecnologías activas como LiDAR no son viables.

Palabras clave: *Fotogrametría aérea; SfM-MVS; cauce fluvial; MDT; modelación hidráulica.*

Fecha de recepción: 26 enero 2026 · **Fecha de aceptación:** 26 enero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Reconstrucción del cauce usando altimetría fotogramétrica SfM: El "Método del Dominio Fluvial"

Escobar Villanueva, Jairo [1], Pérez Montiel, Jhonny [1], Nardini, Andrea [2]

[1] Universidad de La Guajira, Colombia.

0000-0002-2558-3500, jrescobar@uniguajira.edu.co ; 0000-0003-0826-5452, jpemon@uniguajira.edu.co.

[2] Fundación CREACUA—Centro Recuperación Ecosistemas ACUÁticos, Colombia,

0000-0002-8486-7597, nardini@gmail.com.

Resumen: En planicies aluviales, un buen modelo digital de terreno (MDT) es decisivo para simular inundaciones. El problema es que la fotogrametría (UAV/SfM) suele "perder" el fondo del cauce cuando hay agua, dejando un canal poco realista y afectando la conectividad del flujo. Presentamos una versión resumida del Método de Dominio Fluvial, que aprovecha la altimetría obtenida por fotogrametría (llano y bordes del canal en estiaje) y la complementa con pocos datos de campo para reconstruir una geometría de cauce idealizada e integrada al MDT del llano. El caso de estudio es el delta del río Ranchería (Riohacha, Caribe colombiano) en un tramo de ~26 km. Se combinaron productos SfM-MVS de (Ultra CAM 2017; GSD ~20 cm; ~1400 images; ~279 km²) con GNSS-RTK (2022–2023), secciones transversales (2015) y puntos del fondo (2023). Se reconstruye el perfil longitudinal aplicando principios de consistencia hidráulica (pendiente monotónica) e integra en el MDT de la llanura de inundación. La validación mostró una discrepancia del 11.7% en el perfil longitudinal del cauce respecto a secciones transversales medidas y un RMSE de 0.38 m en la llanura de inundación frente a datos GNSS-RTK. El método ofrece una solución accesible y costo-efectiva para la gestión del riesgo de inundaciones en contextos donde tecnologías activas como LiDAR no son viables.

Palabras clave: Fotogrametría aérea; SfM-MVS; cauce fluvial; MDT.

Channel reconstruction using SfM photogrammetric altimetry: The "Fluvial Domain Method".

***Abstract**: In alluvial plains, an accurate Digital Elevation Model (DEM) is critical for flood modeling. A major challenge is that photogrammetry (UAV/SfM) typically fails to capture submerged riverbeds, yielding unrealistic channel representations that compromise flow connectivity. We present a summarized version of the Fluvial Domain Method, which leverages photogrammetric altimetry (floodplain and channel banks during low-flow conditions) supplemented by sparse field data to reconstruct an idealized channel geometry integrated into the floodplain DEM. The case study focuses on a ~26 km reach of the Ranchería River delta (Riohacha, Colombian Caribbean). SfM-MVS products (UltraCam 2017; GSD ~20 cm; ~1400 images; ~279 km²) were combined with GNSS-RTK data (2022–2023), cross-sections (2015), and riverbed points (2023). The longitudinal profile was reconstructed by applying principles of hydraulic consistency (monotonic slope) and integrated into the floodplain DEM. Validation revealed an 11.7% discrepancy in the channel longitudinal profile relative to measured cross-sections and an RMSE of 0.38 m in the floodplain compared to GNSS-RTK data. The method offers an accessible and cost-effective solution for flood risk management in contexts where active technologies, such as LiDAR, are not feasible.*

***Keywords**: airborne photogrammetry; SfM-MVS; river channel; DEM; flood*

1. INTRODUCCIÓN

El modelado del terreno es fundamental para la gestión de recursos hídricos y la evaluación de riesgos de inundación (Toschi & Remondino, 2018; Schumann & Bates, 2020). Si bien tecnologías como LiDAR aerotransportado ofrecen alta precisión, sus costos y logística limitan su implementación en regiones con recursos escasos, donde tradicionalmente prevalecen levantamientos de campo o fotogrametría convencional (Forlani *et al*., 2015; Brasington *et al*., 2012). La fotogrametría *Structure from Motion* (SfM-MVS) ha facilitado la adquisición de topografía de alta resolución a bajo costo (Eltner *et al*., 2019). No obstante, la reconstrucción de cauces enfrenta limitaciones críticas: la vegetación, sombras y turbidez del agua degradan la detección del lecho, introduciendo ruido significativo (Watanabe & Kawahara, 2016; Dietrich, 2017). La conversión directa de estas nubes de puntos a ráster suele generar artefactos que distorsionan la

conectividad hidrológica entre el canal y la llanura de inundación (Merwade *et al*., 2008; Arrighi & Campo, 2019).

En ausencia de batimetría densa, es necesario maximizar la altimetría fotogramétrica confiable en zonas expuestas y combinarla con información de campo distribuida para corregir la incertidumbre subacuática (Dietrich, 2017; James *et al*., 2019). Este estudio presenta el "Método del Dominio Fluvial", diseñado para integrar cauces en MDT de áreas planas evitando distorsiones por interpolación directa (Escobar Villanueva *et al*., 2025). El método reconstruye una geometría idealizada y coherente a partir de perfiles longitudinales y secciones tipo, priorizando la representatividad hidráulica por encima del detalle fino no observable en imágenes RGB (Saksena & Merwade, 2015).

En este manuscrito se presenta una versión divulgativa del método presentado por Escobar *et al* (2025) en la revista *Hydrology*, enfatizando en la práctica de procesamiento y mostrando su efecto en métricas de exactitud y en la coherencia geométrica del canal.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Se centró en la cuenca baja del río Ranchería, Península de La Guajira, Colombia (11°32′39″N 72°54′25″O). El tramo abarca 26 km de un río con patrón meándrico y pendiente suave (< 0.1%), rodeado de bosque seco tropical y manglares que dificultan la observación directa del terreno. En el tramo final se encuentra el delta, su llanura de inundación exhibe una dinámica activa con bancos de arena, paleocauces y lagunas costeras, rodeadas de densa vegetación ribereña y manglares en la zona distal.

2.2. Datos empleados

- Imágenes aéreas disponibles: Adquiridas en la temporada seca de 2017 con sensores UltraCam (GSD de 20 cm). Vuelo gubernamental del Fondo de Adaptación (2017).
- Validación en cauce: 8 secciones transversales topográficas disponibles. Validación en llanura: 593 puntos de control (checkpoints) obtenidos mediante GNSS-RTK en 2022.
- Levantamientos batimétricos complementarios: fue necesario adquirir información del fondo del cauce vía GNSS en el último tramo del río y brazos para verificación del método y/o posibles ajustes puntuales.

2.3. Procesamiento Fotogramétrico SfM-MVS y productos derivados

El flujo de trabajo SfM-MVS se realizó con Agisoft Metashape. Tras la alineación y optimización de la nube de puntos dispersa (error de proyección de 0.47 píxeles), se generó una nube densa. Se aplicó una clasificación de suelo muy estricta para eliminar la vegetación densa, utilizando algoritmos de curvatura del terreno y edición manual en zonas críticas como terraplenes. Esto generó un MDT (modelo a nivel de terreno) preliminar que sirvió como insumo base.

2.4. El Método del Dominio Fluvial

La metodología se basa en la premisa de que el uso directo de la nube de puntos en el cauce es insatisfactorio, luego se proponen cuatro etapas (Fig 1):

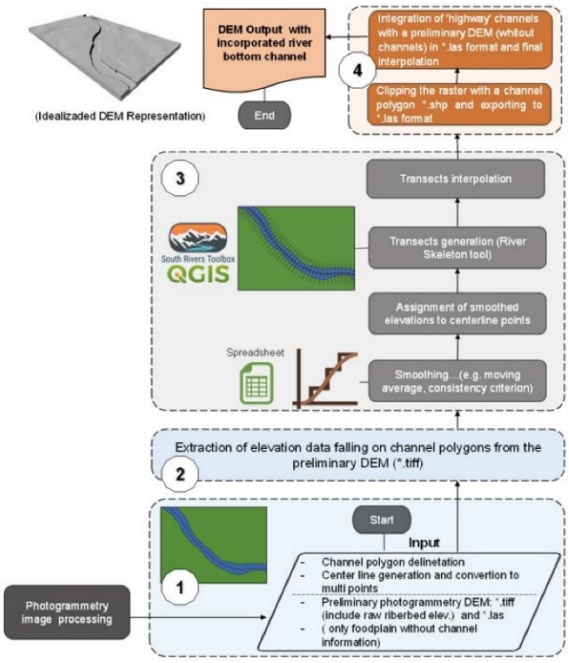


Figura 1. Flujo de trabajo general del método propuesto.

1 **Preprocesamiento y enmascaramiento:** Se identifican y excluyen los puntos que caen dentro del polígono del canal fluvial para evitar la distorsión ("hundimiento") de la llanura de inundación adyacente debido a puntos anómalos bajos en el río. Se genera un MDT exclusivo de la llanura. 2 **Extracción del perfil longitudinal:** Se extrae la línea central del cauce y las elevaciones correspondientes del MDT preliminar. 3 **Corrección batimétrica:** Dado que el perfil crudo presenta "baches" irreales, se aplica un suavizado mediante media móvil ponderada e imposición de pendiente hidráulica descendente (el agua no sube). La corrección sigue la lógica de que el fondo no puede ascender significativamente salvo por geomorfológicos evidentes (proximidad a línea o barra costera). Se generan transectos perpendiculares a la línea central corregida. Y se interpolan estos transectos para crear una superficie raster continua y suave del fondo del canal (similar a una "autopista"). 4 **Integración:** Finalmente, el MDT de la llanura de inundación y la superficie suavizada del canal se fusionan obteniendo el MDT final,

3. RESULTADOS

Precisión del MDT en llanura de inundación: La comparación entre el Modelo Digital de Superficie (MDS) y el MDT final procesado mostró mejoras significativas tras la clasificación de puntos (Tabla 1).

Tabla 1. Mejora de exactitud vertical (m) entre el MDS inicial y el MDT final integrado.

Producto	ME / MAE / RMSE (m)
MDS inicial	0.12 / 0.62 / 0.991
MDT final	-0.05 / 0.28 / 0.387

Mientras que el MDS presentaba un Error Medio de 0.12 m y un RMSE de 0.99 m (debido a la vegetación), el MDT final redujo el sesgo a -0.05 m y el RMSE a 0.38 m. Esto representa una mejora del 60.94% en la precisión vertical, cumpliendo con los estándares para aplicaciones de resolución moderada (clase de precisión vertical de 1 m). Lo anterior sugiere que el refinamiento del llano y la integración controlada del cauce eliminan parte importante de los errores sistemáticos y de los artefactos asociados al paso nube-a-ráster (Fig 2).

Representación del Cauce Fluvial: Para el cauce, la discrepancia porcentual media del perfil longitudinal fue ~11.7%. El coeficiente de determinación (R^2) entre las profundidades observadas y estimadas fue de 0.86, con un Error Medio Absoluto (MAE) de 0.459 m. Estos valores son afines con un enfoque de generalización que prioriza la preservación del gradiente hidráulico global y la eliminación de escalones artificiales, resultando en una geometría idealizada pero coherente frente a la inestabilidad de una interpolación directa sobre superficies de agua.

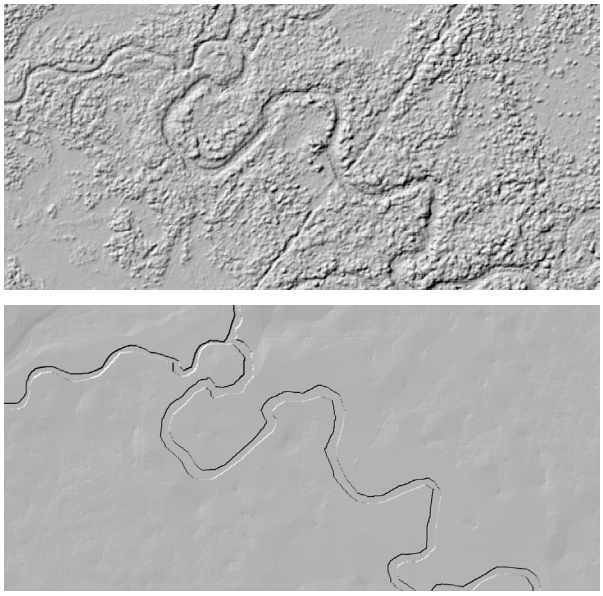


Figura 2. MDS (arriba) y MDT (Abajo) en visualización Hillshade de un sector representativo del Ranchería.

La aplicación del método eliminó las discontinuidades abruptas presentes en el perfil longitudinal original derivado de la fotogrametría (Fig 3). En la zona distal (cerca de la desembocadura), donde la vegetación de manglar y el agua son predominantes, se realizaron ajustes adicionales utilizando datos GNSS-RTK puntuales en el cauce para corregir la sobreestimación de la elevación del fondo batimétrico.

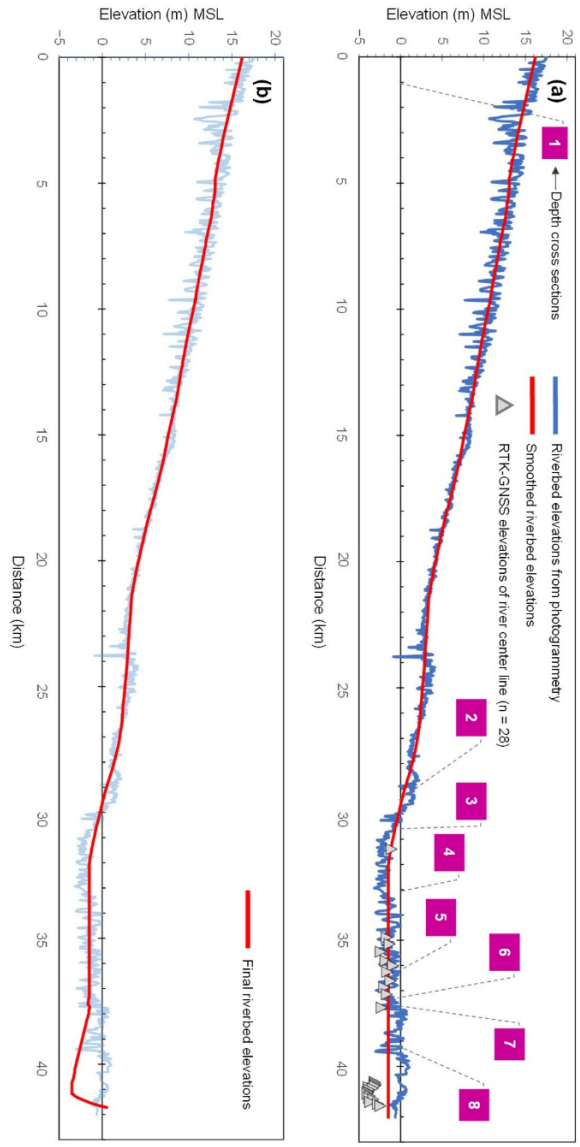


Figura 3. Perfiles longitudinales del rio caso de estudio: (a) sin ajuste. (b) perfil suavizado aplicando el método propuesto.

4. DISCUSIÓN

Los resultados demuestran que el Método del Dominio Fluvial permite generar un MDT geométricamente coherente en entornos complejos y con escasez de datos (Escobar Villanueva *et al*., 2025; Saksena & Merwade, 2015). A diferencia de soluciones basadas en LiDAR —de alta calidad pero con mayores costos operativos— o del uso exclusivo de MDT globales de resolución más gruesa, este enfoque aprovecha imágenes aéreas existentes o de bajo costo (UAV) para producir insumos topográficos útiles en modelación de inundaciones (Legleiter, 2012; Monteiro *et al*., 2018).

Es importante notar que el método simplifica la morfología del canal; asume una forma "idealizada" y suavizada, omitiendo detalles geomorfológicos finos como barras de arena o dunas de fondo, a menos que sean muy evidentes en imágenes de época seca. Sin embargo, para evaluación de riesgos de inundación —donde la consistencia topográfica y la conectividad

hidráulica suelen ser más determinantes que la micro-topografía del lecho— esta simplificación resulta aceptable y funcional (Merwade *et al*., 2008; Saksena & Merwade, 2015).

Las limitaciones principales radican en la dependencia de la calidad de la clasificación/filtrado de la nube de puntos y en la necesidad de cierta intervención manual para definir los polígonos del canal, tareas comunes en flujos SfM-MVS/UAV cuando existen agua, sombras o cobertura vegetal (Zeybek & Şanlıoğlu, 2019; Watanabe & Kawahara, 2016; Casado *et al*., 2015). Además, en zonas con agua profunda permanente o vegetación de galería muy densa que ocluye totalmente el terreno, se requiere información complementaria (p. ej., sondeos puntuales u otras aproximaciones de batimetría) para refinar el modelo y reducir la incertidumbre bajo la lámina de agua (Legleiter, 2012; Legleiter, 2021).

5. CONCLUSIONES

Este estudio valida el "Método del Dominio Fluvial" como una alternativa robusta para la generación de MDT en contextos de datos escasos. Para la comunidad de teledetección, el aporte central es metodológico: explicitar la incertidumbre bajo el agua y reemplazarla por una geometría idealizada controlada, evitando artefactos que degradan conectividad. Al separar el tratamiento del cauce y la llanura, se evitan los errores comunes de la fotogrametría directa en cuerpos de agua.

En la llanura de inundación, la clasificación rigurosa de puntos permite precisiones comparables a levantamientos convencionales (RMSE ~0.38 m). En el cauce, la imposición de restricciones hidráulicas y el suavizado del perfil longitudinal eliminan artefactos, logrando un error relativo del 11.7% en la estimación de profundidades. El producto final es un MDT híbrido potencialmente adecuado para simulaciones hidráulicas, aportando a la gestión de riesgo de inundación en países en desarrollo. Trabajos futuros deberían enfocarse en la automatización de la delineación del cauce y la integración de algoritmos de aprendizaje automático para mejorar la clasificación de puntos en zonas de vegetación densa.

6. AGRADECIMIENTOS

A Minciencias (Proyecto 82207, Conv. 890) e ICETEX de Colombia. Se reconoce el apoyo de la Universidad de La Guajira (Vicerrectoría y Dirección de Investigación), Fundación CREACUA y el Fondo de Adaptación (imágenes para fotogrametría DEM).

7. REFERENCIAS

Arrighi, C., & Campo, L. (2019). Effects of Digital Terrain Model Uncertainties on High-Resolution Urban Flood Damage Assessment. *J. Flood Risk Manag.*, 12, e12530.

Brasington, J., Vericat, D., & Rychkov, I (2012). Modeling River Bed Morphology, Roughness, and Surface Sedimentology Using High Resolution Terrestrial Laser Scanning. *Water Resour. Res.*, 48, 1–18.

Casado, M.R., Gonzalez, R.B., Kriechbaumer, T., & Veal, A (2015). Automated Identification of River Hydromorphological Features Using UAV High Resolution Aerial Imagery. *Sensors*, 15, 27969–27989.

Dietrich, J.T (2017). Bathymetric Structure-from-Motion: Extracting Shallow Stream Bathymetry from Multi-View Stereo Photogrammetry. *Earth Surf. Process. Landf.*, 42, 355–364.

Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., & Abellán, A. (2016). Image-Based Surface Reconstruction in Geomorphometry- Merits, Limits and Developments. *Earth Surf. Dyn.*, 4, 359–389.

Escobar Villanueva, J. R., Pérez-Montiel, J. I., & Nardini, A. G. C. (2025). DEM Generation Incorporating River Channels in Data-Scarce Contexts: The "Fluvial Domain Method". *Hydrology*, 12(2), 33.

Forlani, G., Roncella, R., & Diotri, F (2015). Production of High-Resolution Digital Terrain Models in Mountain Regions to Support Risk Assessment. *Geomat. Nat. Hazards Risk*, 6, 379–397.

James, M. R., Chandler, J. H., Eltner, A., Fraser, C., Miller, P. E., Mills, J. P., Noble, T., Robson, S., & Lane, S. N. (2019). Guidelines on the Use of Structure-from-Motion Photogrammetry in Geomorphic Research. *Earth Surf. Process. Landf*., 44, 2081–2084.

Legleiter, C.J. (2012). Remote Measurement of River Morphology via Fusion of LiDAR Topography and Spectrally Based Bathymetry. *Earth Surf. Process. Landf.*, 37, 499–518.

Legleiter, C.J. (2021). The Optical River Bathymetry Toolkit. *River Res. Appl.*, 37, 555–568.

Merwade, V., Cook, A., & Coonrod, J (2008). GIS Techniques for Creating River Terrain Models for Hydrodynamic Modeling and Flood Inundation Mapping. *Environ. Model. Softw.*, 23, 1300–1311.

Monteiro, E.S.V., Fonte, C.C., & de Lima, J.L.M.P (2018). Analysing the Potential of OpenStreetMap Data to Improve the Accuracy of SRTM 30 DEM on Derived Basin Delineation, Slope, and Drainage Networks. *Hydrology*, 5, 34.

Saksena, S., & Merwade, V (2015). Incorporating the Effect of DEM Resolution and Accuracy for Improved Flood Inundation Mapping. *J. Hydrol.*, 530, 180–194.

Schumann, G.J.P., & Bates, P.D (2020). The Need for a High-Accuracy, Open-Access Global Digital Elevation Model. *Front. Earth Sci.*, 8, 225.

Toschi, I., & Remondino, F. (2018). Geomatics Mapping of Natural Hazards: Overview and Experiences. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII, 505–512.

Watanabe, Y., & Kawahara, Y. (2016). UAV Photogrammetry for Monitoring Changes in River Topography and Vegetation. *Procedia Eng.*, 154, 317–325.

Zeybek, M., & Şanlıoğlu, İ. (2019). Point Cloud Filtering on UAV Based Point Cloud. *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 133, 99–111.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.122

Monitorización del estado del césped en un parque urbano mediante cámaras RGB de bajo coste

Guillén Castillo, Mónica [1] **Valero-Jorge, Alexey** [1] **Casterad Seral, Mª Auxiliadora** [1] **Salvador Esteban, Raquel** [1, 2]

[1] Dpto. de Sistemas Agrícolas, Forestales y Medio Ambiente (Unidad asociada a EEAD-CSIC Suelos y Riegos), Centro de Investigación y Tecnologías Agroalimentaria de Aragón, Avda. Montañana 930, 50059-Zaragoza, España.

[2] Instituto Agroalimentario de Aragón-IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza), Zaragoza, España.

ORCID: Guillén Castillo 0000-0003-0226-4053 Valero-Jorge 0000-0002-5993-7346 Casterad Seral 0000-0003-4458-6966 Salvador Esteban 0000-0002-4673-3555

Correspondencia: mguillenc@cita-aragon.es avalero@cita-aragon.es acasterad@cita-aragon.es rsalvadore@cita-aragon.es

RESUMEN

Este estudio analiza las posibilidades de monitorización del estado del césped en parques urbanos mediante cámaras RGB de bajo coste. Con series temporales de imágenes, modelos de aprendizaje automático e índices de verdor se consigue definir, en el parque Universidad de Huesca, cuatro estados funcionales del césped que van desde un vigor óptimo hasta una degradación severa. Random Forest, con una precisión global del 78% y un coeficiente Kappa de 0,67 fue, frente a ELM y XGB, el mejor modelo para estimar los porcentajes de suelo desnudo y de césped en distintos estados (verde, amarillo, marrón). Para la discriminación del verdor, el índice VARI resultó ser el indicador más robusto de los cuatro índices de vegetación analizados. El análisis de agrupamiento K-means, considerando porcentaje de superficie ocupada por cada estado del césped y valores de VARI, llevó a determinar los cuatro estados funcionales. El sistema de monitorización aplicado se mostró operativo para la caracterización temporal del estado del césped en un parque urbano, revelando diferencias significativas entre las zonas del parque estudiadas e identificando momentos en que el césped presentaba un peor estado, lo que permite priorizar y focalizar las labores de riego y mantenimiento.

Palabras clave: *estado césped, cámaras RGB, índices de verdor, clasificación supervisada, K-means*

Fecha de recepción: 5 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 5 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Monitorización del estado del césped en un parque urbano mediante cámaras RGB de bajo coste

Guillén Castillo, Mónica [1], Valero-Jorge, Alexey [1], Casterad Seral, Mª Auxiliadora [1], Salvador Esteban, Raquel [1,2]

[1] Dpto. de Sistemas Agrícolas, Forestales y Medio Ambiente (Unidad asociada a EEAD-CSIC Suelos y Riegos), Centro de Investigación y Tecnologías Agroalimentaria de Aragón-Zaragoza, España.

[2]Instituto Agroalimentario de Aragón-IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza), España

0000-0003-0226-4053, mguillenc@cita-aragon.es.

0000-0002-5993-7346, avalero@cita-aragon.es.

0000-0003-4458-6966, acasterad@cita-aragon.es.

0000-0002-4673-3555, rsalvadore@cita-aragon.es.

Resumen: Este estudio analiza las posibilidades de monitorización del estado del césped en parques urbanos mediante cámaras RGB de bajo coste. Con series temporales de imágenes, modelos de aprendizaje automático e índices de verdor se consigue definir, en el parque Universidad de Huesca, cuatro estados funcionales del césped que van desde un vigor óptimo hasta una degradación severa. Random Forest (RF), con una precisión global del 78% y un coeficiente Kappa de 0,67 fue, frente a Extreme Learning Machine (ELM) y eXtreme Gradient Boosting (XGB), el mejor modelo para estimar los porcentajes de suelo desnudo y de césped en distintos estados (verde, amarillo, marrón). Para la discriminación del verdor, el Índice de Resistencia Atmosférica Visible (VARI) resultó ser el indicador más robusto de los cuatro índices de vegetación analizados. El análisis de agrupamiento K-medias, considerando porcentaje de superficie ocupada por cada estado del césped y valores de VARI, llevó a determinar los cuatro estados funcionales. El sistema de monitorización aplicado demostró ser operativo para la caracterización temporal del estado del césped en un parque urbano, revelando diferencias significativas entre las zonas del parque estudiadas e identificando momentos en que el césped presentaba un peor estado, lo que permite priorizar y focalizar las labores de riego y mantenimiento.

Palabras clave: estado césped, cámaras RGB, índices de verdor, clasificación supervisada, K-medias

Monitoring the condition of turf in an urban park using low-cost RGB cameras

***Abstract**: This study analyzes the possibilities of monitoring the condition of turf in urban parks using low-cost RGB cameras. Using time series of images, machine learning models, and greenness indices, four functional states of turf ranging from optimal vigor to severe degradation were defined in the University of Huesca Park. Random Forest, with an overall accuracy of 78% and a Kappa coefficient of 0.67, was the best model for estimating the percentages of bare soil and turf in different states (green, yellow, brown), compared to Extreme Learning Machine (ELM) and eXtreme Gradient Boosting (XGB). For greenness discrimination, the Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) proved to be the most robust indicator of the four vegetation indices tested. K-means clustering analysis, considering the percentage of surface area occupied by each grass condition and VARI values, led to the determination of the four functional conditions. The monitoring system applied proved to be operational for the temporal characterization of the condition of the turf in an urban park, revealing significant differences between the areas of the park studied and identifying times when the turf was in poorer condition, allowing for the prioritization and focusing of irrigation and maintenance tasks.*

***Keywords**: grass condition, RGB cameras, greenness indices, supervised classification, K-means*

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de espacios verdes bien conservados se asocia a beneficios en salud, bienestar y uso social del espacio público, mientras que las áreas degradadas o con césped en mal estado tienden a generar una percepción de abandono y menor satisfacción con el entorno urbano (WHO, 2016). El aspecto visual

condiciona de forma directa la valoración que los usuarios hacen del parque.

Tradicionalmente, la evaluación del estado del césped se ha basado en la experiencia del personal de mantenimiento, lo que introduce un componente subjetivo y un sesgo del evaluador (Wang et. al., 2022). La utilización de tecnología ayuda a evitar esa subjetividad, a mejorar la calidad del césped y a poder evaluar y detectar necesidades imprevistas (Parra et. al., 2024).

Frente a enfoques clásicos apoyados en sensores multiespectrales o satelitales, las cámaras RGB fijas permiten adquirir series temporales con una infraestructura mínima. Combinadas con índices de verdor basados en bandas visibles, permiten separar de forma robusta vegetación y suelo, estimar la cobertura verde y detectar estados de degradación del césped sin necesidad de disponer de banda en el infrarrojo cercano (Woebbecke *et al*., 1995; Meyer y Neto, 2008).

Las cámaras PhenoCam se utilizan desde hace años para seguir la fenología y el verdor de la vegetación en multitud de ecosistemas, empleando indicadores como el Green Chromatic Coordinate (GCC) calculado directamente a partir de los valores RGB (Richardson *et al*., 2018). Estas cámaras tienen un precio elevado que hay que tener en consideración.

El objetivo del presente trabajo es presentar y mostrar la operatividad de un sistema de monitorización del estado del césped en un parque urbano basado en cámaras RGB fijas de bajo coste.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Adquisición de imágenes, preprocesado e interpretación visual

En el Parque Universidad de la ciudad de Huesca (España), se instalaron dos cámaras RGB de bajo coste en dos zonas diferenciadas. Ambas se orientaron de forma fija hacia superficies de césped sometidas a condiciones reales de uso y riego. Las cámaras adquirieron una imagen diaria, a mediodía solar, desde el 07 de marzo de 2024 hasta el 23 de agosto de 2024 una de ellas y hasta el 24 de septiembre de 2024 la otra. En total se obtuvieron 372 imágenes, 170 y 202 respectivamente. La serie temporal de imágenes cubre el periodo de máxima actividad vegetativa y las fases de mayor estrés hídrico. Estas imágenes se preprocesaron y clasificaron según diferentes estados del césped siguiendo la metodología que se explica a continuación.

La cámara RGB genera imágenes en formato jpg sin coordenadas. A cada imagen se le asignaron coordenadas EPSG:25830 (ETRS89 / UTM huso 30N) y posteriormente se exportaron al formato GeoTIFF. Una interpretación visual inicial llevo a identificar 5 clases temáticas siempre presentes en cada imagen a clasificar: césped verde, césped amarillo, césped marrón, suelo desnudo y otros.

2.2. Clasificación

2.2.1. Extracción de valores RGB y construcción del conjunto de entrenamiento

Se seleccionó un subconjunto de 10 imágenes de cada cámara: 1 imagen por mes para los meses de marzo, abril, mayo y septiembre; y de 2 imágenes para los meses de junio, julio, agosto y septiembre, lo que aseguraba capturar la variabilidad asociada a condiciones de mayor estrés. Las imágenes tienen un tamaño de 1920 x1440 pixeles y una resolución espacial de $\approx$ 3.5 mm. Mediante el plugin *Semi-Automatic Classification* de QGIS se digitalizaron Regiones de Interés (ROIs) para cada clase temática que se almacenaron en formato SHP. En cada imagen se tomaron 50 ROIs, 10 por clase, de 2 × 2 píxeles, proporcionando 40 píxeles por clase e imagen seleccionada. Se desarrolló un script en R que extraía los valores de RGB para cada ROI y asociaba estos valores a la clase temática correspondiente. Se obtuvo así el conjunto de datos de entrenamiento para la clasificación de las imágenes.

2.2.2. Modelos de clasificación supervisada

Sobre el conjunto de imágenes seleccionadas para entrenamiento se ajustaron tres modelos de clasificación supervisada en R, Random Forest (RF), Extreme Learning Machine (ELM) y eXtreme Gradient Boosting (XGB), utilizando los valores de las bandas R, G y B como variables predictoras y la clase temática como variable respuesta. Todos los pixeles de cada imagen quedaron clasificados en alguna de las 5 clases estudiadas.

La validación externa de los modelos se realizó con 2 imágenes de una cámara y 1 imagen de otra, elegidas al azar. La verdad terreno se obtuvo con el mismo procedimiento descrito en 2.2.1. Se confrontaron los datos predichos por el modelo con los reales para obtener los estadísticos, Fiabilidad global ($\hat{F}$), Fiabilidad del Usuario (FU) y del Productor (FP), el índice Kappa (κ) y Exactitud balanceada media (EBM). Seleccionado el mejor modelo, se aplicó a las 372 imágenes disponibles, obteniéndose el porcentaje de superficie correspondiente a cada una de las cinco clases.

2.3. Análisis del estado del césped

2.3.1. Cálculo de índices de verdor

Se calcularon 4 índices de verdor (Tabla 1) empleando las bandas RGB previa eliminación de los pixeles clasificados como clase "otros" por el ruido que pudieran generar. Para cada imagen y cada índice se obtuvo un valor medio del índice, representativo del estado general del césped en cada fecha.

Tabla 1. Índices de verdor utilizados en el estudio.

Nombre	Abrev.	Ecuación	Referencia
Excess Green Index	ExG	2G–R–B	Woebbecke et al.,1995
Green Chromatic Coordinate	GCC	G/(R+G+B)	Gillespie et al., 1987
Green Leaf Index	GLI	(2G-R-B)/ (2G+R+B)	Louhaichi et al., 2001
Visible Atmospherically Resistant Index	VARI	(G-R)/((G+R-B)	Gitelson et al., 2002

Se analizó la relación entre índice y porcentaje de césped verde, mediante inspección visual de las series

temporales y análisis de correlación. Esto permitió escoger el índice más adecuado para valorar el estado del césped.

2.3.2. Análisis de agrupamiento para diferenciar distinto estados

Para la clasificación de las imágenes en grupos interpretables como estados funcionales del césped, se realizó un análisis de agrupamiento no supervisado K-medias en R. Las variables de entrada, para cada imagen, fueron el porcentaje de suelo desnudo, de césped marrón, amarillo y verde y el valor medio del índice seleccionado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Modelos de clasificación

La Tabla 2 muestra los estadísticos $\hat{F}$, κ y EBM de los tres modelos evaluados. En términos generales, RF fue el modelo con mejor comportamiento, con una exactitud global de 78 %, un coeficiente Kappa en torno a 0,67 y la mayor exactitud balanceada media entre clases. El modelo ELM presenta valores muy parecidos a RF, aunque ligeramente inferiores. El modelo XGB presenta valores inferiores a los otros dos modelos.

Tabla 2. Estadísticos Fiabilidad global ($\hat{F}$), índice Kappa (κ) y Exactitud balanceada media (EBM) de los modelos evaluados.

Modelo	$\hat{F}$	κ	EBM
RF	0,78	0,67	0,84
ELM	0,78	0,66	0,83
XGB	0,72	0,59	0,80

En cuanto al comportamiento de los modelos para cada clase de césped, RF es el que mejor discrimina la clase césped verde, y la clase césped amarillo cuando se considera que lo importante es detectar todo el amarillo (Tabla 3). En el caso de la clase marrón, RF es el que peor la discrimina en general, siendo el modelo ELM el mejor.

La clasificación con RF es la adoptada para determinar el % de césped verde, amarillo y marrón en cada imagen.

Tabla 3. Fiabilidad del Usuario (FU) y del Productor (FP) de los modelos evaluados para cada una de las clases.

	FU			FP		
	RF	ELM	XGB	RF	ELM	XGB
Otros	71,4	54,5	80,0	62,5	66,7	50,0
Suelo	80,0	75,0	70,0	80,0	90,0	70,0
Marrón	54,5	69,6	51,5	46,2	61,5	65,4
Amarillo	60,6	87,5	50,0	90,9	63,6	72,7
Verde	95,4	81,6	94,7	87,3	87,3	76,1

3.2. Estado del césped

De los 4 índices de verdor aplicados, el que mejor relación presentó con el porcentaje de suelo cubierto por césped verde fue el índice VARI con un R^2 de 0,62, seguido de GCC con 0,55, después GLI con 0,53, siendo el ExG con un R^2 de 0,13 el que peor funcionó. Este resultado llevó a elegir VARI para el estudio.

El análisis K-medias sobre el conjunto de imágenes dio lugar a cuatro grupos de estados funcionales del césped (Figura 1):

Estado 1: Césped muy seco o estresado. Caracterizado por una alta proporción de césped marrón, valores muy bajos de VARI y reducida presencia de suelo desnudo. El césped continúa cubriendo el terreno, pero el tejido vivo es escaso y domina el material seco.

Estado 2: Césped muy degradado con amarilleo generalizado. Presenta un porcentaje elevado de césped amarillo, combinado con una fracción significativa de marrón y un ligero incremento del suelo desnudo. VARI es igualmente muy bajo. Representa situaciones de cobertura todavía apreciable, pero con un estado claramente deteriorado.

Estado 3: Césped en buen estado. Se caracteriza por un porcentaje alto de césped verde, con valores reducidos de suelo desnudo y de tejido amarillo y marrón. Los valores de VARI son elevados, coherentes con un buen estado vegetativo. Este grupo se interpreta como el estado de referencia de pradera sana.

Estado 4: Estado intermedio con claros y amarilleo. En este grupo el césped verde sigue siendo mayoritario, pero aparecen porcentajes significativos de suelo desnudo y césped amarillo. VARI mantiene valores relativamente altos, aunque inferiores a los del estado 3. Se trata de un estado de degradación moderada, donde el césped tiene un aspecto correcto, pero presenta heterogeneidad y pérdida parcial de cobertura.

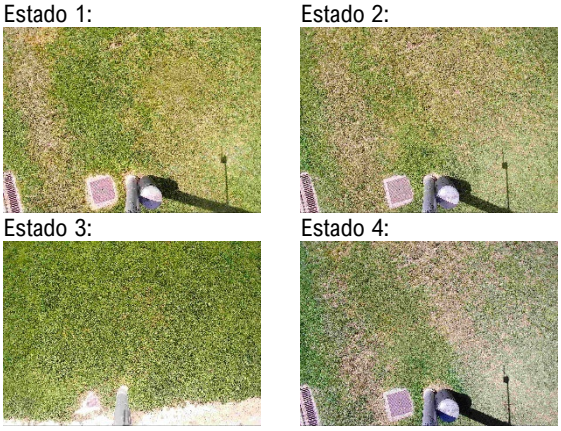


Figura 1. Ejemplo de imágenes de diferentes estados del césped.

En la comparativa entre zonas se detectó que en una de ellas alrededor del 80 % de las imágenes se asignaron al estado 3 (césped en buen estado), con una presencia limitada del estado intermedio (estado 4) y una proporción reducida (en torno al 9 %) de estados muy degradados (estados 1 y 2). Esto indica que, en términos

generales, el césped en esta zona mantiene una cobertura y un verdor adecuados durante la mayor parte del periodo analizado.

En la otra zona, sin embargo, la situación se invierte. Aproximadamente el 75 % de las imágenes se clasificaron en los estados más degradados (1 y 2), mientras que el césped en buen estado (estado 3) fue minoritario. Esta distribución apunta a una mayor prevalencia de estrés y degradación del césped, con predominio de tejido amarillo y marrón y, en algunos casos, ligera pérdida de cobertura.

Estas diferencias son especialmente patentes en los meses de verano, cuando la mayor demanda evapotranspirativa pone de manifiesto las diferencias tanto en la calidad del riego y como en la resiliencia del césped.

4. CONCLUSIONES

El estudio demuestra que es posible implementar un sistema operativo de monitorización del césped en un parque urbano basado en cámaras RGB fijas de bajo coste, integrado con SIG y técnicas de aprendizaje automático, capaz de proporcionar información cuantitativa y reproducible.

La clasificación supervisada utilizando modelos como RF, ELM y XGB permite estimar, para cada imagen, los porcentajes de suelo desnudo y de césped en distintos estados (verde, amarillo, marrón), proporcionando una descripción cuantitativa del estado de la pradera.

Entre los índices de verdor calculados a partir de bandas visibles, el VARI muestra la mejor relación con el porcentaje de césped verde, demostrando capacidad para discriminar entre césped sano y degradado.

El análisis de agrupamiento K-medias permite definir cuatro estados funcionales del césped, desde un estado de buen vigor hasta estados de estrés y degradación severa, caracterizados por diferentes combinaciones de porcentaje de superficie ocupada por césped verde, amarillo, marrón y valores de VARI. Esta clasificación facilita la interpretación de series largas de imágenes y la identificación de zonas problemáticas.

La comparación entre las zonas monitorizadas revela patrones contrastados: mientras que una zona presenta mayoritariamente un césped en buen estado, la otra se encuentra dominada por estados degradados. Esta información resulta de utilidad para priorizar actuaciones de mejora del riego y del manejo en aquellas áreas con peor comportamiento.

En conjunto, los resultados indican que los sistemas de bajo coste basados en imágenes RGB e índices de verdor derivados de ellas e integrados con técnicas de inteligencia artificial, constituyen una alternativa robusta y reproducible para el seguimiento del césped en zonas verdes urbanas, complementaria a las evaluaciones de campo tradicionales. La clasificación propuesta se está validando mediante encuestas a la población, lo que permitirá alinear los estados definidos en este trabajo con la percepción ciudadana del estado del césped.

5. AGRADECIMIENTOS

La publicación es parte del proyecto TED2021-131666A-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR.

6. REFERENCIAS

Gillespie, A. R., Kahle, A. B., & Walker, R. E. (1987). Color enhancement of highly correlated images. II. Channel ratio and “chromaticity” transformation techniques. *Remote Sensing of Environment, 22*(3), 343–365. https://doi.org/10.1016/0034-4257(87)90088-5

Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote sensing of Environment, 80*(1), 76-87. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

Louhaichi, M., Borman, M. M., & Johnson, D. E. (2001). Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. Geocarto *International, 16*(1), 65–70. https://doi.org/10.1080/10106040108542184

Meyer, G. E., & Neto, J. C. (2008). Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and electronics in agriculture, 63*(2), 282-293. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.07.003

Parra, L., Ahmad, A., Zaragoza-Esquerdo, M., Ivars-Palomares, A., Sendra, S. y Lloret, J. (2024). Un estudio completo de drones para el monitoreo de césped. *Drones, 8* (10), 563. https://doi.org/10.3390/drones8100563

Richardson, A. D., Hufkens, K., Milliman, T., Aubrecht, D. M., Chen, M., Gray, J. M., ... & Frolking, S. (2018). Tracking vegetation phenology across diverse North American biomes using PhenoCam imagery. *Scientific data, 5*(1), 1-24. https://10.1038/sdata.2018.28

Wang, T., Chandra, A., Jung, J., & Chang, A. (2022). UAV remote sensing-based estimation of green cover during turfgrass establishment. *Computers and electronics in agriculture, 194*, 106721. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106721

Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Von Bargen, K., & Mortensen, D. A. (1995). Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE, 38*(1), 259-269. https://doi.org/10.13031/2013.27838

World Health Organization (WHO). (2016). Urban green spaces and health (Nº. WHO/EURO: 2016-3352-43111-60341). World Health Organization. Regional Office for Europe. https://www.who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2016-3352-43111-60341

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.133

Cartografía y análisis de la Interfaz Urbano-Forestal en Chile

Gelabert Vadillo, Pere [1] **Félez Bernal, Jorge** [2] **Crespo Pérez, Rodrigo** [3] **Alcasena Urdioz, Fermín** [4] **Rodrigues Mimbrero, Marcos** [3]

[1] Universitat de Lleida

[2] Universidad de Concepción

[3] Universidad de Zaragoza

[4] Universidad Pública de Navarra

ORCID: Gelabert Vadillo 0000-0001-8020-4932 Félez Bernal 0000-0003-1105-9414 Crespo Pérez 0009-0003-5960-8766 Alcasena Urdioz 0000-0002-2007-9487 Rodrigues Mimbrero 0000-0002-0477-0796

Correspondencia: perejoan.gelabert@udl.cat jfelez@udec.cl r.crespo@unizar.es fermin.alcasena@unavarra.es rmarcos@unizar.es

RESUMEN

Este estudio desarrolla un marco reproducible para cartografiar la Interfaz Urbano-Forestal (WUI) a escala local usando datos globales abiertos, aplicado en Chile. La metodología integra información espacial sobre la presencia de edificaciones y la altura, cobertura y continuidad de la masa de combustible para clasifica el territorio en WUI-Interface y WUI-Intermix. La solidez se evalúa mediante un análisis de sensibilidad con 12 combinaciones de los parámetros, del cual se deriva un índice de intensidad y acuerdo de clasificación. Los resultados muestran que el 6,5% de las viviendas en Chile (890.884 edificaciones) se ubican en la WUI. Destacan los sectores de La Araucanía, Los Lagos y Bío-Bío por la exposición asociada a continuidad de combustibles, mientras que en la Región Metropolitana predomina un patrón vinculado mayormente a la densidad de población y a la expansión urbana.

Palabras clave: *WUI, datos abiertos, Riesgo de incendio*

Fecha de recepción: 7 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 7 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Cartografía y análisis de la Interfaz Urbano-Forestal en Chile

Gelabert Vadillo, Pere [1], Félez Bernal, Jorge [2], Crespo Pérez, Rodrigo [3], Alcasena Urdioz, Fermín [4], Rodrigues Mimbrero, Marcos [3]

[1] Universitat de Lleida.

0000-0001-8020-4932, perejoan.gelabert@udl.cat.

[2] Universidad de Concepción.

0000-0003-1105-9414, jfelez@udec.cl.

[3] Universidad de Zaragoza.

0009-0003-5960-8766, r.crespo@unizar.es; 0000-0002-0477-0796, rmarcos@unizar.es.

[4] Universidad Pública de Navarra.

0000-0002-2007-9487, fermin.alcasena@unavarra.es.

Resumen: Este estudio desarrolla un marco reproducible para cartografiar la Interfaz Urbano-Forestal (WUI) a escala local usando datos globales abiertos, aplicado en Chile. La metodología integra parámetros espacializados sobre la presencia de edificaciones y la altura, cobertura y continuidad de la masa de combustible para clasificar el territorio en WUI-Interface y WUI-Intermix. La solidez se evalúa mediante un análisis de sensibilidad con 12 combinaciones de los parámetros, del cual se deriva un índice de intensidad y acuerdo de clasificación. Los resultados muestran que el 6,5% de las viviendas en Chile (890.884 edificaciones) se ubican en la WUI. Destacan los sectores de La Araucanía, Los Lagos y Bío-Bío por la exposición asociada a continuidad de combustibles, mientras que en la Región Metropolitana predomina un patrón vinculado mayormente a la expansión urbana.

Palabras clave: WUI, datos abiertos, Riesgo de incendio

Mapping and analysis of the Wildland-Urban Interface in Chile

***Abstract**: This study develops a reproducible framework to map the Wildland-Urban Interface (WUI) at a local scale using open global data, which has been applied in Chile. The methodology integrates geospatial data on buildings, canopy cover and height, and forest fragmentation, for classifying the territory into WUI-Interface and WUI-Intermix. The reliability of the method is evaluated through a sensitivity analysis with 12 parameter combinations, from which an intensity and classification agreement index is derived. The results show that 6.5% of housing in Chile (890,884 buildings) is located within the WUI, with a high concentration in the south-central region. La Araucanía, Los Lagos, and Bío-Bío stand out for exposure associated with fuel continuity, while in the Metropolitan Region, the pattern is mostly linked to population density and urban fabric expansion.*

***Keywords**: WUI, Open data, wildfire risk*

1. INTRODUCCIÓN

La Interfaz Urbano-Forestal (WUI) se define de forma genérica como la zona donde los asentamientos de población se encuentran en contacto con la masa forestal. Este espacio concentra la mayor exposición al riesgo y, por ende, la pérdida de vidas, infraestructuras y propiedades a causa de los incendios forestales.

Para realizar un análisis efectivo de este espacio, la literatura científica distingue habitualmente entre dos tipologías fundamentales: WUI-Intermix y WUI-Interface. El WUI-Intermix engloba aquellas áreas donde las viviendas dispersas se entremezclan con vegetación continua. Por el contrario, la WUI-Interface identifica zonas donde los asentamientos se encuentran a una distancia cercana de parches grandes y contiguos de vegetación (Bar-Massada *et al*., 2023; Schug *et al*., 2023). En esta última tipología, los asentamientos quedan expuestos principalmente a la caída de brasas o pavesas, mientras que el WUI-Intermix sería potencialmente afectado por llamas.

Aunque la WUI ha sido ampliamente estudiada y cartografiada en regiones como Norteamérica y Europa, investigaciones recientes demuestran que es un fenómeno global que cubre el 4.7% de la superficie terrestre y afecta a 3.5 mil millones de personas y en el contexto de América del Sur, la WUI ocupa

aproximadamente el 3% del territorio (Schug *et al*., 2023). Específicamente en Chile, se han detectado vínculos críticos entre las áreas quemadas en incendios recientes y la población residente dentro de la WUI, lo que subraya la urgencia de contar con cartografía precisa para la gestión del riesgo (Sarricolea *et al*., 2020).

En este escenario, la teledetección y el uso de herramientas abiertas ofrecen una oportunidad estratégica para delimitar y cartografiar la WUI de manera consistente (Li *et al*., 2022). El acceso abierto a misiones satelitales globales (p. ej., Landsat y Sentinel), junto con productos derivados y plataformas de procesamiento y lenguajes de programación (GEE, R, Python), permite generar cartografías comparables entre regiones, lo que resulta especialmente relevante en países con alta heterogeneidad territorial, donde la disponibilidad de información detallada sobre viviendas, cobertura vegetal o estructura del dosel suele ser limitada (Radočaj *et al*., 2020).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El objetivo central de esta investigación es el desarrollo de un marco metodológico para cartografiar la WUI a escala local mediante la integración de conjuntos de datos globales abiertos, ejemplificado en Chile continental. Para ello, se han seleccionado cuatro fuentes de información: la cobertura forestal obtenida del *Global Forest Cover Change 2015* a 30 metros de resolución (Townshend, 2016), la localización de unidades habitacionales mediante *Google Open Buildings* (Sirko *et al*., 2021), la altura del dosel derivada del *Global Forest Canopy Height 2019* (Potapov *et al*., 2021) y la identificación de fragmentos forestales a través de *ESA WorldCover 2021* (Zanaga *et al*., 2022). Esta combinación de datos permite un análisis detallado de la estructura del paisaje y la presencia de edificaciones expuestas al riesgo de incendios.

Para la delimitación de la WUI, se han adaptado las definiciones del National Institute of Standards and Technology (NIST) de los Estados Unidos, clasificando el territorio en dos categorías. La categoría WUI-Intermix se caracteriza por una cobertura forestal (FC) superior al 50% y una densidad de viviendas (HD) que supere las 6,18 unidades por km². Por otro lado, la WUI-Interface identifica áreas donde la cobertura forestal es menor al 50% pero que mantienen la misma densidad habitacional y altura de arbolado, siempre que se encuentren a una distancia inferior a 2 km de una masa forestal cuya superficie sea de al menos 5 km².

Con el fin de evaluar la variabilidad en la clasificación de las interfases y el riesgo intrínseco asociado, se han analizado 12 combinaciones de parámetros, variando los umbrales de cobertura forestal (40%, 50% y 60%) y de altura (2 m, 3 m, 4 m y 5 m). A partir de este análisis de sensibilidad, se ha derivado un índice de persistencia para cada categoría, el cual se calcula contabilizando el número de veces que una celda es clasificada como WUI-Intermix o WUI-Interface dentro de las combinaciones ejecutadas, siguiendo las ecuaciones 1 y 2.

$$WUIface_{persistencia} = \frac{n.\ veces\ categorizado\ WUIntermix}{12} \quad (1)$$

$$WUImix_{persistencia} = \frac{n.\ veces\ categorizado\ WUIntermix}{12} \quad (2)$$

Por otro lado, se ha realizado un análisis estadístico zonal con el fin de cuantificar la magnitud de la WUI en cada una de las regiones chilenas. En particular, se estima el número de viviendas clasificadas en las categorías WUI-Interface y WUI-Intermix, junto con el porcentaje de acuerdo de clasificación obtenido a partir del índice de persistencia derivado del análisis de sensibilidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis a escala nacional (Fig. 1 y 2) cuantifica que el 6,5% del total de viviendas en Chile se encontraría actualmente dentro de la Interfaz Urbano-Forestal (Gelabert *et al*., 2025), lo que equivale a 890.884 edificaciones expuestas directamente al riesgo de incendios forestales, aproximadamente el doble si se compara con el resto de países de Latinoamérica (Schug *et al*., 2023). Esta exposición no se distribuye de forma homogénea, sino que se concentra principalmente en el centro-sur del país, en concordancia con la distribución de las masas forestales y la transición latitudinal de las formaciones vegetales. Este gradiente ecológico no solo estructura el paisaje, sino que también condiciona la continuidad de combustibles, el comportamiento del fuego y, en consecuencia, los niveles de exposición estructural observados.

En la Región del Bío-Bío, dominada históricamente por bosques caducifolios de roble y raulí, gran parte de la cobertura nativa ha sido reemplazada por plantaciones homogéneas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, aumentando la propagación del fuego. La región concentra 94.832 edificaciones en interfaz (40 % de las viviendas con alta persistencia) y 33.606 en WUI-intermix (68 % de las viviendas con alta persistencia), confirmando un patrón consistente de exposición. La Araucanía es la región con mayor cantidad de viviendas en interfaz (175.293) y altos niveles de persistencia en la categorización (50 % de las edificaciones), hecho que puede indicar límites difusos entre interfaz y WUI-intermix. En WUI-intermix, registra 43.239 viviendas, de las cuales 83 % presentan alta persistencia, y la mitad alcanza 100 % de persistencia, evidenciando un patrón espacial sólido. Los Lagos, región dominada por Bosque Laurifolio, muestra la mayor concentración de viviendas en WUI-intermix (54.077) donde cerca de la mitad de las viviendas presenta 100 % de persistencia. En interfaz, registra 109.119 viviendas, consolidándose como una de las áreas de mayor exposición estructural. Aunque el centro-sur concentra los valores máximos de exposición, la Región Metropolitana de Santiago presenta 82.864 viviendas expuestas, principalmente en interfaz. Aquí, la exposición responde más a la expansión urbana en bordes de cerros y sectores de vegetación esclerófila (Janubová & Gress, 2016) que a la propia continuidad forestal (Fig. 2)

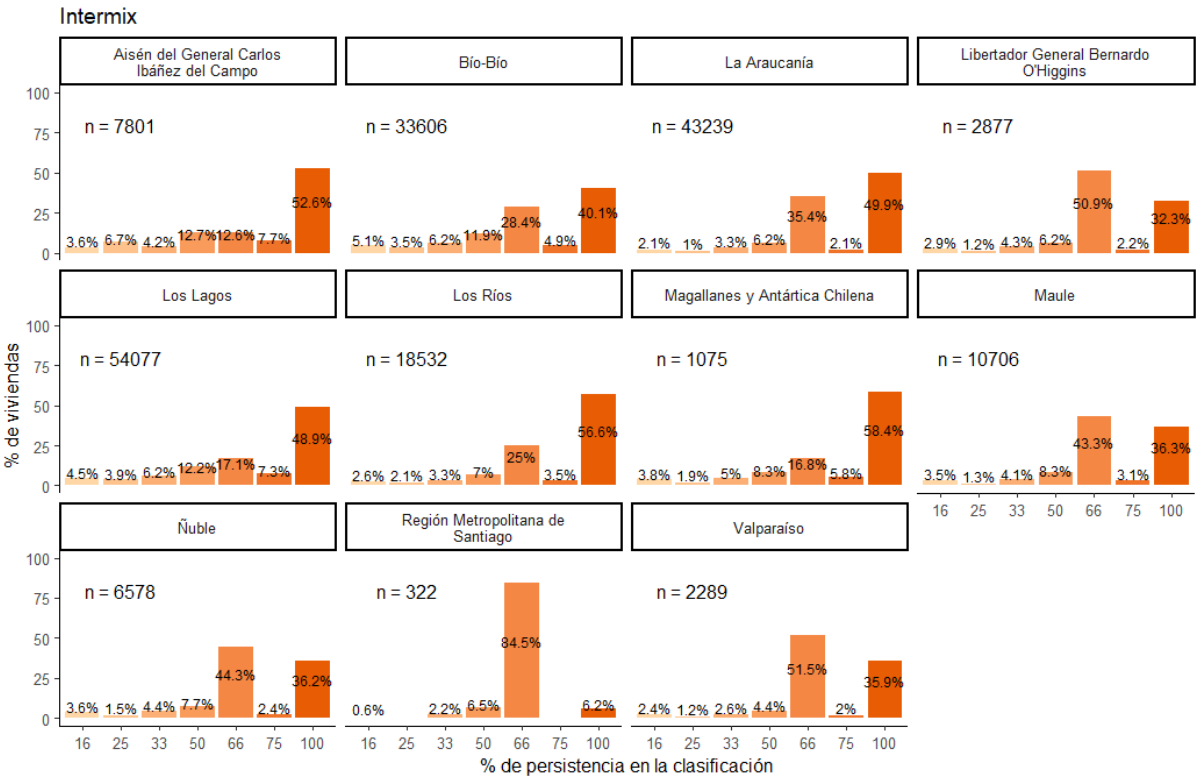


Figura 1: Viviendas dentro de la WU-WUI-intermix y su grado de acuerdo en la clasificación.

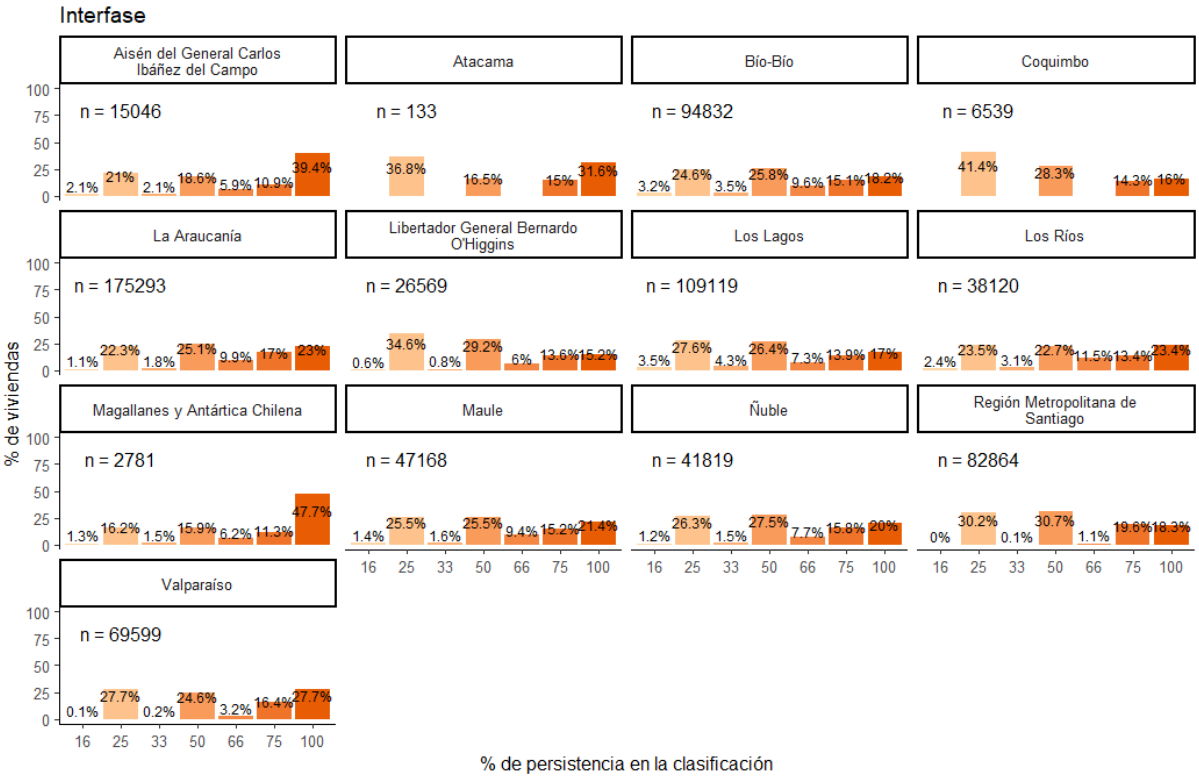


Figura 2: Viviendas dentro de la WU-Interfase y su grado de acuerdo en la clasificación

Finalmente, cabe mencionar que este estudio presenta limitaciones asociadas a la validación de resultados, la cual resulta compleja debido a la falta de información nacional homogénea y actualizada a escala de vivienda, y a la presencia de zonas urbanas no reguladas (conocidas como "tomas"). Asimismo, los resultados

están condicionados por limitaciones inherentes a los sensores satelitales ópticos, particularmente en la resolución espacial y en su capacidad para caracterizar con precisión la estructura forestal. A ello se suma la desalineación temporal entre productos, dado que las fuentes empleadas pueden corresponder a años distintos, introduciendo incertidumbre en la estimación de la exposición de viviendas frente al fuego. Estas limitaciones podrían reducirse en trabajos futuros mediante el uso complementario de sensores activos, así como con la incorporación de cartografía de viviendas y censos de población armonizados. Además, propuestas metodológicas como la planteada, pueden incidir en la implementación de una nueva Ley chilena de Incendios que avanza sus procesos legislativos con urgencia dadas las recientes catástrofes en el Bío-Bío.

4. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos "Developing a framework for assessing the wildfire risk at local scale" financiado por el AXA Research Fund, y los proyectos FyreCycle (CNS2023-144228) y FLARE (PID2023-148568OB-I00) en la que se inscribe también la beca predoctoral PRE2023-UZ-21, financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal de Investigación (MICIU/AEI/10.13039/501100011033/) y fondos NextGenerationEU/PRTR.

5. REFERENCIAS

Bar-Massada, A., Alcasena, F., Schug, F., & Radeloff, V. C. (2023). The wildland – urban interface in Europe: Spatial patterns and associations with socioeconomic and demographic variables. *Landscape and Urban Planning*, *235*, 104759. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104759

Janubová, B., & Gress, M. (2016). Urbanization of poverty and the sustainable development of urban areas in Chile. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, *11*(4), 17-29.

Li, S., Dao, V., Kumar, M., Nguyen, P., & Banerjee, T. (2022). Mapping the wildland-urban interface in California using remote sensing data. *Scientific Reports*, *12*(1), 5789. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09707-7

Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M. C., Kommareddy, A., Pickens, A., Turubanova, S., Tang, H., Silva, C. E., Armston, J., Dubayah, R., Blair, J. B., & Hofton, M. (2021). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, *253*, 112165. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165

Radočaj, D., Obhođaš, J., Jurišić, M., & Gašparović, M. (2020). Global Open Data Remote Sensing Satellite Missions for Land Monitoring and Conservation: A Review. *Land*, *9*(11), 402. https://doi.org/10.3390/land9110402

Sarricolea, P., Serrano-Notivoli, R., Fuentealba, M., Hernández-Mora, M., De La Barrera, F., Smith, P., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2020). Recent wildfires in Central Chile: Detecting links between burned areas and population exposure in the wildland urban interface. *Science of The Total Environment*, *706*, 135894. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135894

Schug, F., Bar-Massada, A., Carlson, A. R., Cox, H., Hawbaker, T. J., Helmers, D., Hostert, P., Kaim, D., Kasraee, N. K., Martinuzzi, S., Mockrin, M. H., Pfoch, K. A., & Radeloff, V. C. (2023). The global wildland–urban interface. *Nature*, *621*(7977), 94-99. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06320-0

Sirko, W., Kashubin, S., Ritter, M., Annkah, A., Bouchareb, Y. S. E., Dauphin, Y., Keysers, D., Neumann, M., Cisse, M., & Quinn, J. (2021). *Continental-Scale Building Detection from High Resolution Satellite Imagery* (Versión 2). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2107.12283

Townshend, J. (2016). *Global Forest Cover Change (GFCC) Tree Cover Multi-Year Global 30 m V003*. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/MEASURES/GFCC/GFCC30TC.003

Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Lesiv, M., Herold, M., Tsendbazar, N.-E., Xu, P., Ramoino, F., & Arino, O. (2022). *ESA WorldCover 10 m 2021 v200* (Versión v200) [Dataset]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/ZENODO.7254221

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.134

ForestMap-IA, Digitalización forestal y sensores remotos orientada a fomentar la gestión forestal sostenible

Tomé Morán, José Luis [1] **Esteban Cava, Jessica** [1] **Bravo Núñez, Andrés** [1,2] **González González, Isabel** [1] **Ranz Vega, Pedro Pablo** [1] **Martín Alcón, Santiago** [1]

[1] Agresta S. COOP., España

[2] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universitat Politècnica de València.

ORCID: Tomé Morán 0000-0003-2298-9115 Esteban Cava 0000-0001-8350-5343 Bravo Núñez 0009-0003-6650-3487 González González 0009-0002-1455-9174 Martín Alcón 0000-0002-5327-5695

Correspondencia: jltome@agresta.org jesteban@agresta.org abravo@agresta.org igonzalez@agresta.org pranz@agresta.org smalcon@agresta.org

RESUMEN

La monitorización de bosques con sensores remotos ha dado un salto enorme en los últimos 10 años, hasta el punto de que una pequeña cooperativa como Agresta puede desarrollar una plataforma como ForestMap-IA. En el contexto actual es posible pasar de inventarios estáticos a un sistema operativo, que integra sensores remotos e Inteligencia Artificial para monitorización forestal a escala nacional. Trabajando con datos abiertos es posible realizar inventarios forestales de alta resolución, con una alta precisión, generando información de las principales variables forestales en tiempo casi real. Esto demuestra que la principal barrera que tenemos hoy día para la monitorización del patrimonio forestal nacional no es la tecnología, sino el gap existente entre el coste de la tecnología y la rentabilidad de las explotaciones forestales. En este sentido, la administración pública puede ser un agente tractor, desarrollando modelos participativos inspirados en el éxito finlandés (Metsään.fi). Una plataforma nacional impulsada por el estado, no solo permitiría el acceso de pequeños propietarios a la tecnología, sino que podría simplificar la gestión de los aprovechamientos forestales facilitando la trazabilidad y el cumplimiento del reglamento EUDR. Este impulso institucional seria clave para transformar la innovación tecnológica en una herramienta operativa que fomente la gestión activa de nuestros bosques.

Palabras clave: *Inventario Dinámico, Bioeconomía Circular, Aprendizaje automático, LIDAR, Sentinel2*

Fecha de recepción: 7 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 7 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

ForestMap-IA, Digitalización forestal y sensores remotos orientada a fomentar la gestión forestal sostenible

Tomé Morán, José Luis [(1)], Esteban Cava, Jessica [(1)], Bravo Núñez, Andrés [(1,2)], González González, Isabel [(1)], Ranz Vega, Pedro Pablo [(1)], Martín Alcón, Santiago [(1)]

[(1)] Agresta S. COOP., España.

[(2)] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universitat Politècnica de València.

0000-0003-2298-9115, jltome@agresta.org ; 0000-0001-8350-5343, jesteban@agresta.org
0009-0003-6650-3487, abravo@agresta.org; 0009-0002-1455-9174, igonzalez@agresta.org
pranz@agresta.org ; 0000-0002-5327-5695, smalcon@agresta.org

Resumen: La monitorización de bosques con sensores remotos ha dado un salto enorme en los últimos 10 años, hasta el punto de que una pequeña cooperativa como Agresta puede desarrollar una plataforma como ForestMap-IA. En el contexto actual es posible pasar de inventarios estáticos a un sistema operativo, que integra sensores remotos e Inteligencia Artificial para monitorización forestal a escala nacional. Trabajando con datos abiertos es posible realizar inventarios forestales de alta resolución, con una alta precisión, generando información de las principales variables forestales en tiempo casi real. Esto demuestra que la principal barrera que tenemos hoy día para la monitorización del patrimonio forestal nacional no es la tecnología, sino el gap existente entre el coste de la tecnología y la rentabilidad de las explotaciones forestales. En este sentido, la administración pública puede ser un agente tractor, desarrollando modelos participativos inspirados en el éxito finlandés (Metsään.fi). Una plataforma nacional impulsada por el estado, permitiría el acceso de pequeños propietarios a la tecnología, y podría simplificar la gestión de los aprovechamientos forestales facilitando la trazabilidad y el cumplimiento del reglamento EUDR. Este impulso institucional seria clave para transformar la innovación tecnológica en una herramienta operativa que fomente la gestión activa de nuestros bosques.

Palabras clave: Inventario Dinámico, Bioeconomía Circular, Aprendizaje automático, LIDAR, Sentinel2

ForestMap-IA: Forest digitalization and remote sensing aimed at promoting sustainable forest management

***Abstract**: Forest monitoring through remote sensing has made a quantum leap over the last decade, to the point where a small cooperative like Agresta can develop a platform such as ForestMap-IA. In the current context, it is possible to transition from static inventories to a national-scale operating system that integrates remote sensing and Artificial Intelligence for nationwide monitoring. By leveraging open data, forest inventories can be conducted at a national scale in near real-time, generating reliable, high-resolution information on key forest variables. This demonstrates that the primary barrier to monitoring national forest heritage today is not technology, but rather the gap between the cost of technologies and the profitability of forest operations. In this regard, public administration can act as a driving force by adopting participatory models inspired by the Finnish success story (Metsään.fi). A state-driven national platform would not only grant smallholders access to technology but could also facilitate the management of forest harvesting, ensuring traceability and compliance with EUDR regulations. Such institutional momentum would be key to transforming technological innovation into an operational tool that fosters active management of our forest.*

***Keywords**: Dynamic Inventory, Circular Bioeconomy, Machine Learning, LIDAR, Sentinel2*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos diez años la combinación entre datos abiertos, aumento de la capacidad de computación y software libre ha democratizado la monitorización de ecosistemas forestales con sensores remotos.

Hemos pasado de la explotación de datos LiDAR combinados con datos de campo para el desarrollo de

inventarios a pequeña escala de manera experimental, a la trasferencia de estas metodologías a nivel operativo en todas las regiones españolas, pasando de escalas locales a trabajar a nivel regional.

La combinación de distintos sensores remotos a la hora de acometer en la actualidad inventarios forestales nos ha permitido combinar sus principales virtudes. De esta manera, aprovechamos el potencial se los datos LiDAR para caracterizar la estructura de la vegetación, combinándolos con los datos multiespectrales de satélites de alta resolución, como Sentinel 2, para identificar coníferas y frondosas, así como para identificar cambios en las masas forestales incorporando una componente dinámica al inventario forestal.

A nivel tecnológico, hoy por hoy disponemos de capacidades para monitorizar nuestros bosques casi en tiempo real y, sin embargo, seguimos muy lejos de que esto tenga un impacto directo en la gestión sostenible de nuestras masas forestales.

A través del presente artículo pretendemos presentar la plataforma ForestMAP-IA, disponible para uso público, que ejemplifica la trasferencia tecnológica de estos avances a un producto operativo capaz de caracterizar las masas forestales en todo el territorio nacional. Así mismo, pretendemos ilustrar como este desarrollo tecnológico no va a ser suficiente para fomentar la gestión sostenible de las masas forestales españolas sin un apoyo institucional que convierta estos desarrollos en herramientas prácticas y gratuitas para los propietarios forestales de cara a facilitarles la gestión. Finalmente, se sugiere un itinerario para una trasferencia tecnología practica con impacto real sobre el territorio forestal.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos de entrada

La plataforma de inventario dinámico desarrollada (https://forestmap.eu) combina distintos datos abiertos.

Se ha generado una base datos para el ajuste de los algoritmos de predicción de las principales variables forestales combinando datos del Inventario Forestal Nacional (IFN4 e Inventario del Norte) y sus correspondientes datos LiDAR. Para ello se han seleccionado las parcelas del IFN con más del 80 % de área basimétrica de la especie principal y se han recalculado sus valores por ha para un radio de 11,3 m (equivalente al pixel de 400 m2 de Sentinel 2). Estos datos se han enriquecido con la extracción de las métricas LiDAR de la superficie correspondiente a la parcela a partir del vuelo del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) más cercano en el tiempo.

Como base cartográfica se ha utilizado la Foto Fija del Mapa Forestal 2021, un producto nacional elaborado cada 3 años a partir del Mapa Forestal Español (MFE) más reciente en cada autonomía. La versión de 2021 incorpora los principales cambios debidos a perturbaciones (incendios, cortas, etc.) a partir de información suministrada por las propias comunidades al Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico y un análisis de cambios realizado mediante satélite.

Para mejorar la información de la Foto Fija, ForestMap-IA se apoya en las imágenes del satélite Sentinel-2 mediante una clasificación supervisada, diferenciando las principales especies forestales coníferas y frondosas.

Por último, y con objeto de detectar posibles cambios en las masas forestales, se utilizan series de imágenes temporales del programa Landsat, que lleva observando la Tierra desde hace más de cuarenta años.

2.2. Modelización e inferencia

Los resultados de inventario de ForestMAP-IA combinan distintas técnicas de modelado.

Por un lado, se utilizan los datos Sentinel-2 para generar una clasificación supervisada coníferas vs. frondosas. Se generaron dos compuestos estacionales (primavera 2024 y otoño 2023), seleccionando esta última fecha para evitar la persistente cobertura nubosa en otoño de 2024. A partir de estos compuestos, se derivaron diversos índices espectrales de cara a capturar la fenología diferencial de ambos grupos de especies. Dada la heterogeneidad biogeográfica de España, se optó por una estratificación regional. Se definieron seis regiones de estudio (Centro, Levante-Baleares, Noreste, Norte, Sur y Canarias) inspiradas en las ecorregiones definidas por el Fondo Mundial de la Naturaleza (WWF).

Como muestra de entrenamiento se emplearon parcelas del IFN4, a excepción de la región Sur, donde se integraron datos de campo del proyecto CILIFO (Arellano-Pérez et al, 2025). En ambos casos, se seleccionaron masas con una dominancia superior al 90% y una FCC mínima del 60%. Ante el desbalanceo entre clases en ciertas regiones, se aplicó la técnica SMOTE (*Synthetic Minority Over-sampling Technique;* Chawla et al, 2002), la cual equilibra la muestra mediante la creación de casos sintéticos de la clase minoritaria basados en la distancia de los "vecinos más cercanos", evitando así el sobreajuste. La modelización se realizó mediante el algoritmo Random Forest, empleando la herramienta VSURF (*Variable Selection Using Random Forests;* Genuer et al, 2015) para la selección de las variables más relevantes, eliminando redundancias y mejorando la interpretabilidad del modelo final.

Los mosaicos generados de esta manera se integran en la plataforma y forman parte de la información utilizada para asignar la especie presente en cada pixel, corrigiendo la información de la Foto Fija en aquellos casos en los que hay incongruencia entre ambas.

De cara a analizar los cambios en las masas forestales el sistema utiliza la metodología desarrollada en el Grupo Operativo: Bosques 3.0 (Gónzalez et al, 2024). Mediante el algoritmo *CCDC* (Continuous Change Detection and Classification; Zhu y Woodcock, 2014), aplicado a series de imágenes satelitales Landsat. Se identifican las áreas de cambio semestralmente, incorporando esta información a la plataforma de procesado.

Se han estimado 8 variables forestales a partir de la base de datos campo-LiDAR: Altura dominante (Ho), Diámetro medio cuadrático (DG), Área basimétrica (G), Número de pies por hectárea (N), Volumen con corteza (V), Incremento de volumen (IAVC), Volumen sin corteza (VSC) y Volumen de leña (VLE).

Estos modelos se ajustan de forma específica por región de procedencia siguiendo las divisiones oficiales establecidas por el MITECO para la gestión del material forestal de reproducción (Figura 1). Excepcionalmente se han fusionado todas las regiones de procedencia de las Islas Canarias a efectos de la modelización. Finalmente se han ajustado un total de 490 modelos para todas las especies o grupos de especie que ocupan más de 500 ha por región de procedencia utilizando el algoritmo Random Forest (RF).



Figura 1. Distribución e identificador de las regiones de procedencia consideradas como unidad de análisis.

Con objeto de mejorar la predicción del modelo RF en los extremos del rango se ha ensamblado un segundo modelo de ROE (Belitz y Stackelberg, 2021) sobre el random forest que, usando la propia predicción del RF y algunas métricas LiDAR como covariables, corrige el encogimiento de los extremos y alinea las predicciones con los observados reduciendo el sesgo sistemático.

Finalmente, se ha aplicado la metodología de remuestreo *bootstrapping* (Esteban et al; 2022) para cuantificar la incertidumbre y el error estándar relativo de los modelos de volumen ajustados para cada estrato y región de procedencia.

2.3. Plataforma de interacción con usuarios.

Para optimizar la transferencia tecnológica y la explotación de los datos por parte de los usuarios, el sistema se ha integrado en la infraestructura de servicios en la nube ForestMap-IA. La arquitectura de datos se fundamenta en un sistema de gestión de bases de datos relacionales PostgreSQL, empleando la extensión espacial PostGIS para el almacenamiento y tratamiento avanzado de objetos geométricos y métricas forestales.

En cuanto a la interfaz de usuario (*frontend*), se ha implementado la librería geoespacial Leaflet, la cual permite una interacción fluida para la delimitación de áreas de estudio y la visualización de resultados cartográficos. El flujo de trabajo integra una pasarela de servicios que automatiza el procesamiento de datos LiDAR a demanda tras la validación de la solicitud, garantizando la generación de inventarios dinámicos en un entorno de tiempo cuasirreal.

Para reducir la brecha digital y facilitar la interacción con usuarios, la plataforma integra GAIA, un asistente conversacional basado en modelos de lenguaje de gran escala (LLM), que permite realizar consultas complejas mediante lenguaje natural, transformando los datos técnicos en decisiones operativas accesibles.

3. RESULTADOS

Se han ajustado 490 modelos para cada una de las 8 variables dependientes. Cada modelo se somete a un proceso de validación cruzada como promedio de 99 diferentes modelos ajustados con un 80 % de las parcelas de la muestra y validados sobre el 20 % de las parcelas restantes.

La bondad de ajuste de los modelos obtenidos, es muy variable en función de la heterogeneidad del estrato. En la Tabla 1 tenemos el promedio de las mismas variables para los 490 modelos ajustados.

Tabla 1. Promedio de los 490 modelos desarrollados para las variables de inventario ajustadas.

Variable	Min	Max	Sesgo (%)	RMSE (%)
Ho (m)	6,7	21,5	0,3	9,3
Dg (cm)	11,4	50,5	0,96	22,9
G (m²/ha)	4,1	57,5	0,50	32,9
N (pies/ha)	91,7	2214	-4,7	32,9
V (m³/ha)	16,2	367	-0,03	34,2
IAVC (m³/ha·año)	0,8	12,7	0,4	36,7
VSC (m³/ha)	12,1	300	-0,1	35,1
VLE (m³/ha)	1,7	34,7	0,4	37,0

En la tabla 2 se puede apreciar la exactitud alcanzada en las clasificaciones supervisadas coníferas frondosas para las distintas regiones analizadas.

Tabla 2. OA: Exactitud Global; PA F/C: Precisión Productor Frondosas/Coníferas. Muestras test: Centro: 2535; Norte: 1982; Levante: 1183; Sur: 1122; Noreste: 687; Canarias: 156.

Región	OA	Kappa	PA F	PA C
Levante	0,95	0,89	0,92	0,96
Noreste	0,94	0,88	0,94	0,94
Centro	0,93	0,86	0,92	0,94
Sur	0,91	0,83	0,89	0,93
Norte	0,90	0,79	0,93	0,86

La incertidumbre en volumen se ha publicado en el informe del proyecto a modo de ejemplo para la región de procedencia 5 y el estrato de pino silvestre se ha estimado un volumen de 10.996.165,32 m³ con un intervalo de confianza de entre 10.228.477,78 – 11.763.852,86 y un error relativo del 3,49 %.

Los algoritmos y modelos desarrollados se han integrado en una infraestructura de servicios geoespaciales diseñada para la monitorización forestal dinámica. El sistema permite la delimitación de unidades de gestión mediante múltiples métodos de entrada: digitalización manual, carga de geometrías externas o integración de parcelario catastral. Una vez definida el área de estudio,

la plataforma desencadena una secuencia de geoprocesos automatizados que ejecutan los modelos predictivos sobre las nubes de puntos LiDAR y series temporales de satélite correspondientes.

Entre los procesos que se ejecutan, se realiza una rodalización o teselación automática de la superficie del pedido que se basa en las capas raster de especie, clase de cobertura y clase de altura de la vegetación arbórea, dando lugar a teselas de vegetación homogénea en términos composicionales y estructurales, siempre y cuando estas tengan entidad suficiente (> 0,5 ha).

Tras completar el procesamiento, los resultados se centralizan en un panel de control personalizado donde el usuario puede gestionar y descargar la cartografía generada en formatos interoperables. Con el fin de optimizar la interpretación de los datos, la plataforma incorpora un cuadro de mando (*dashboard*) interactivo. Este entorno permite la exploración dinámica del inventario mediante el filtrado de métricas estructurales, la consulta en visor cartográfico y la generación de análisis estadísticos basados en las tablas y gráficos vinculados a la base de datos de inventario.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente trabajo son consistentes con los desarrollos realizados en el ámbito mediterráneo por diversos grupos de investigación y empresas especializadas en inventarios tecnológicos (Gómez et al., 2019). Esta convergencia de resultados confirma que la tecnología está madura para ser operativa en monitorización a escala nacional.

El desarrollo de ForestMap-IA demuestra que las políticas de datos abiertos actúan como catalizadores de beneficios económicos y científicos. La inversión en programas espaciales y aerotransportados se recupera mediante las sinergias generadas por la descarga y uso masivo de datos por parte del sector privado. Solo el programa Landsat, según el informe de 2023 del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), generó 25.600 millones de dólares ese mismo año. Según el *Copernicus Market Report* , la inversión de 8.200 millones de euros en el programa Copernicus generará un valor económico estimado de hasta 21.300 millones de euros.

Sin embargo, a pesar del avance tecnológico, la atomización de la propiedad forestal en España y la baja rentabilidad económica de muchas masas suponen una barrera crítica para la inversión privada en digitalización. En este escenario, es imperativo que la Administración Pública actúe como agente tractor, facilitando que tecnologías disponibles operativamente como ForestMAP-IA puedan llegar al propietario particular. La gestión forestal sostenible no debe entenderse como una necesidad estratégica para crear estructuras resilientes frente a grandes incendios y perturbaciones bióticas en un contexto de cambio climático.

Inspirándose en el éxito de plataformas como Metsään.fi en Finlandia, el apoyo institucional en España debería orientarse a la creación de un ecosistema digital participativo. La integración de herramientas de digitalización donde el propietario no solo sea un receptor de información, sino que pueda interactuar con sus datos georreferenciados para gestionar su bosque. Este sería ahora mismo el paso necesario para que la innovación tecnológica se traduzca en una verdadera dinamización del sector forestal español.

Este modelo permitiría no solo el acceso a datos precisos y actualizados, sino la integración de recomendaciones técnicas e itinerarios selvícolas vinculados a la provisión de servicios ecosistémicos. De la misma manera, la utilización de una plataforma estatal para gestionar la venta de madera en pie actuaría como un nodo central para garantizar la trazabilidad íntegra de las operaciones, facilitando de forma automatizada el cumplimiento de los estrictos requisitos de diligencia debida exigidos por el nuevo Reglamento de la UE sobre la deforestación (EUDR). Solo mediante este impulso gubernamental se podrá trasferir la tecnología disponible en una herramienta realmente útil para el propietario privado, que fomente la gestión activa y garantice la sostenibilidad de los ecosistemas forestales españoles.

5. AGRADECIMIENTOS

ForestMAP-IA ha sido financiado en la convocatoria 2024-2025 del Plan Integral de Impulso a la Economía Social (PIIES), dentro del P.R.T.R. NextGeneration-EU.

6. REFERENCIAS

Arellano-Pérez, S., Marino, E., Tomé, J. L., & Martín Alcón, S. (2025). Comparing different models for fuel load estimation in rockrose shrubland in the Mediterranean region from LiDAR data. *Revista AET, (66)*. https://doi.org/10.4995/raet.2025.22817

Beliz, K., & Stackelberg, P. E. 2021. Evaluation of six methods for correcting bias in estimates from ensemble tree machine learning regression models. *Environmental Modelling & Software, 139*, 105006. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105006

Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique. *J.A.I.R., 16*, 321–357. https://doi.org/10.1613/jair.953

Esteban, J., McRoberts, R., Fernández-Landa, A. y Tomé, J.L. (2022). Efectos de los errores de mapas en la incertidumbre de las estimaciones de volumen: un estudio de las principales especies forestales de la Rioja. 8º Congreso Forestal Español.

Genuer, R., Poggi, J.M., Tuleau-Malot, C. (2015). VSURF: an R package for variable selection using random forests. *The R Journal, 7*(2), 19-33. https://doi.org/10.32614/RJ-2015-018

González, I.; Tomé, J.L.; Salvador, M.; Esteban, J. 2024. Detección de cambios en terrenos certificados por PEFC en la provincia de Pontevedra utilizando el algoritmo CCDC. Actas del XX Congreso AET, pp. 195-198. 2024, Cádiz.

Gómez, C.; Alejandro, P.; Hermosilla, T.; Montes, F.; Pascual, C.; Ruiz, L.A.; Álvarez-Taboada, F.; Tanase, M.; Valbuena, R. 2019. Remote sensing for the Spanish forests in the 21st century: a review of

advances, needs, and opportunities. For Syst 28 (1), eR001.

Zhu, Z., Woodcock, C.E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment, 144*, 152–171. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.141

Ortofotografía urbana de muy alta resolución como apoyo a la gestión municipal: caso de estudio en la ciudad de Cáceres

Alvarez Llorente, Luis Antonio [1] **Cordero Montero, Faustino** [1] **Mariscal Yuste, Conchi** [1]

[1] Ayuntamiento de Cáceres, España

ORCID: Alvarez Llorente 0009-0006-5377-9160 Cordero Montero 0009-0001-5077-8764

Correspondencia: luisantonio.alvarez@ayto-caceres.es faustino.cordero@ayto-caceres.es conchi@ayto-caceres.es

RESUMEN

El artículo analiza la importancia de disponer de información georreferenciada precisa y actualizada para apoyar la toma de decisiones en la gestión urbana. En un contexto donde los fenómenos urbanos —como la movilidad, el uso del suelo, las infraestructuras o la prestación de servicios— están estrechamente vinculados al territorio, resulta imprescindible contar con datos de calidad y con una correcta geolocalización. Tradicionalmente, la cartografía vectorial ha sido la base para representar el espacio urbano, organizada en capas temáticas como redes viarias, parcelas, edificaciones o zonas verdes. En este marco, las ortofotografías se consolidan como una solución eficaz al proporcionar imágenes aéreas corregidas geométricamente que permiten realizar mediciones directas y observar el estado real del territorio en un momento determinado. Su carácter visual facilita la interpretación y aporta información complementaria a la cartografía clásica. Aunque históricamente las ortofotos se obtenían mediante vuelos tripulados o satélites, estas tecnologías presentan limitaciones por el coste y la resolución. El artículo plantea como alternativa el uso de UAV (drones), que permiten capturar imágenes de muy alta resolución a baja altura, con gran flexibilidad operativa y costes reducidos. Se presenta como caso de estudio el proyecto licitado por el Ayuntamiento de Cáceres para generar una ortofoto con GSD $\leq$ 2,5 cm, cubriendo más de 3.600 hectáreas del núcleo urbano y sus tres pedanías. La ortofoto se emplea además para identificar superficies con cubiertas de fibrocemento (amianto) y paneles fotovoltaicos mediante fotointerpretación. El trabajo de campo incluyó el uso de un dron ligero DJI Mini 4 Pro (250 g) con el que se tomaron algo más de 47.000 fotografías. La aerotriangulación automática y el procesamiento fotogramétrico permiten obtener un modelo de elevación de alta densidad. Los resultados evidencian la viabilidad técnica y utilidad de estas ortofotos como base para el SIG municipal, la actualización cartográfica y el análisis urbano detallado

Palabras clave: *Ortofotografía, UAV (drones), Gestión urbana, Fotogrametría, SIG municipal*

Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 9 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Ortofotografía urbana de muy alta resolución como apoyo a la gestión municipal: caso de estudio en la ciudad de Cáceres

Alvarez Llorente, Luis Antonio [1], Cordero Montero, Faustino [1], Mariscal Yuste, Conchi [1]

[1] Ayuntamiento de Cáceres, España.

0009-0006-5377-9160, luisantonio.alvarez@ayto-caceres.es

0009-0001-5077-8764, faustino.cordero@ayto-caceres.es.

conchi@ayto-caceres.es.

Resumen: El artículo analiza la importancia de disponer de información georreferenciada precisa y actualizada para apoyar la toma de decisiones en la gestión urbana. En un contexto donde los fenómenos urbanos, como la movilidad, el uso del suelo o las infraestructuras, están estrechamente vinculados al territorio, resulta imprescindible contar con datos de calidad y con una correcta geolocalización. Tradicionalmente, la cartografía vectorial ha sido la base para representar el espacio urbano, organizada en capas temáticas como redes viarias, parcelas, edificaciones o zonas verdes. En este marco, las ortofotografías se consolidan como una solución eficaz al proporcionar imágenes aéreas corregidas geométricamente que permiten realizar mediciones directas y observar el estado del territorio en un momento determinado. Su carácter visual facilita la interpretación y aporta información complementaria a la cartografía clásica. El artículo plantea como alternativa a los vuelos tripulados o satélites el uso de UAV (*drones*), que permiten capturar imágenes de muy alta resolución a baja altura, con gran flexibilidad operativa y costes reducidos. Se presenta como caso de estudio el proyecto licitado por el Ayuntamiento de Cáceres para generar una ortofoto con un tamaño de pixel ≤ 2,5 cm, cubriendo más de 3.600 hectáreas del núcleo urbano y sus tres pedanías. La ortofoto se emplea además para identificar superficies con cubiertas de fibrocemento (amianto) y paneles fotovoltaicos mediante fotointerpretación. El trabajo de campo incluyó el uso de un dron ligero DJI Mini 4 Pro (249 g) con el que se tomaron más de 47.000 fotografías. La aerotriangulación automática y el procesamiento fotogramétrico permiten obtener un modelo de elevación de alta densidad. Los resultados evidencian la viabilidad técnica y utilidad de estas ortofotos como base para el SIG municipal, la actualización cartográfica y el análisis urbano detallado.

Palabras clave: Ortofotografía, UAV (drones), Gestión urbana, Fotogrametría, SIG municipal

Very High-Resolution Urban Orthophotography as Support for Municipal Management: A Case Study in the City of Cáceres

Abstract: *The article analyses the importance of having accurate and up-to-date georeferenced information to support decision-making in urban management. In a context where urban phenomena, such as mobility, land use or infrastructure, are closely linked to the territory, the availability of high-quality data with proper geolocation is essential. Traditionally, vector cartography has been the basis for representing urban space, organised into thematic layers such as road networks, parcels, buildings, or green areas. Within this framework, orthophotography has become an effective solution by providing geometrically corrected aerial images that allow direct measurements and the observation of the actual state of the territory at a given time. Its visual nature facilitates interpretation and provides complementary information to traditional cartography. The article proposes the use of UAVs (drones) as an alternative to manned flights or satellites, as they allow the capture of very high-resolution images at low altitude, with great operational flexibility and reduced costs. As a case study, the project commissioned by the Municipality of Cáceres to generate an orthophoto with a pixel size ≤ 2.5 cm is presented, covering more than 3,600 hectares of the urban core and its three surrounding districts. The orthophoto is also used to identify surfaces with fibre-cement (asbestos) roofing and photovoltaic panels through photointerpretation. Fieldwork included the use of a lightweight DJI Mini 4 Pro drone (249 g), with which over 47,000 photographs were captured. Automatic aerotriangulation and photogrammetric processing made it possible to obtain a high-density elevation model. The results demonstrate the technical feasibility and usefulness of these orthophotos as a basis for the municipal GIS, cartographic updating, and detailed urban analysis.*

***Keywords**: Orthophotography, UAV (drones), Urban Management, Photogrammetry, Municipal GIS*

1. INTRODUCCIÓN

La toma de decisiones en la gestión urbana es un proceso complejo que exige un conocimiento profundo, preciso y actualizado del territorio. Los responsables políticos y técnicos deben comprender tanto la distribución espacial de los elementos urbanos como las dinámicas que en ellos se producen, con el fin de planificar y gestionar los recursos de manera eficiente y sostenible. Para ello, es imprescindible disponer de información fiable, estructurada y georreferenciada que describa de forma objetiva la realidad urbana.

La información, para que pueda transformarse en conocimiento, debe estar basada en la recopilación sistemática de datos de calidad. Estos datos deben cumplir una serie de requisitos fundamentales: han de ser precisos, estar actualizados en el tiempo y presentar una resolución espacial adecuada. En el contexto urbano, la dimensión espacial resulta especialmente relevante, ya que fenómenos como la movilidad, el uso del suelo, las infraestructuras o la gestión de servicios están estrechamente ligados a su localización.

La geolocalización de la información urbana requiere de una cartografía de calidad que represente de manera fiel y fiable la geometría y estructura de la ciudad. Tradicionalmente, esta representación se ha llevado a cabo mediante planos y mapas elaborados a partir de levantamientos topográficos y técnicas cartográficas clásicas, organizados en diferentes capas de información temática (como redes viarias, parcelas catastrales, edificaciones, zonas verdes o infraestructuras) que, al ser superpuestas, permiten obtener una visión integrada del espacio urbano.

En este contexto, las ortofotografías han adquirido un papel fundamental como herramienta de representación territorial. Se trata de imágenes aéreas corregidas geométricamente que permiten realizar mediciones directas y observar el estado real del territorio en un momento concreto. A diferencia de la cartografía vectorial, las ortofotos ofrecen una mayor riqueza de información, ya que permiten identificar con precisión elementos como edificaciones, pavimentos, vegetación o cambios recientes en el uso del suelo. Además, su carácter visual facilita la interpretación tanto por parte de técnicos como de responsables políticos y ciudadanos.

Tradicionalmente, la obtención de ortofotos se ha basado en vuelos tripulados o en imágenes satelitales. Aunque estas tecnologías permiten cubrir grandes extensiones, presentan limitaciones en términos de coste, frecuencia de actualización y resolución espacial. En los últimos años, los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés), comúnmente conocidos como drones, han supuesto una transformación significativa en la adquisición de datos geoespaciales (Colomina & Molina, 2014; Nex & Remondino, 2014). Estas plataformas permiten capturar imágenes de muy alta resolución a baja altura, alcanzando niveles de detalle centimétricos, lo que resulta especialmente útil en aplicaciones urbanas que requieren un análisis preciso, como la inspección de infraestructuras, la planificación urbanística, la gestión del patrimonio, el análisis de riesgos o la monitorización de cambios.

Además, los drones destacan por su flexibilidad operativa, ya que pueden desplegarse rápidamente y adaptarse a las necesidades específicas de cada proyecto, cubriendo únicamente las áreas de interés. Esto reduce significativamente los costes y los tiempos de adquisición de datos respecto a los métodos tradicionales. Asimismo, la posibilidad de repetir vuelos con frecuencia permite generar series temporales de ortofotos, facilitando el análisis de la evolución urbana.

Desde el punto de vista técnico, las imágenes obtenidas mediante drones pueden procesarse mediante técnicas de fotogrametría digital para generar no solo ortofotos, sino también Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), que incorporan la tercera dimensión al análisis del territorio. Esta capacidad mejora la comprensión de la morfología urbana y amplía las posibilidades de estudio.

Finalmente, la integración de estas ortofotos en Sistemas de Información Geográfica (SIG) potencia su utilidad, al permitir combinarlas con otras fuentes de datos y realizar análisis espaciales avanzados. Así, la teledetección mediante drones se consolida como una herramienta clave para mejorar la gestión urbana y avanzar hacia modelos de ciudades más inteligentes, sostenibles y resilientes.

2. OBJETIVOS EN CÁCERES

En 2024 el Ayuntamiento de Cáceres licita el proyecto "*Generación de ortofoto aérea mediante dron y actualización puntual de cartografía, digitalización de superficies de cubiertas con amianto y paneles fotovoltaicos*", con el objetivo de obtener una ortofotografía de alta resolución del núcleo urbano de Cáceres y sus tres pedanías (Valdesalor, Rincón de Ballesteros y Estación de Arroyo Malpartida) con tamaño de pixel o GSD (Ground Sample Distance) ≤ 2,5 cm. La superficie total cubierta supera las 3.600 ha en el núcleo urbano, a las que se añaden 60 ha correspondientes a las pedanías. Posteriormente, a partir de la ortofoto obtenida se representan las superficies identificadas con placas de fibrocemento (amianto) y las superficies ocupadas por paneles fotovoltaicos (placas solares). En ambos casos se realiza mediante fotointerpretación de las imágenes, lo que permite obtener un censo aparente.



Figura 1. Dron utilizado DJI MINI 4 PRO

3. TRABAJO DE CAMPO

Para la obtención de las imágenes se emplea una aeronave UAV de tipo multirrotor modelo DJI Mini 4 Pro (Fig. 1), equipada con una cámara RGB de 48 MP, con un peso total de 249 g, que vuela de forma automática a partir de vuelos programados (sistemas GNSS/INS integrados), capturando una imagen cada 5 segundos

Se marcan 120 puntos de control en tierra (GCP) mediante levantamiento topográfico con 1 cm de precisión.



Figura 2. Toma de datos desde azotea del Ayuntamiento

Se realizan 284 vuelos y 63 despegues/aterrizajes para garantizar la seguridad (el piloto siempre debe tener contacto visual con el dron), buscando diversos puntos altos distribuidos por la ciudad desde los que tener mejor control de los vuelos, entre ellos las azoteas del Ayuntamiento (Fig. 2), hotel Extremadura, hotel V Centenario o del Hospital San Pedro de Alcántara.

Se divide el trabajo en 6 zonas para el núcleo urbano de Cáceres, más 3 zonas para las pedanías. En total se toman unas 47.000 fotografías, a una altura de vuelo entre 100 y 103 metros, con un recubrimiento del 80% longitudinal y del 60% transversal.

4. AEROTRIANGULACIÓN

La aerotriangulación se realiza de manera automática mediante el software Photoscan de Agisoft, sustituyendo con claras ventajas al proceso clásico, al permitir la obtención de cientos de puntos por fotograma, muchos de ellos medidos en más de dos fotogramas. En total, se identificaron más de 101 millones de puntos de enlace (*tie points*). Se toman 127 puntos de control (Tabla 1). El procesamiento fotogramétrico se realiza con el software Agisoft Metashape. El MDE resultante presenta una resolución media de 6,68 cm/píxel, con una densidad aproximada de 224 puntos/m².

Tabla 1. Errores RMSE obtenidos.

Zonas	Puntos de control	XY error(cm)	Z error(cm)
C1	19	48,0793	3,37543
C2	17	27,2612	1,48875
C3	15	48,7173	20,24920
C4	21	29,4047	2,53320
C5	12	17,5952	4,12303
C6	21	20,6697	1,75510
P1	5	11,0211	1,80531
P2	4	6,3612	0,22834
P3	3	3,4118	0,17741

5. RESULTADOS

El caso de estudio presentado demuestra que la generación de ortofotos de alta resolución mediante UAV es una solución técnica viable y altamente eficaz para la gestión urbana. La combinación de sensores RGB, sistemas GNSS/INS y técnicas avanzadas de procesamiento fotogramétrico permite obtener productos cartográficos con resolución centimétrica.

El proyecto desarrollado en la ciudad de Cáceres pone de manifiesto el potencial de esta tecnología para complementar y mejorar los métodos tradicionales de adquisición de información geoespacial, ofreciendo una mayor flexibilidad operativa, reducción de costes y capacidad de actualización frecuente. Así, las ortofotos generadas mediante UAV se consolidan como una herramienta clave para apoyar la toma de decisiones en el ámbito de la planificación y gestión urbana municipal.

La ortofotografía generada presenta una gran calidad que permite identificar con precisión elementos urbanos como edificaciones, viales, aceras o zonas verdes. El GSD de 2,5 cm facilita la detección de detalles de pequeño tamaño. La Figura 3 muestra la calidad de la imagen obtenida, comparada con la ortofoto del PNOA 2022 (Fig. 4) o la resultante de vuelo fotogramétrico para cartografía 1:1000 realizado por la Junta de Extremadura en 2019 (Fig. 5).

La integración de la ortofoto en el SIG municipal ha demostrado su utilidad como base para la actualización puntual de cartografía a escala 1:500 y para el análisis urbano detallado, así como para la digitalización de elementos específicos en cubiertas, como instalaciones fotovoltaicas o placas de fibrocemento (Fig. 6).

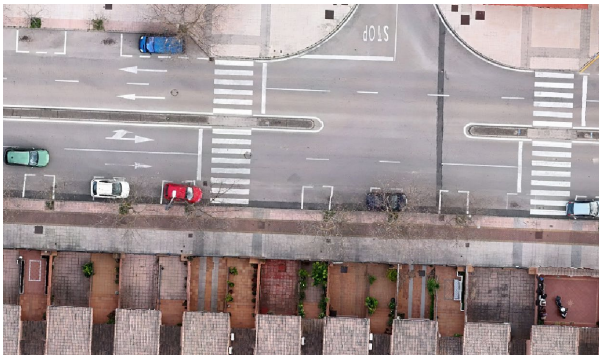


Figura 3. Ortofoto Ayto. Cáceres 2025 con GSD 2,5 cm



Figura 4. Ortofoto PNOA 2022 con GSD 25 cm



Figura 5. Ortofoto Junta Extremadura 2019 con GSD 10 cm

Con la fotointerpretación se identifican casi 4800 cubiertas con fibrocemento (Delgado-García *et al*., 2020), con una superficie de más de 286.400 m^2. Este dato permite crear un primer censo aparente de amianto en los núcleos urbanos, vinculando cada cubierta son la referencia catastral del inmueble donde se sitúa.

Igualmente, se contabilizan más de 38.000 placas fotovoltaicas (Malof *et al*., 2016), con una superficie cubierta de 87.130 m^2.

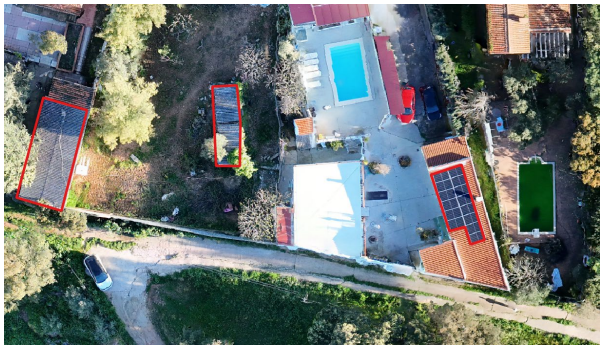


Figura 6. Identificación de placas solares y amianto

Las fechas elegidas para la toma de las imágenes ha sido un gran acierto: los árboles no tienen hojas (Fig. 7), lo que permite visualizar elementos que en otros periodos del año quedan tapados (Fig. 8).



Figura 7. Ortofoto Ayto Cáceres 2025. Febrero



Figura 8. Ortofoto Junta Extremadura 2019. Septiembre

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible sin el cuidado, el esmero y la generosa dedicación de la empresa Aeromedia UAV S.L., adjudicataria del contrato.

Nuestro agradecimiento al hotel Extremadura, hotel V Centenario, Hospital San Pedro de Alcántara, edificio de Servicios Múltiples (Junta de Extremadura), edificio residencial Torre de Cáceres, Servicio Provincial de Extinción de Incendios y al Silo (Banco de Alimentos).

7. REFERENCIAS

Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and *Remote Sensing, 92*, 79–97. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013

Delgado-García, J., Ariza-López, F. J., & Rodríguez-Avi, J. (2020). Detection of asbestos-cement roofs using remote sensing and image classification techniques. *Remote Sensing, 12*(7), 1135. https://doi.org/10.3390/rs12071135

Malof, J. M., Bradbury, K., Collins, L. M., & Newell, R. G. (2016). Automatic detection of solar photovoltaic arrays in high resolution aerial imagery. *Applied Energy, 183*, 229–240. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.191

Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics, 6*(1), 1–15. https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.151

Predicción espacial de la capacidad ecosistémica urbana a partir de datos de teledetección y aprendizaje automático

Álvarez Ripado, Ariadna [1,2] **García Bruzón, Adrián** [1] **Arrogante Funes, Fátima** [1] **Arrogante Funes, Patricia** [1]

[1] Universidad Rey Juan Carlos, C/Tulipán s/n, Móstoles, 28933, Madrid (España)

[2] Ecoacsa Reserva de Biodiversidad S.L, C/ Porto Cristo, 1 Esc. izq. 9º B, Alcorcón, 28924, Madrid (España)

ORCID: Álvarez Ripado 0000-0003-2113-2005 García Bruzón 0000-0002-5364-6388 Arrogante Funes 0000-0003-1724-6173 Arrogante Funes 0000-0003-1944-777X

Correspondencia: ariadna.ripado@urjc.es adrian.bruzon@urjc.es fatima.arrogante@urjc.es patricia.arrogante@urjc.es

RESUMEN

La capacidad de los ecosistemas urbanos para proporcionar servicios esenciales es clave para la sostenibilidad y resiliencia de las ciudades. Este estudio propone un enfoque basado en teledetección y modelización computacional para estimar espacialmente el índice de capacidad ecosistémica urbana en Madrid, integrando la condición ecosistémica y cuatro servicios urbanos: suministro de energía solar, refrigeración urbana, retención de aguas pluviales y acceso a la naturaleza. Se utilizaron principalmente variables derivadas de datos satelitales como predictores y el modelo CatBoost Regressor para estimar el índice con conjuntos de entrenamiento y validación (80/20). Los resultados mostraron alta concordancia entre valores predichos y reales (MAE = 0,0545, RMSE = 0,0852, R^2 = 0,8716), indicando que gran parte de la variabilidad espacial puede explicarse mediante datos de teledetección. La metodología es replicable y escalable, útil para apoyar la planificación urbana y la gestión de servicios ecosistémicos, y futuros desarrollos con datos hiperespectrales, LiDAR y aprendizaje profundo permitirán generar escenarios más realistas y robustos para la planificación sostenible. En conjunto, la integración de teledetección y modelización computacional ofrece un marco sólido para evaluar y anticipar la capacidad ecosistémica urbana, apoyando la toma de decisiones en ciudades resilientes y sostenibles.

Palabras clave: *Teledetección, ecosistema urbano, capacidad ecosistémica, modelización predictiva, aprendizaje automático*

Fecha de recepción: 11 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 11 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Predicción espacial de la capacidad ecosistémica urbana a partir de datos de teledetección y aprendizaje automático

Álvarez Ripado, Ariadna [1,2], García Bruzón, Adrián [1], Arrogante Funes, Fátima [1], Arrogante Funes, Patricia [1]

[1] Universidad Rey Juan Carlos, Madrid (España).
[2] Ecoacsa Reserva de Biodiversidad S.L, Madrid (España).
0000-0003-2113-2005, ariadna.ripado@urjc.es ; ariadna.alvarez@ecoacsa.com..
0000-0002-5364-6388, adrian.bruzon@urjc.es ; 0000-0003-1724-6173, fatima.arrogante@urjc.es.
0000-0003-1944-777X, patricia.arrogante@urjc.es.

Resumen: La capacidad de los ecosistemas urbanos para proporcionar servicios esenciales es clave para la sostenibilidad y resiliencia de las ciudades. Este estudio propone un enfoque basado en teledetección y modelización computacional para estimar espacialmente el índice de capacidad ecosistémica urbana en Madrid, integrando la condición ecosistémica y cuatro servicios urbanos: suministro de energía solar, refrigeración urbana, retención de aguas pluviales y acceso a la naturaleza. Se utilizaron principalmente variables derivadas de datos satelitales como predictores y el modelo *CatBoost Regressor* para estimar el índice con conjuntos de entrenamiento y validación (80/20). Los resultados mostraron alta concordancia entre valores predichos y reales (MAE = 0,0545, RMSE = 0,0852, R^2 = 0,8716), indicando que gran parte de la variabilidad espacial puede explicarse mediante datos de teledetección. La metodología es replicable y escalable, útil para apoyar la planificación urbana y la gestión de servicios ecosistémicos, y futuros desarrollos con datos hiperespectrales, LiDAR y aprendizaje profundo permitirán generar escenarios más realistas y robustos para la planificación sostenible. En conjunto, la integración de teledetección y modelización computacional ofrece un marco sólido para evaluar y anticipar la capacidad ecosistémica urbana, apoyando la toma de decisiones en ciudades resilientes y sostenibles.

Palabras clave: Teledetección, ecosistema urbano, capacidad ecosistémica, modelización predictiva, aprendizaje automático

Spatial prediction of urban ecosystem capacity using remote sensing data and machine learning

***Abstract**: The capacity of urban ecosystems to provide essential services is key to the sustainability and resilience of cities. This study proposes an approach based on remote sensing and computational modeling to spatially estimate the urban ecosystem capacity index in Madrid, integrating ecosystem condition and four urban services: solar energy supply, urban cooling, stormwater retention, and access to nature. Variables derived mainly from satellite data were used as predictors, and the CatBoost Regressor model was applied to estimate the index using training and validation sets (80/20). The results showed high agreement between predicted and observed values (MAE = 0.0545, RMSE = 0.0852, R^2 = 0.8716), indicating that a large part of the spatial variability can be explained by remote sensing data. The methodology is replicable and scalable, making it useful for supporting urban planning and ecosystem service management. Future developments using hyperspectral data, LiDAR, and deep learning will enable the generation of more realistic and robust scenarios for sustainable planning. Overall, the integration of remote sensing and computational modeling provides a solid framework for assessing and anticipating urban ecosystem capacity, supporting decision-making in resilient and sustainable cities.*

***Keywords**: Remote sensing, urban ecosystem, ecosystem capacity, predictive modelling, machine learning*

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas urbanos son esenciales para el bienestar humano, la resiliencia climática y la sostenibilidad de las ciudades, especialmente en áreas

densamente pobladas (Fang *et al*., 2023). La evaluación integrada de la condición y de los servicios ecosistémicos que estos proporcionan resulta clave para apoyar la planificación urbana y la toma de decisiones basada en evidencia científica (Fang *et al*., 2023).

En este contexto, los datos de teledetección y de Observación de la Tierra (*Earth Observation*, EO) se han consolidado como recursos fundamentales para el análisis de ecosistemas urbanos, al permitir una evaluación espacialmente explícita, consistente y replicable de variables biofísicas a distintas escalas espaciales y temporales (Di Palma *et al*., 2024). En los últimos años, la integración de datos EO con enfoques de modelización computacional y métodos *data-driven* ha ampliado significativamente las capacidades para analizar y predecir patrones y procesos ecológicos en sistemas urbanos complejos (Moraci *et al*., 2025).

El concepto de capacidad ecosistémica, formalizado en el Sistema de Contabilidad Ambiental-Económica – Contabilidad de Ecosistemas (SCAE-CE), permite evaluar el potencial de los ecosistemas para suministrar servicios ecosistémicos de manera sostenible, considerando su condición ecológica y las interacciones, sinergias y compensaciones entre distintos servicios (United Nations *et al*., 2024). Sobre esta base conceptual, se desarrolló un índice de capacidad ecosistémica que integra las cuentas de condición y de servicios ecosistémicos en un marco coherente y compatible con los estándares internacionales de contabilidad ambiental.

A pesar de los avances en la cartografía y evaluación de servicios ecosistémicos urbanos (Di Palma *et al*., 2024; Finizio *et al*., 2024), persiste una limitada aplicación de enfoques orientados a la predicción de la capacidad ecosistémica mediante modelización basada en datos de teledetección (Akiner & Ghasri, 2025). En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo modelizar y predecir el índice de capacidad ecosistémica urbana utilizando variables mayoritariamente derivadas de sensores satelitales y técnicas de modelización implementadas en Python. El enfoque se aplica a la ciudad de Madrid, explorando el potencial de los métodos *data-driven* basados en EO para apoyar la evaluación, monitorización y gestión de ecosistemas tan complejos como son los urbanos (Akiner & Ghasri, 2025; Moraci *et al*., 2025).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Índice de capacidad ecosistémica

Este estudio se basa en un trabajo previo que desarrolló un índice de capacidad ecosistémica alineado con el marco del SCAE-CE, integrando cuentas de condición y de servicios ecosistémicos urbanos para representar espacialmente el potencial de los ecosistemas urbanos de suministrar servicios de manera sostenible (United Nations *et al*., 2024).

Para la obtención del índice, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para calcular las sinergias entre cuatro servicios urbanos (suministro de energía solar, refrigeración urbana, retención de aguas pluviales y acceso a la naturaleza urbana) y, posteriormente, estas sinergias se integraron con la condición mediante un enfoque de lógica difusa en ArcGIS Pro, permitiendo modelar relaciones no lineales relevantes en ecosistemas urbanos (Hanna *et al*., 2023). Otros métodos, como la lógica clásica, se han empleado para generar índices de capacidad (Martini *et al*., 2024).

Como predictores de la capacidad se incluyeron datos de Sentinel-2 tales como la permeabilidad del suelo, el Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI), el verdor anual máximo (NDVI máximo), la densidad de cobertura arbórea y, por ende, la sombra. De Landsat 8 se obtuvieron la temperatura, el albedo y la evapotranspiración. La radiación y duración solar, así como la orientación y la pendiente del terreno, se obtuvieron a partir de la combinación de modelos digitales de superficies y datos satelitales. Los contaminantes atmosféricos (NO_2, O_3, CO, SO_2, HCHO) y el vapor de agua se derivaron de Sentinel-5P. Además, se incluyeron variables derivadas del SIOSE AR, que forma parte del Plan Nacional de Observación del Territorio, como el índice de confort acústico, la red de carreteras y la fragmentación del territorio (*Guidos toolbox*) y otras, como la proximidad a zonas riparias, fueron calculadas a partir de "Copernicus VHR_IMAGE_2018" y Urban Atlas.

También se incluyeron el carbono orgánico y la densidad aparente del suelo del programa LUCAS (JRC), así como los grupos hidrológicos del suelo, la precipitación media anual, el área de los edificios y varios datos demográficos. Finalmente, se incluyó la riqueza de aves de interés comunitario, calculada a partir de la Directiva de Aves, como modelización de la presencia de estas y de otras variables ambientales y antrópicas. La resolución espacial final de los predictores es de 25 m.

2.2. Modelización predictiva

Tras generar la base de datos con todos los predictores, se realizó un análisis exploratorio de datos para limpiar y preparar los datos, identificando patrones, relaciones y posibles errores antes del modelado.

El proceso de modelización se realizó en Python, donde se buscó predecir el índice de capacidad ecosistémica utilizando como predictores las diferentes variables explicativas de las cuentas de condición y servicios de la ciudad de Madrid.

El conjunto de datos final se dividió en un 80% para entrenamiento y test y un 20% para validación final. Para la selección del modelo se utilizó la librería *PyCaret*, que permite evaluar de forma automatizada distintos algoritmos de aprendizaje automático bajo un marco común. El mejor modelo se seleccionó en función de su rendimiento predictivo sobre el conjunto de test.

El modelo seleccionado se utilizó posteriormente para la predicción espacial del índice de capacidad ecosistémica, permitiendo evaluar el potencial de los enfoques *data-driven* basados en teledetección para la estimación espacialmente explícita de la capacidad ecosistémica en entornos urbanos.

3. RESULTADOS

Se observa una gran concordancia visual entre la distribución espacial del índice de capacidad ecosistémica real y predicho (Figura 2 y Figura 3), reflejando la capacidad del modelo *CatBoost Regressor* para reproducir patrones espaciales complejos de la capacidad ecosistémica urbana a partir de variables derivadas mayoritariamente de teledetección (Di Palma *et al*., 2024; Finizio *et al*., 2024). Destaca especialmente la diferenciación clara entre las zonas con mayor capacidad ecosistémica, ubicadas en áreas periféricas y con mayor cobertura verde, y las zonas urbanas más densas con menor capacidad, situadas principalmente en el centro y sur de la ciudad.

La riqueza de aves, la permeabilidad del suelo, la densidad arbórea y la fragmentación del terreno destacan como las variables más influyentes en la predicción del índice de capacidad ecosistémica, integrando datos EO con variables ecológicas (Figura 1). Esto evidencia el valor de combinar sensores remotos con datos biológicos para evaluar la funcionalidad y el estado de ecosistemas urbanos.

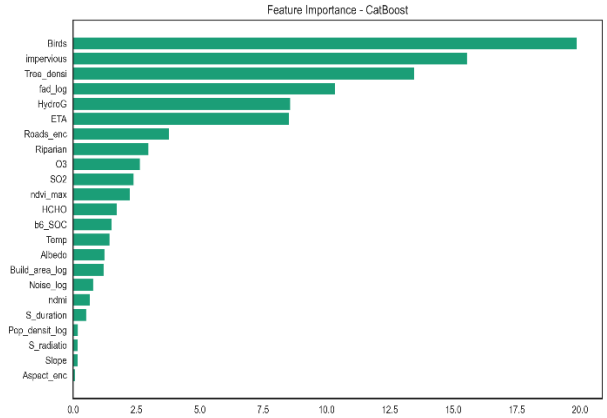


Figura 1. Grado de influencia de los predictores empleados en el modelo *CatBoost Regressor*.

Las métricas obtenidas (Tabla 1) muestran un alto grado de exactitud y capacidad explicativa del modelo (R^2 = 0,8716), indicando que la mayoría de la variabilidad espacial se explica con variables satelitales y confirmando la utilidad de los datos EO para modelización urbana (Di Palma *et al*., 2024). Otras métricas, como RMSLE y MAPE, confirman además que el modelo mantiene un bajo error relativo en el conjunto de validación, lo que resulta especialmente relevante en aplicaciones prácticas de planificación urbana, donde la robustez frente a escalas variables es crítica (Di Palma *et al*., 2024).

Tabla 1. Métricas del *dataset* de validación final del modelo seleccionado *CatBoost Regressor*.

MAE	MSE	RMSE	R^2	RMSLE	MAPE
0,0545	0,0073	0,0852	0,8716	0,0615	0,2272

Estos resultados destacan la utilidad de la teledetección no solo para monitorear la condición de los ecosistemas urbanos, sino también para anticipar cambios en áreas urbanas complejas mediante técnicas de aprendizaje automático (Akiner & Ghasri, 2025; Finizio *et al*., 2024). La integración de técnicas avanzadas de modelización computacional, como *CatBoost*, con datos EO ofrece una vía prometedora para mejorar la gestión ambiental urbana y la toma de decisiones espaciales basadas en evidencia científica (Fang *et al*., 2023).

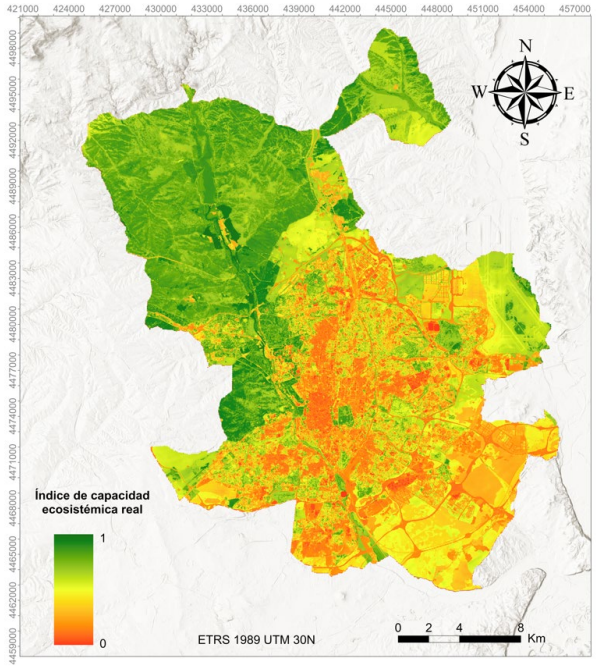


Figura 2. Distribución del índice de capacidad ecosistémica real de la ciudad de Madrid.

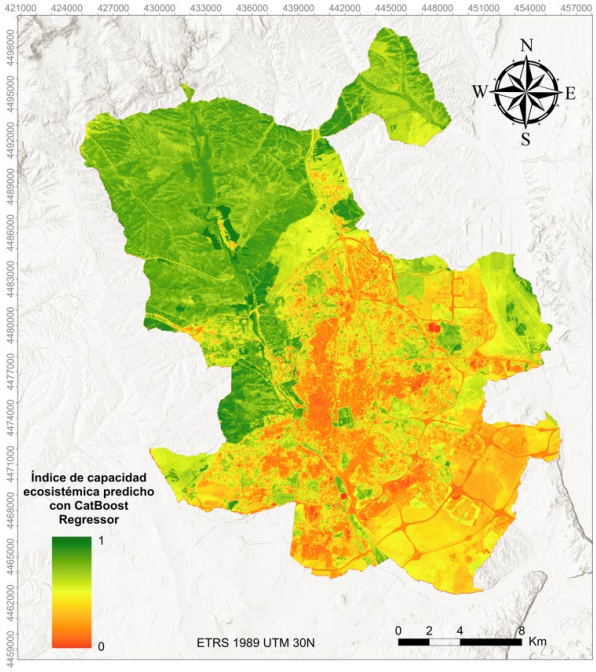


Figura 3. Distribución del índice de capacidad ecosistémica predicho de la ciudad de Madrid.

Finalmente, el estudio reafirma el papel estratégico de la teledetección como herramienta clave para analizar ecosistemas urbanos, al proporcionar datos de alta resolución espacial y temporal que permiten capturar su heterogeneidad espacial y dinámica temporal. Esto es

especialmente relevante en ciudades como Madrid, con alta presión antropogénica y climática, donde marcos como el SCAE-CE apoyan la planificación sostenible y la resiliencia urbana (United Nations *et al*., 2024).

La metodología desarrollada permite modelizar de forma eficiente y replicable el índice de capacidad ecosistémica a partir de datos satelitales multifuente, proporcionando información espacial útil para la planificación de infraestructuras verdes y servicios ecosistémicos urbanos (Hanna *et al*., 2024; Di Palma *et al*., 2024; Finizio *et al*., 2024). Su combinación con aprendizaje automático facilita la captura de patrones complejos y la predicción de la variabilidad espacial, destacando el valor de integrar datos EO con información biológica, como la riqueza de aves. No obstante, la precisión del modelo depende de la calidad y resolución de los sensores y puede verse limitada por procesos no detectables mediante teledetección (Fang *et al*., 2023; Martini *et al*., 2024).

Como línea futura, se plantea aplicar el modelo a análisis contrafactuales para evaluar el impacto de las intervenciones urbanas sobre la capacidad ecosistémica mediante escenarios alternativos. La incorporación de datos hiperespectrales y LiDAR, junto con *deep learning*, permitirá reducir la incertidumbre asociada a variables *proxy* y generar escenarios más realistas, reforzando la planificación de infraestructuras verdes y decisiones alineadas con el SCAE-CE.

4. CONCLUSIONES

El índice de capacidad ecosistémica puede predecirse con exactitud mediante datos EO y modelización computacional en Python, utilizando el algoritmo *CatBoost*. Los resultados muestran una elevada concordancia espacial entre valores predichos y reales, reflejando la heterogeneidad espacial de Madrid y las diferencias en el índice de capacidad ecosistémica.

La metodología es replicable, escalable y permite actualizaciones temporales, siendo una herramienta útil para la planificación de infraestructuras verdes y la gestión de servicios ecosistémicos urbanos. Además, el enfoque basado en datos EO permite un monitoreo continuo de la sostenibilidad, integrando la capacidad de los ecosistemas para mantener sus funciones y servicios frente a cambios ambientales o climáticos.

Entre sus limitaciones se encuentra la dependencia de algunas variables *proxy*, como el porcentaje de cobertura arbórea para representar la provisión de sombra y la densidad de población para reflejar la demanda de servicios ecosistémicos, así como de la resolución espacial y temporal de los datos empleados. Las futuras mejoras incluyen la incorporación de datos de sensores hiperespectrales y LiDAR, junto con técnicas de *deep learning,* para aumentar la precisión y captura de relaciones más complejas.

En resumen, la integración de datos de teledetección y modelización computacional proporciona un marco eficiente y escalable para evaluar y anticipar la capacidad ecosistémica urbana, apoyando la planificación y gestión ambiental en ciudades densamente urbanizadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido cofinanciada por la Comunidad de Madrid en el marco de ayudas para la realización de doctorados industriales 2023 (Ref.: IND2023/AMB-28820).

6. REFERENCIAS

Akiner, M. E., & Ghasri, M. (2025). Integrating remote sensing and machine learning to analyze urban growth and its environmental effects: A 30-year assessment. *Pure and Applied Geophysics, 182*, 1–20. https://doi.org/10.1007/s00024-025-03727-w.

Di Palma, M., Rigillo, M., & Leone, M. F. (2024). Remote sensing technologies for mapping ecosystem services: An analytical approach for urban green infrastructure. *Sustainability, 16*(14), 6220. https://doi.org/10.3390/su16146220.

Fang, X., Li, J., & Ma, Q. (2023). Integrating green infrastructure, ecosystem services and nature-based solutions for urban sustainability: A comprehensive literature review. *Sustainable Cities and Society, 98,* 104843. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104843.

Finizio, M., Pontieri, F., Bottaro, C., Di Febbraro, M., Innangi, M., Sona, G., & Carranza, M. L. (2024). Remote sensing for urban biodiversity: A review and meta-analysis. R*emote Sensing, 16*(23), 4483. https://doi.org/10.3390/rs16234483.

Hanna, E., Bruno, D. & Comín, F.A. (2024). The ecosystem services supplied by urban green infrastructure depend on their naturalness, functionality and imperviousness. *Urban Ecosyst, 27*, 187–202. https://doi.org/10.1007/s11252-023-01442-9.

Martini, F., Conroy, K., King, E., Farrell, C. A., Kelly-Quinn, M., Obst, C., ... & Stout, J. C. (2024). A capacity index to connect ecosystem condition to ecosystem services accounts. *Ecological Indicators, 167*, 112731. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112731.

Moraci, F., Bevilacqua, C., Pizzimenti, P., Barrile, V., & Genovese, E. (2025). Data-Driven Planning Approaches for Measuring Urban Ecosystem Services: The Potential of Big Data and Urban Informatics for Planning the Transition of Cities. In INTERNATIONAL SYMPOSIUM: New Metropolitan Perspectives (pp. 18-34). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82927-7_2.

United Nations, European Commission, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Monetary Fund, Organisation for Economic Co-operation and Development, & World Bank. (2024). System of Environmental-Economic Accounting – Ecosystem Accounting (SEEA EA) (ST/ESA/STAT/SER.F/124). United Nations.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.192

Regla 3–30–300: enfoque metodológico SIG–LiDAR para el diagnóstico urbano en Cáceres, España

Gll, Celia [1] **Chapinal, Libertad** [1]

[1] ESRI España, España

ORCID: Gll 0009-0005-9821-6137 Chapinal 0009-0001-6120-7596

Correspondencia: celia.gil@esri.es libertad.chapinal@esri.es

RESUMEN

Las ciudades mediterráneas afrontan riesgos ambientales urbanos que impulsan la renaturalización y requieren herramientas de evaluación a escala de barrio. Este trabajo presenta un enfoque metodológico para evaluar la regla 3–30–300 de infraestructura verde urbana en Cáceres (España) integrando datos LiDAR y análisis avanzado de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La metodología calcula indicadores reproducibles a escala de edificio: el 3 mediante visibilidad 3D entre edificios y arbolado LiDAR; el 30 a partir de la estructura de la vegetación para estimar cobertura arbórea por barrio; y el 300 mediante análisis de redes para medir accesibilidad peatonal real a zonas verdes. Los indicadores se integran en un índice compuesto (0–100) que muestra mayores puntuaciones en barrios con más cobertura arbórea y mejor acceso a zonas verdes, y valores más bajos en el casco histórico y crecimientos periféricos, identificados como ámbitos prioritarios de intervención.

Palabras clave: *Sistemas de Información Geográfica, LiDAR, indicador urbano, cobertura arbórea, ArcGIS*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Regla 3–30–300: enfoque metodológico SIG–LiDAR para el diagnóstico urbano en Cáceres, España

Gll, Celia [1], Chapinal, Libertad [1]
[1] ESRI España, España.
0009-0005-9821-6137, celia.gil@esri.es.
0009-0001-6120-7596, libertad.chapinal@esri.es.

Resumen: Las ciudades mediterráneas afrontan riesgos ambientales urbanos que impulsan la renaturalización y requieren herramientas de evaluación a escala de barrio. Este trabajo presenta un enfoque metodológico para evaluar la regla 3–30–300 de infraestructura verde urbana en Cáceres (España) integrando datos LiDAR y análisis avanzado de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La metodología calcula indicadores reproducibles a escala de edificio: el 3 mediante visibilidad 3D entre edificios y arbolado LiDAR; el 30 a partir de la estructura de la vegetación para estimar cobertura arbórea por barrio; y el 300 mediante análisis de redes para medir accesibilidad peatonal real a zonas verdes. Los indicadores se integran en un índice compuesto (0–100) que muestra mayores puntuaciones en barrios con más cobertura arbórea y mejor acceso a zonas verdes, y valores más bajos en el casco histórico y crecimientos periféricos, identificados como ámbitos prioritarios de intervención.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica, LiDAR, indicador urbano, cobertura arbórea, ArcGIS.

3–30–300 Rule: a GIS–LiDAR methodological approach for urban assessment in Cáceres, Spain

***Abstract**: Mediterranean cities face urban environmental risks that are driving renaturalization strategies and creating a need for neighborhood-scale assessment tools. This study presents a methodological approach to evaluate the 3–30–300 rule for urban green infrastructure in Cáceres (Spain) by integrating LiDAR data and advanced Geographic Information Systems (GIS) analysis. The methodology calculates reproducible building-scale indicators: the 3 indicator through 3D visibility analysis between buildings and LiDAR-derived trees; the 30 indicator from vegetation structure to estimate tree canopy cover by neighborhood; and the 300 indicator through network analysis to measure actual pedestrian accessibility to green spaces. These indicators are integrated into a composite index (0–100), which shows higher scores in neighborhoods with greater tree canopy cover and better access to green spaces, and lower values in the historic center and peripheral expansion areas, identified as priority areas for intervention.*

***Keywords**: Geographic Information Systems, LiDAR, urban indicator, tree canopy cover, ArcGIS.*

1. INTRODUCCIÓN

Las principales ciudades españolas afrontan simultáneamente una intensificación de los riesgos ambientales urbanos, como la contaminación atmosférica y el aumento de las temperaturas, y la consolidación de agendas de sostenibilidad orientadas a recomponer la relación entre ciudad, salud y naturaleza, una necesidad especialmente urgente en el contexto mediterráneo por su mayor exposición a episodios de calor extremo y estancamiento atmosférico (Chapman *et al*., 2017). En este marco, la renaturalización urbana se ha consolidado como una línea prioritaria de intervención, no solo por la incorporación de zonas verdes, sino por el impulso de soluciones basadas en la naturaleza que generan beneficios ambientales, sociales y económicos, al tiempo que refuerzan la inclusión, el derecho a la ciudad y la justicia espacial (Uceda Navas & Domínguez Pérez, 2024).

El arbolado urbano ocupa un papel central en esta agenda por su contribución a procesos físicos, como la sombra, la evapotranspiración o la mejora del confort térmico, y a resultados positivos en salud y bienestar (Dadvand *et al*., 2016), además de su capacidad para reducir contaminantes atmosféricos (Sicard *et al*., 2018) y mitigar el calor a escala de barrio mediante la estructura de copa (Ziter *et al*., 2019). En este contexto, la regla 3–30–300 sintetiza en tres umbrales operativos una propuesta de planificación y evaluación de la infraestructura verde urbana: ver al menos tres árboles desde la vivienda, disponer de un 30 % de cobertura arbórea en el entorno residencial y residir a menos de 300 metros de un espacio verde de calidad. Esta regla fue formulada por Konijnendijk (2021) y desarrollada posteriormente como una guía basada en la evidencia para promover barrios más verdes, saludables y resilientes (Konijnendijk, 2023).

Desde la propuesta inicial de la regla 3–30–300 (Konijnendijk, 2021), los trabajos que han evaluado su cumplimiento muestran una diversidad metodológica notable. En Barcelona, Nieuwenhuijsen *et al*. (2022) analizaron una versión sustitutiva de la regla a partir de cuestionarios, análisis SIG, teledetección y mapas de coberturas del suelo; otros estudios han combinado trabajo de campo, SIG, análisis de red, cartografía de espacios verdes e imágenes de alta resolución para medir sus distintos componentes a escala urbana y de edificio. Estos antecedentes evidencian el interés creciente por desarrollar metodologías operativas y comparables para su implementación.

En este contexto, la aplicación de la regla exige métricas robustas y escalables en entornos urbanos heterogéneos. Frente a enfoques basados principalmente en encuestas, cartografía de coberturas, análisis de red o teledetección óptica, este estudio plantea una aproximación metodológica basada en datos LiDAR y técnicas avanzadas SIG, orientada a mejorar la precisión en la caracterización tridimensional de la vegetación y en la estimación de la cobertura arbórea. Así, el objetivo de este trabajo es evaluar el grado de cumplimiento de la regla 3–30–300 en cada edificio de la ciudad de Cáceres (España), mediante indicadores calculados a escala de edificio y barrio a partir de información LiDAR y análisis espacial avanzado.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolla en Cáceres (España), una ciudad con una estructura urbana heterogénea que combina un casco histórico compacto y denso con áreas residenciales de expansión de trama más abierta, además de zonas verdes y polígonos industriales periféricos. Esta diversidad morfológica y funcional la convierte en un caso adecuado para evaluar el comportamiento espacial de la regla 3–30–300. La unidad espacial de referencia fueron los 78 barrios oficiales definidos por la IDE Cáceres.



Figura 1. Área de estudio alrededor de los edificios residenciales de Cáceres. Arriba: casco antiguo. Abajo: zonas residenciales y verdes. Fuente: elaboración propia.

2.2. Datos y software

Para realizar este estudio, se utilizaron las siguientes fuentes de datos: edificios residenciales del Catastro de España (10.037) disponibles en Living Atlas of the World; datos LiDAR del PNOA 2024 en formato LAZ, con una densidad de 5 puntos/m²; capa de Barrios de Cáceres de la IDE Cáceres en formato shapefile; y capa de Parques y Jardines de la IDE Cáceres, también en formato shapefile. Todo el procesamiento, la gestión y el análisis espacial se realizaron en ArcGIS Pro 3.6.

2.3. Metodología

2.3.1. Indicador 3: ver 3 árboles desde tu casa

El indicador "3" evalúa, para cada edificio residencial, si es potencialmente visible un mínimo de tres árboles maduros en su entorno inmediato. El arbolado se derivó de la nube de puntos LiDAR, previamente preprocesada y recortada al área de estudio. Posteriormente, se filtraron las clases de suelo, edificios y vegetación alta para aislar el arbolado y generar una máscara fiable de cobertura arbórea (Fig. 2).

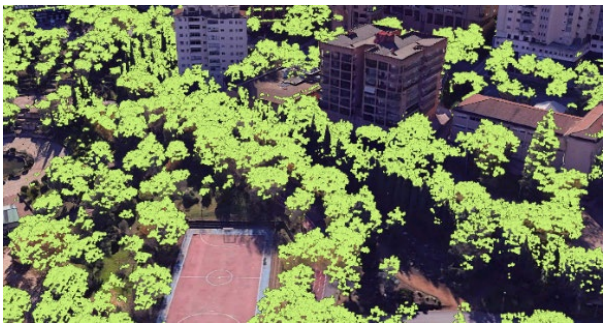


Figura 2. Clasificación 5 High Vegetation de nube de puntos LiDAR sobre Google Photorealistic 3D basemap de ArcGIS Pro. Fuente: elaboración propia.

Para evitar la inclusión de puntos de copa sobre cubiertas de edificios (ramas, superposiciones), se aplicó un buffer de 0,5 m a los edificios residenciales y se reclasificaron los puntos afectados. A partir de una malla de densidad de 1 m y del modelo digital del terreno se obtuvo un modelo de altura de copa:

$$CHM = CanopySurface - MDT$$

Se descartaron alturas inferiores a 6 m y superiores a 30 m para evitar valores erróneos. Los árboles individuales se identificaron como máximos locales en un radio de 2 m y se depuraron duplicados y falsos positivos mediante una tolerancia de 1 m. Finalmente, se evaluó la visibilidad potencial entre los centroides de los edificios residenciales y los árboles detectados mediante líneas de visión (Fig. 3), considerando como obstáculos la edificación, una altura media de observación de 4,5 m por edificio —según las Normas Urbanísticas del Plan General Municipal de Cáceres (Ayuntamiento de Cáceres, s. f.)— y la altura máxima registrada para cada árbol. El indicador se consideró cumplido cuando el edificio presentaba visibilidad de ≥3 árboles.



Figura 3. Ejemplo de líneas de visión desde los edificios hasta los árboles (2D). Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Indicador 30: 30 % cobertura de copa arbórea

El indicador "30" se calculó como porcentaje de cobertura arbórea por barrio. A partir de la superficie de copa derivada del LiDAR, se estimó el área ocupada por el arbolado en cada unidad barrial y se expresó en relación con el área total del barrio:

$$Cobertura\ arbórea\ (\%) = \frac{\text{Área copa (m2)}}{\text{Área barrio(m2)}} x100$$

2.3.3. Indicador 300: 300 metros de una zona verde

El indicador "300" evalúa si cada edificio residencial se localiza a una distancia peatonal igual o inferior a 300 m de una zona verde de calidad. Para ello, se partió de la cartografía oficial de parques y jardines, cuyos recintos se depuraron geométricamente mediante una tolerancia de 5 m para unificar fragmentos contiguos y mejorar su continuidad espacial. Posteriormente, se seleccionaron únicamente aquellos espacios verdes con una superficie mínima de 1 ha.

Sobre el perímetro resultante se generaron accesos potenciales distribuidos cada 50 m, con el fin de representar de forma más realista los posibles puntos de entrada a estas zonas verdes (Fig. 4). A partir de dichos accesos, se calculó la cobertura peatonal mediante análisis de red, delimitando áreas de servicio de 300 m caminables. El indicador se asignó a cada edificio en función de su inclusión o no dentro de estas áreas de servicio.

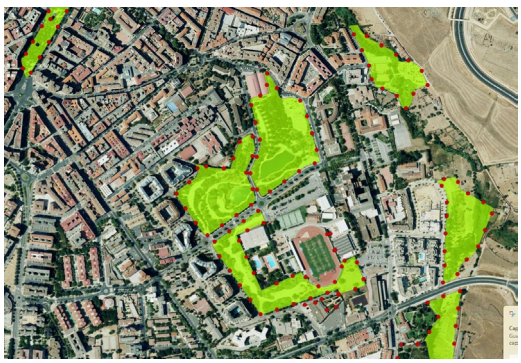


Figura 4. Accesos a zonas verdes de calidad. Fuente: elaboración propia.

2.3.4. Cálculo de índice compuesto

Una vez obtenidos los tres indicadores, se integraron en un índice compuesto mediante estandarización de las variables de entrada en una escala común, combinación en una única variable sintética y reescalado final a valores interpretables. Se aplicó una normalización mínimo–máximo y se combinaron los indicadores mediante la media de los valores escalados. Se asignaron pesos 1–1–2 a los indicadores 3, 30 y 300, respectivamente, al considerar que el indicador 300 mide la accesibilidad funcional a zonas verdes públicas, una condición más estructural y estable. El índice final se expresó en una escala de 0 a 100, donde los valores más altos indican mayor cumplimiento relativo de la regla 3–30–300.

3. RESULTADOS

Los resultados del indicador 3 muestran que, de los 10.037 edificios residenciales analizados, menos del 50 % cumple el estándar de visibilidad definido en la metodología: que desde una altura media de 4,5 metros por edificio sea posible observar tres o más árboles. En términos absolutos, alrededor de 4.000 edificaciones cumplen la norma, mientras que el resto queda por debajo del umbral establecido.

Por otro lado, los resultados del indicador 30 muestran que 11 de los 78 barrios recogidos presentan un 30 % o más de cobertura arbórea sobre el total del área. Destacan los barrios residenciales y aquellos con acceso a zonas verdes de forma sencilla. En cambio, en las zonas céntricas e industriales bajan los valores porcentuales (Fig. 5).

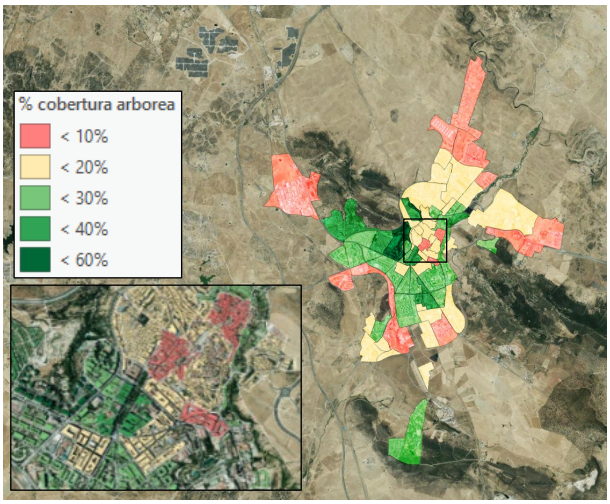


Figura 5. Caracterización del Indicador 30: 30 % cobertura arbórea por barrio. Fuente: elaboración propia.

El indicador 300 se cumple por la gran mayoría de los edificios residenciales exceptuando algunos barrios del distrito Centro (Fig. 6).

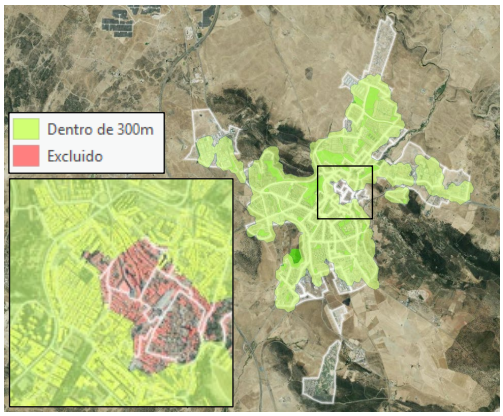


Figura 6. Cobertura de zonas verdes de calidad mediante red navegable peatonal. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, los resultados del índice compuesto final muestran una distribución heterogénea, con un claro predominio de valores medios-altos (Fig. 7).

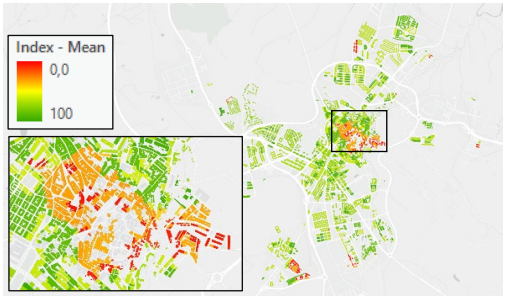


Figura 7. Resultado final del índice compuesto 3–30–300 en ArcGIS Pro. Fuente: documentación ArcGIS Pro.

La distribución presenta un máximo principal en torno a 60/100, junto con un segundo agrupamiento de puntuaciones altas, lo que sugiere dos perfiles urbanos diferenciados: edificios que cumplen parcialmente la regla y otros que alcanzan un desempeño elevado al combinar los tres indicadores. Las puntuaciones bajas aparecen como focos localizados (casco histórico y periferia específica), mientras que la mayor parte del tejido residencial se concentra en rangos superiores. En total, 8.109 de los 10.037 edificios analizados alcanzan 50 puntos o más en el índice final.

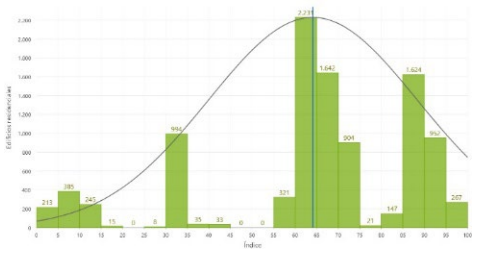


Figura 8. Gráfico de distribución del índice 3–30–300 en ArcGIS Pro. Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

La integración de LiDAR y SIG avanzado permite traducir la regla 3–30–300 en indicadores medibles a escala de edificio, incorporando la dimensión 3D del arbolado (estructura y altura de copa) y la accesibilidad real mediante análisis de redes. Este enfoque genera cartografía diagnóstica reproducible y comparable, útil para detectar déficits de infraestructura verde, priorizar intervenciones y evaluar escenarios ajustando umbrales y ponderaciones. En conjunto, aporta una base técnica trazable para apoyar la planificación urbana y el seguimiento de objetivos de renaturalización.

5. REFERENCIAS

Ayuntamiento de Cáceres. (s. f.). Plan General Municipal de Cáceres (PGM2010). Tomo II: Normas (texto refundido) [PDF]. https://sig.caceres.es/PGM2010/TOMO_II_NORMAS/NORMAS_REFUNDIDO.pdf

Chapman, S., Watson, J. E. M., Salazar, A., Thatcher, M., & McAlpine, C. A. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: A systematic review and meta-analysis. *Landscape Ecology, 32*, 1921–1935. https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4

Dadvand, P., Bartoll, X., Basagaña, X., Dalmau-Bueno, A., Martinez, D., Ambros, A., Cirach, M., Triguero-Mas, M., Gascon, M., Borrell, C., & Nieuwenhuijsen, M. J. (2016). Green spaces and general health: Roles of mental health status, social support, and physical activity. *Environment International, 91*, 161–167. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.029

Konijnendijk, C. C. (2021). The 3-30-300 rule for urban forestry and greener cities. *Biophilic Cities Journal, (4)*.

Konijnendijk, C. C. (2023). Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: Introducing the 3–30–300 rule. *Journal of Forestry Research, 34*, 821–830. https://doi.org/10.1007/s11676-022-01523-z

Nieuwenhuijsen, M. J., Dadvand, P., Márquez, S., Bartoll, X., Pereira Barboza, E., Cirach, M., Borrell, C., & Zijlema, W. L. (2022). The evaluation of the 3–30–300 green space rule and mental health. *Environmental Research*, 215(Part 2), 114387. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114387

Sicard, P., Agathokleous, E., Araminienė, V., Carrari, E., Hoshika, Y., De Marco, A., & Paoletti, E. (2018). Should we see urban trees as effective solutions to reduce increasing ozone levels in cities? *Environmental Pollution, 243*, 163–176. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.049

Uceda Navas, P., & Domínguez Pérez, M. (2024). Reequilibrando los espacios urbanos: Derecho a la ciudad y participación ciudadana en los barrios vulnerables de Madrid. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas, (181)*, 117–124.

Ziter, C. D., Pedersen, E. J., Kucharik, C. J., & Turner, M. G. (2019). Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 116*(15), 7575–7580. https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.195

De productos existentes a una cartografía robusta: armonización multifuente de perturbaciones forestales

González, Isabel [1] **Guillén-Climent, Mariluz** [1] **Bravo-Núñez, Andrés** [1,2] **Esteban, Jessica** [1] **Tomé, José Luis** [1]

[1] Agresta S.Coop, España

[2] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universidad Politécnica de Valencia

ORCID: González 0009-0002-1455-9174 Guillén-Climent 0009-0000-3865-4681 Bravo-Núñez 0009-0003-6650-3487 Esteban 0000-0001-8350-5343 Tomé 0000-0003-2298-9115

Correspondencia: igonzalez@agresta.org mguillen@agresta.org abravo@agresta.org jesteban@agresta.org jltome@agresta.org

RESUMEN

La monitorización de perturbaciones en bosques mediterráneos cuenta con numerosos productos de detección de cambio (globales, europeos y nacionales). Sin embargo, la heterogeneidad en sensores, resolución espacial, cobertura temporal y leyendas dificulta su integración y explotación conjunta. En el marco del proyecto RIGOR-MED, cuyo objetivo es mejorar la representatividad y rigor estadístico de las observaciones, este trabajo evalúa una armonización multifuente integrando productos internos basados en Landsat y Sentinel-2 (CCDC) con Global Forest Change (GFC), European Forest Disturbance Atlas (EFDA) y el Sistema de Alertas y Cambios Anuales (EIKOS). La armonización se fundamenta en (i) una leyenda común y reglas de cross-walking y (ii) fusión espacio-temporal. A partir de esta integración se generan mapas armonizados para la Península Ibérica y Baleares, aplicando dos estrategias alternativas de resolución de conflictos: prioridad por fuente y prioridad por clase. La validación con datos fotointerpretados, demuestra que la armonización mejora la consistencia y fiabilidad respecto a los productos individuales. Los mapas armonizados alcanzan una exactitud binaria del 99%, eliminan el error de comisión y reducen la omisión a valores inferiores al 32% (17% bajo una definición restrictiva de perturbación). En la validación temática, el enfoque mejora la detección de aprovechamientos manteniendo alta precisión y consigue sensibilidad completa para incendios, aunque con retos persistentes en la identificación de perturbaciones sutiles. En conjunto, los resultados respaldan que la integración multifuente constituye una vía eficaz para generar productos operacionales robustos de monitorización de perturbaciones.

Palabras clave: *perturbaciones forestales; armonización; fusión espacio-temporal; validación;*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Armonización multifuente de perturbaciones forestales: de productos existentes a una cartografía robusta

González, Isabel [(1)], Guillén-Climent, Mariluz [(1)], Bravo-Núñez, Andrés [(1,2)], Esteban, Jessica [(1)], Tomé, José Luis [(1)]

[(1)] Agresta S.Coop, España.

0009-0002-1455-9174, igonzalez@agresta.org ; 0009-0000-3865-4681, mguillen@agresta.org.

0000-0001-8350-5343, jesteban@agresta.org ; 0000-0003-2298-9115, jltome@agresta.org.

[(2)] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universidad Politécnica de Valencia.

0009-0003-6650-3487, abravo@agresta.org.

Resumen: La monitorización de perturbaciones en bosques mediterráneos cuenta con numerosos productos de detección de cambio (globales, europeos y nacionales). Sin embargo, la heterogeneidad en sensores, resolución espacial, cobertura temporal y leyendas dificulta su integración y explotación conjunta. En el marco del proyecto **RIGOR-MED**, cuyo objetivo es mejorar la representatividad y rigor estadístico de las observaciones, este trabajo evalúa una **armonización** multifuente integrando productos internos basados en Landsat y Sentinel-2 **(CCDC)** con **Global Forest Change (GFC)**, **European Forest Disturbance Atlas (EFDA)** y el **Sistema de Alertas y Cambios Anuales (EIKOS).** La armonización se fundamenta en (i) una leyenda común y reglas de ***cross-walking*** y (ii) **fusión espacio-temporal**. A partir de esta integración se generan mapas armonizados para la Península Ibérica y Baleares, aplicando dos estrategias alternativas de resolución de conflictos: prioridad por fuente y prioridad por clase. La validación con datos fotointerpretados, demuestra que **la armonización mejora la consistencia y fiabilidad respecto a los productos individuales**. Los mapas armonizados alcanzan una exactitud binaria del 99%, eliminan el error de comisión y reducen la omisión a valores inferiores al 32% (17% bajo una definición restrictiva de perturbación). En la validación temática, el enfoque mejora la detección de aprovechamientos manteniendo alta precisión y consigue sensibilidad completa para incendios, aunque con retos persistentes en la identificación de perturbaciones sutiles. En conjunto, los resultados respaldan que la integración multifuente constituye una vía eficaz para generar productos operacionales robustos de monitorización de perturbaciones.

Palabras clave: perturbaciones forestales; armonización; fusión espacio-temporal; validación;

Multi-source harmonization of forest disturbances: from existing products to robust mapping

***Abstract**: Monitoring disturbances in Mediterranean forests relies on numerous change detection products (global, European, and national). However, differences in sensors, spatial resolution, temporal coverage, and classification legends make their integration and joint use challenging. Within the framework of the **RIGOR-MED** project, which aims to improve the representativeness and statistical rigor of observations, this study evaluates a multi-source **harmonization** approach that integrates in-house products based on Landsat and Sentinel-**2 (CCDC) with Global Forest Change (GFC), the European Forest Disturbance Atlas (EFDA), and the Annual Alerts and Changes System (EIKOS)**. The harmonization is based on (i) a common legend and **cross-walking** rules, and (ii) **spatiotemporal fusion**. From this integration, harmonized maps are produced for the Iberian Peninsula and the Balearic Islands, applying two alternative conflict-resolution strategies: source-priority and class-priority. Validation against photo-interpreted reference data shows that **harmonization improves consistency and reliability compared with the individual products**. The harmonized maps achieve 99% binary accuracy, eliminate commission error, and reduce omission to values below 32% (17% under a restrictive definition of disturbance). In the thematic validation, the approach improves the detection of timber harvesting while maintaining high precision, and achieves full sensitivity for wildfires, although persistent challenges remain in identifying subtle disturbances. Overall, the results support multi-source integration as an effective pathway for generating robust operational products for disturbance monitoring.*

***Keywords**: forest disturbances; harmonization; spatio-temporal fusion; validation*

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques mediterráneos están cada vez más expuestos a perturbaciones naturales y antrópicas, lo que incrementa la necesidad de sistemas de monitorización consistentes que apoyen la gestión y la toma de decisiones y políticas públicas.

En este contexto, la teledetección proporciona un acceso sin precedentes a información multiescalar, reforzado por la creciente disponibilidad de productos de perturbaciones, actualizados de forma recurrente y con cobertura de escala regional a global (Stahl *et al*., 2023). Sin embargo, dichos productos proceden de distintos sensores, con resoluciones, periodos temporales y metodologías de detección/clasificaciones diferentes, lo que dificulta su integración y su uso operacional. Además, su validación no siempre es consistente, trazable ni rigurosa, lo que genera incertidumbre al interpretar discrepancias y medir cambios reproducibles.

El proyecto RIGOR-MED *(Remotely-sensed and Statistically Rigorous Monitoring of Disturbances in Mediterranean Forests)* busca mejorar la representación de perturbaciones en bosques mediterráneos combinado múltiples fuentes de información. Este trabajo tiene como objetivo cuantificar los beneficios de armonizar productos existentes frente a utilizarlos por separado.

2. MATERIAL

2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolla en la Península Ibérica y Baleares. Para restringir el análisis a áreas forestales se aplicó una máscara, binaria bosque no bosque, basada en el producto Copernicus Forest Type 2018 (10 m), alineada con la definición FAO, con unidad mínima mapeable de 0,5 ha y umbral de cobertura arbórea del 10%.

2.2. Productos de perturbaciones forestales

Para construir la cartografía armonizada de perturbaciones se integraron productos ampliamente utilizados, con alcances y niveles de detalle complementarios. Se emplearon:

- **Global Forest Change (GFC)** (Hansen *et al*., 2013), proporciona estimaciones anuales globales de pérdida de cobertura arbórea a 30 m desde el año 2000; es un producto consistente y actualizado, aunque no incluye la causa de la perturbación.
- **European Forest Disturbance Atlas (EFDA)** (Viana-Soto and Senf, 2024), con mapas anuales paneuropeos de perturbaciones para 1983–2023 a 30 m, que diferencia tipos de cambio específicos.
- **Sistema de Alertas y Cambios Anuales (EIKOS)**, un producto nacional vectorial para España (2020–2023) con detección casi en tiempo real y una leyenda centrada en pérdida de vegetación e incendios.
- Estos productos se complementan con cartografías anuales generadas en el marco de **RIGOR-MED** mediante el algoritmo Continuos Change Detection and Clasification (CCDC) (Zhu & Woodcock, 2014): (i) cartografía basada en Landsat (30m) (2018–2023) y (ii) cartografía basada en Sentinel-2 (20m) (2020–2023). Ambas fuentes clasificadas en cuatro tipos de perturbación.

3. METODOLOGÍA

3.1. Armonización

Para integrar productos de perturbaciones con leyendas, resoluciones y coberturas temporales distintas, se aplicó un flujo operativo basado en: (i) homogenización espacial y temporal, (ii) armonización temática (cross-walking) y (iii) fusión espacio-temporal a nivel píxel, generando dos mapas armonizados alternativos.

Antes de la integración, todos los productos se reproyectaron a EPSG:4326, se remuestrearon a 30 m, se aplicó la máscara forestal y se armonizó el marco temporal a una escala anual común (2020–2023) para todas las fuentes integradas.

Ontología común o cross-walking; permitió alinear las leyendas originales a una ontología común mediante tablas de correspondencia (Tabal 1), asegurando la coherencia entre fuentes (Soulard *et al*., 2017). La leyenda unificada consta de siete clases: sin dato (0), sin cambio (1), corta a hecho (2), clara (3), desbroce (4), incendio (5) y desconocido (6). En este esquema, la clase ‘clara’ integra eventos de reducción de cobertura de copa.

Tabla 1. Reglas de armonización. Leyendas original y común

Fuente	Clase original	Clase armonizada
CCDC (Landsat y Sentinel-2)	Sin dato	Sin dato
	Sin cambio	Sin cambio
	Corta a hecho	Corta a hecho
	Clara	Clara
	Desbroce	Desbroce
	Incendio forestal	Incendio forestal
GFC	Pérdida de cobertura arbórea	Desconocido
EFDA	Sin cambio	Sin Cambio
	Viento	Desconocido
	Aprovechamiento	Corta a hecho/Clara
	Incendio forestal	Incendio forestal
EIKOS	Incendio forestal	Incendio forestal
	Pérdida de vegetación	Desconocido

Los 'aprovechamientos' de EFDA se desagregaron en 'corta a hecho' o 'clara' mediante un modelo bayesiano que empleó distribuciones beta ajustadas con áreas de coincidencia EFDA-Landsat. La clase final se determinó por la mayor probabilidad *a posteriori*, aplicando parámetros predefinidos en casos de baja representatividad (< 10 píxeles por clase).

La **fusión espacio-temporal** a nivel de píxel se basó en una convergencia de evidencias: un píxel se etiqueta

como cambio solo si al menos dos fuentes lo detectan en una ventana de ±1 año. Esta regla reduce errores de comisión al integrar productos con distinta frecuencia de actualización (Soulard *et al*., 2017; Reiche *et al*., 2024). Los incendios de EIKOS se trataron como excepción, con prioridad absoluta. Los conflictos entre clases se resolvieron mediante dos estrategias:

- **Estrategia A (Prioridad por fuente):** Sistema de votación jerárquico basado la riqueza temática de los productos y la fiabilidad contrastada (EFDA > Landsat > EIKOS > Sentinel > GFC). En caso de empate en votos, prevalece la etiqueta de la fuente con mayor prioridad.
- **Estrategia B (Prioridad por clase):** Resolución de conflictos mediante una jerarquía temática establecida (Incendio > Corta a hecho > Clara> Desbroce). Ante empates, se impone la clase con mayor rango temático.

Ambas capas fueron evaluadas mediante validación independiente frente a los productos individuales bajo distintas definiciones de "cambio".

3.2. Validación

La validación utiliza una base de datos de referencia basadsa en fotointerpretación sistemática en Collect Earth Online (CEO) con imágenes Landsat, Sentinel-2 y PlanetScope. Se trata de una base de datos que consta de 2.796 unidades muestrales (250 x 250 m) y 3.453 polígonos de perturbación en 13 países europeos. En cada unidad se asignó una etiqueta binaria (cambio/no cambio) y, ante evidencias de alteración, se delinearon los polígonos registrando el año y tipo de evento. Para el ámbito de España, se analizaron 650 unidades, de las cuales 294 se identificaron como perturbación: 135 cortas a hecho, 94 claras, 52 desbroces y 13 incendios.

Se construyeron matrices de confusión a nivel de polígono comparando la referencia con la clase mayoritaria de cada mapa para estimar la exactitud global (OA) y los errores de omisión (OE) y comisión (CE). La evaluación constó de: 1) una **validación binaria** bajo dos definiciones de cambio: **específica** (según la leyenda de cada producto) y **restrictiva** (solo cortas a hecho e incendios), y 2) una **validación temática** para evaluar la capacidad de discriminación del tipo de perturbación (sin cambio, aprovechamiento forestal (corta y clara) e incendio).

4. RESULTADOS

4.1. Validación binaria (Cambio / No Cambio)

Definición específica por producto

Según los resultados de la Tabla 2, los productos armonizados (Estrategias A y B) mostraron un rendimiento superior y consistente (OA = 96,75%), destacando por su comisión nula (0%) y una omisión moderada (32,08%). Este comportamiento se debe al criterio de acuerdo mínimo, que actúa como un filtro para falsos positivos.

En comparación, algunos productos presentan un comportamiento más “conservador” (p. ej., Landsat: CE = 0% pero OE = 45,28%; GFC: CE = 0% y OE = 35,71%), mientras que otros incrementan la comisión (Sentinel-2: CE = 15%; EFDA: CE = 4,55%; EIKOS: CE = 23,08%), lo que sugiere desajustes temáticos o una definición más amplia de perturbación respecto a la referencia en esta configuración.

Tabla 2. Validación. Definición específica por producto

Fuente	OA %	OE % (cambio)	CE % (cambio)
Landsat	95,41	45,28	0,00
Sentinel-2	95,22	35,85	15,00
GFC	97,99	35,71	0,00
EFDA	94,96	54,35	4,55
EIKOS	97,19	28,57	23,08
Arm, (prio, fuente)	96,75	32,08	0,00
Arm, (prio, clase)	96,75	32,08	0,00

Definición restrictiva (cambios abruptos: cortas a hecho e incendios)

En este escenario, los mapas armonizados alcanzan el rendimiento óptimo con una exactitud global del 99%, reduciendo la omisión al 17,86% y manteniendo la comisión nula. La mejora en la detección radica en que los cambios abruptos generan una ruptura espectral más nítida que los eventos sutiles, y por tanto son más fácilmente detectables.

Tabla 3. Validación. Definición restrictiva (cortas e incendios)

Fuente	OA %	OE % (cambio)	CE % (cambio)
Landsat	98,19	32,14	0,00
Sentinel-2	96,99	32,14	24,00
GFC	97,99	35,71	0,00
EFDA	97,19	46,43	6,25
EIKOS	97,19	28,57	23,08
Arm, (prio, fuente)	99,00	17,86	0,00
Arm, (prio, clase)	99,00	17,86	0,00

En comparación, Landsat y GFC mantienen un perfil conservador (CE = 0%), pero con omisiones más altas (OE = 32,14% y 35,71%, respectivamente), mientras que Sentinel-2 y EIKOS presentan comisiones elevadas (CE = 24,00% y 23,08%), lo que sugiere que siguen detectando eventos que quedan fuera de esta definición restrictiva. La omisión de EFDA mejora ligeramente (hasta el 46,43%) mientras que la comisión desciende al 6,25%, lo que indica una mejora ligera bajo un marco de cambios más simple.

4.2. Exactitud temática (tipo de perturbación)

Tal como se puede ver en la tabla 4, en aprovechamiento, los productos armonizados fueron más consistentes al lograr la menor omisión (32,5-35%) y una comisión nula, superando a Sentinel-2 (OE = 37,5%; CE = 7,4%), Landsat (CE = 0%; OE = 47,5%), y EFDA (CE = 13,3%, OE = 67,5%). En la categoría incendio, la armonización no presentan error de omisión (OE = 0%). La omisión nula en incendios se debe a su prioridad en las reglas de fusión, lo que asegura su detección a costa de mayores falsos positivos,

probablemente por desajustes perimetrales.

Tabla 5. Resultados validación temática

Producto	Sin cambio	Aprovecha-miento	Incendios
Landsat	OE 0,0 CE 3,9	OE 47,5 CE 0,0	OE 16,7 CE 16,7
Sentinel-2	OE 0,4 CE 3,3	OE 37,5 CE 7,4	OE 16,7 CE 0,0
EFDA	OE 0,2 CE 5,1	OE 67,5 CE 13,3	OE 66,7 CE 71,4
Arm. (prio. fuente)	OE 0,0 CE 2,5	OE 35,2 CE 0,0	OE 0,0 CE 25,0
Arm. (prio. clase)	OE 0,0 CE 2,3	OE 32,5 CE 0,0	OE 0,0 CE 25,0

5. CONCLUSIONES

Los resultados respaldan la armonización como estrategia para explotar productos existentes y producir cartografías más consistentes y operativas para la monitorización forestal. Los productos armonizados presentan un equilibrio favorable entre omisión y comisión en todas las configuraciones de validación. Destacan las exactitudes obtenidas para los cambios abruptos (exactitud global cercana al 99%), que son más fácilmente detectables al presentar rupturas espectro-temporales más marcadas (Esteban *et al*., 2021, Giambelluca *et al*., 2025). Bajo la definición restrictiva (cortas a hecho e incendios), los mapas armonizados alcanzan un error de comisión nulo y una reducción clara de la omisión frente a varios productos individuales. Esta comisión nula es coherente con el enfoque conservador de coincidencia de al menos dos fuentes, que filtra detecciones aisladas y reduce falsos positivos.

Al ampliar la definición de cambio para incluir perturbaciones más sutiles, aumenta la omisión en los productos armonizados (del 17.86% al 32,08%), en línea con la naturaleza gradual y espacialmente fragmentada de estos procesos (Esteban *et al*., 2021, Giambelluca *et al*., 2025). Aunque la armonización no elimina esta dificulta intrínseca, mejora la exactitud respecto al uso de productos individuales.

En la validación temática, la armonización mejora la detección de aprovechamientos, al mantener una precisión elevada y reducir la omisión respecto a las fuentes individuales. En el caso de incendios, se obtiene omisión nula (OE=0%) a costa de una comisión apreciable (≈25%), coherente con desajustes temporales y/o espaciales entre productos y datos de referencia (fecha y delimitación del perímetro).

Finalmente, las dos estrategias de resolución de conflictos (prioridad por fuente frente a prioridad por clase) producen resultados prácticamente equivalentes, lo que indica que el criterio de acuerdo mínimo ya resuelve la mayor parte de discrepancias y que los conflictos restantes tienen un impacto limitado en el periodo analizado.

6. AGRADECIMIENTOS

El proyecto ha sido financiado en virtud del acuerdo de subvención n.º 101084481-FORWARDS-HORIZON-CL6-2022-CLIMATE-01 entre el EFI y la Agencia Ejecutiva de Investigación (REA) ('la autoridad otorgante'), en virtud de los poderes delegados por la Comisión Europea. La participación de Andrés Bravo-Núñez ha sido financiada por la ayuda DIN2024-013483 otorgada por el MCIN/AEI / 10.13039/501100011033.

7. REFERENCIAS

Esteban, J., Fernández-Landa, A., Tomé, J. L., Gómez, C., & Marchamalo, M. (2021). Identification of Silvicultural Practices in Mediterranean Forests Integrating Landsat Time Series and a Single Coverage of ALS Data. *Remote Sensing, 13*(18), 3611. https://doi.org/10.3390/rs13183611.

Giambelluca, A. L., Hermosilla, T., Álvarez-Mozos, J., & González-Audícana, M. (2025). Identifying forest harvesting practices: Clear-cutting and thinning in diverse tree species using dense Landsat time series. *Forest Ecology and Management, 578*, 122442.

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S., Tyukavina, A., ... & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science, 342*(6160), 850–853.

Reiche, J., Balling, J., Slagter, B., & Carter, S. (2024). Integrating satellite-based forest disturbance alerts improves detection timeliness and confidence. *Environmental Research Letters, 19(*5), 054011. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad2d82

Sistema de Alertas Mensuales y Anuales sobre la Superficie Forestal (MAAFS). (2024). EIKOS, Sistema de Seguimiento Territorial de los Ecosistemas. Subsistema de Información Territorial.

Soulard, C. E., Wilson, T. S., & Sleeter, B. M. (2017). Harmonization of forest disturbance datasets of the conterminous USA from 1986 to 2011. *Environ Monit Asses, 189*:17. https://doi.org/10.1007/s10661-017-5879-5

Stahl, A.T., Andrus, R., Hicke, J.A., Hudak, A.T., Bright, B.C., Meddens, A.J.H. (2023). Automated attribution of forest disturbance types from remote sensing data: A synthesis. *Remote Sensing of Environment 285*, 113416. https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113416

Viana-Soto, A., & Senf, C. (2024). The European Forest Disturbance Atlas: A Forest Disturbance Monitoring System Using the Landsat Archive. Published as an open-access preprint in *Earth System Science Data Discussions* (DOI: 10.5194/essd-2024-361).

Zhu, Z., Woodcock, C.E., 2014. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment 144*, 152–171. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.204

Deep Learning–Based Identification of LULUCF Categories Using a Mixture of Experts Architecture and Remote Sensing Data

García Martín, Sergio [1] **García Bruzón, Adrián** [1,3] **Arrogante Funes, Fátima** [1] **Martín de Diego, Isaac** [2] **Fernandez Isabel, Alberto** [2] **Álvarez Ripado, Ariadna** [1] **Martín González, Fidel** [4] **Aceña Gil, Víctor** [2] **Lancho Martín, María del Carmen** [2] **Arrogante Funes, Patricia** [1,3]

[1] Departamento de Tecnología Química y Ambiental, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, C/Tulipán s/n, Móstoles, Madrid, 28933, España.

[2] Departamento de Informática y Estadística, Laboratorio de Ciencia de Datos, Universidad Rey Juan Carlos, C/Tulipán s/n, Móstoles, Madrid, 28933, España.

[3] Grupo de investigación de alto rendimiento en Tecnologías para el Análisis y Diagnóstico Territorial (TADAT), Universidad Rey Juan Carlos, C/Tulipán s/n, Móstoles, Madrid, 28933, España.

[4] Área de geología, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles, 28933, España

ORCID: García Martín 0009-0009-7514-2488 García Bruzón 0000-0002-5364-6388 Arrogante Funes 0000-0003-1724-6173 Martín de Diego 0000-0001-5197-2932 Fernandez Isabel 0000-0002-0848-1190 Álvarez Ripado 0000-0003-2113-2005 Martín González 0000-0002-5239-1846 Aceña Gil 0000-0003-1838-2150 Lancho Martín 0000-0002-4674-1598 Arrogante Funes 0000-0003-1944-777X

Correspondencia: sergio.garcia.martin@urjc.es adrian.bruzon@urjc.es fatima.arrogante@urjc.es isaac.martin@urjc.es alberto.fernandez.isabel@urjc.es ariadna.ripado@urjc.es fidel.martin@urjc.es victor.acena@urjc.es carmen.lancho@urjc.es patricia.arrogante@urjc.es

ABSTRACT

In the context of climate policies, land use and land cover monitoring is a key component for assessing the LULUCF sector. In this regard, remote sensing combined with deep learning offers new opportunities for more consistent and spatially detailed mapping. The objective of this study is to evaluate the feasibility of a deep learning architecture based on a Mixture of Experts for the hierarchical identification of LULUCF categories, with a particular focus on forested areas. The proposed methodology relies on a cascaded architecture composed of three specialized U-Net models addressing contextual land-use classification, binary tree detection, and tree-species identification, using high-resolution SIOSE-AR data over an MTN50 sheet in northern Spain. Preliminary results indicate a coherent identification of spatial patterns and major land-use categories, although class imbalance remains a limiting factor. Overall, the approach shows strong potential for LULUCF monitoring using remote sensing data

Keywords: *Remote Sensing, Land Use and Land Cover (LULC), LULUCF Monitoring, Deep Learning, Mixture of Experts*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Deep Learning–Based Identification of LULUCF Categories Using a Mixture of Experts Architecture and Remote Sensing Data

García Martín, Sergio [1], García Bruzón, Adrián [1,3], Arrogante Funes, Fátima [1], Martín de Diego, Isaac [2], Fernandez Isabel, Alberto [2], Álvarez Ripado, Ariadna [1], Martín González, Fidel [4], Aceña Gil, Víctor [2], Lancho Martín, María del Carmen [2], Arrogante Funes, Patricia [1,3]

[1] Departamento de Tecnología Química y Ambiental, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, España.
0009-0009-7514-2488, sergio.garcia.martin@urjc.es ; 0000-0003-1724-6173, fatima.arrogante@urjc.es
0000-0003-2113-2005, ariadna.ripado@urjc.es

[2] Departamento de Informática y Estadística, Laboratorio de Ciencia de Datos, Universidad Rey Juan Carlos, España.
0000-0001-5197-2932, isaac.martin@urjc.es ; 0000-0002-0848-1190, alberto.fernandez.isabel@urjc.es
0000-0003-1838-2150, victor.acena@urjc.es ; 0000-0002-4674-1598, carmen.lancho@urjc.es

[3] Grupo de investigación de alto rendimiento en Tecnologías para el Análisis y Diagnóstico Territorial (TADAT), Universidad Rey Juan Carlos, España.
0000-0002-5364-6388, adrian.bruzon@urjc.es ; 0000-0003-1944-777X, patricia.arrogante@urjc.es

[4] Área de geología, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, España.
0000-0002-5239-1846, fidel.martin@urjc.es

Abstract: In the context of climate policies, land use and land cover monitoring is a key component for assessing the LULUCF sector. In this regard, remote sensing combined with deep learning offers new opportunities for more consistent and spatially detailed mapping. The objective of this study is to evaluate the feasibility of a deep learning architecture based on a Mixture of Experts for the hierarchical identification of LULUCF categories, with a particular focus on forested areas. The proposed methodology relies on a cascaded architecture composed of three specialized U-Net models addressing contextual land-use classification, binary tree detection, and tree-species identification, using high-resolution SIOSE-AR data over an MTN50 sheet in northern Spain. Preliminary results indicate a coherent identification of spatial patterns and major land-use categories, although class imbalance remains a limiting factor. Overall, the approach shows strong potential for LULUCF monitoring using remote sensing data.

Keywords: Remote Sensing, Land Use and Land Cover (LULC), LULUCF Monitoring, Deep Learning, Mixture of Experts

Identificación de categorías LULUCF basada en Deep Learning mediante una arquitectura de mezcla de expertos y datos de teledetección

***Resumen**: En el marco de las políticas climáticas, la monitorización del uso y la cobertura del suelo es fundamental para la evaluación del sector LULUCF. En este contexto, la teledetección y el uso de métodos de Deep Learning permiten avanzar hacia cartografías más precisas y detalladas. El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad de una arquitectura de Deep Learning basada en mezcla de expertos para la identificación jerárquica de categorías LULUCF, con especial atención a áreas forestales. La metodología se basa en una arquitectura en cascada compuesta por tres modelos U-Net especializados en clasificación contextual, detección binaria de arbolado e identificación de especies, utilizando cartografía SIOSE-AR de alta resolución sobre una hoja MTN50 del norte de España. Los resultados preliminares muestran una correcta identificación de patrones espaciales y de las principales categorías, aunque se ve afectada por el desbalanceo entre clases. En conjunto, el enfoque presenta un alto potencial para la monitorización LULUCF basada en datos de teledetección.*

***Palabras clave**: Teledetección, Uso y cobertura del suelo, Monitorización del LULUCF, Aprendizaje Profundo, Mezcla de expertos.*

1. INTRODUCTION

The Paris Agreement's temperature goals make the LULUCF sector crucial, since reaching mid-century targets requires balancing greenhouse gas emissions with removals by carbon sinks (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015). Under IPCC inventory guidelines, LULUCF assessment methods are organized into tiers, and EU member states must apply at least Tier 2 approaches while moving toward Tier 3 methods using spatially explicit models and detailed measurements (Eggleston *et al*., 2006) (Alley *et al*., 2007).

Advances in computing and Earth observation now enable higher-tier monitoring, with machine learning and deep learning offering scalable tools for land-cover classification and change detection (Radeva *et al*., 2023) (Habib & Connolly, 2023). These approaches can support EU regulatory expectations and sustainable land-use planning, including pollution reduction and biodiversity goals (Verburg *et al*., 2008).

However, maintaining high-resolution land-use cartography like SIOSE is highly labor-intensive, which contributes to datasets becoming outdated (Maniatis *et al*., 2021). The proposed deep learning approach could reduce the effort and time needed for land-use cataloguing and map updates and could later be adapted to tasks such as forest species recognition using imagery.

This study specifically evaluates a deep learning Mixture of Experts (MoE) architecture based on U-Net models to predict forest areas across Spain using SIOSE-derived LULUCF categories. By applying cascade inference with specialized experts, it aims to improve accuracy and computational efficiency, and to strengthen land-use assessment methods that support climate mitigation and adaptation planning.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Study area

This study was conducted in northern Spain, within the Cantabrian mountain range. The imagery derived from Spanish National Plan for Aerial Orthophotography (PNOA) and the area corresponds to the region of *Cangas del Narcea,* sheet 0050 of the *Mapa Topográfico Nacional* at 1:50,000 scale (MTN50) with spatial resolution of 0.25m. These images consist of three spectral bands in the visible domain (Red, Green, and Blue), which are commonly used for visual interpretation and high-resolution land-cover mapping. This sheet was used as a case study to develop the complete project workflow.

The high-resolution (HR) product of the *Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España* (SIOSE), known as SIOSE-HR, represents the most up-to-date polygon-based HR land-occupation cartography available for Spain (SIOSE, E.T.N., n.d.). The dataset used in this study corresponds to the 2017 release, which was also adopted as the reference year for the analysis. Using SIOSE-HR, only polygons within the boundaries of MTN50 sheet were retained by clipping the dataset to the sheet extent. In this product, the minimum mapping unit is 1 hectare (1 ha).

The remote sensing data were used as the primary input for all three expert models within the Mixture-of-Experts architecture. Image patches of fixed size (e.g., 512 × 512 pixels) were extracted and paired with corresponding rasterized labels derived from SIOSE-HR polygons.

2.2. Land use and categories

To categorize polygons based on canopy cover, we first applied a filter within the first expert to select classes corresponding to tree-related areas. This expert included the following categories: water, artificial surfaces, forested areas, crops, pasture and bare land. Polygons classified as forest were then transferred to the next expert, specializing in binary selection of tree presence.

Therefore, categorization has been conducted at three distinct levels: one in which the classes align with those designated by LULUCF, another design for refining using binary approach for presence of tree canopy and the other aiming to achieve separation down to the individual species.

2.3. Photointerpretation

Image datasets corresponding to each expert were manually evaluated to enhance the overall quality of the training data. Images were assigned to three quality categories: high-quality images, used for model training; medium-quality images, used for model tuning and validation; and low-quality images, reserved for global system testing.

In this context, quality is defined as the degree to which polygon labels accurately represent real-world conditions. The classification criteria comprised (i) label assignment accuracy and (ii) the delineation quality of polygon boundaries. To support this process, a dedicated methodology was developed based on visual verification through the superimposition of polygons onto the corresponding imagery (Maniatis *et al*., 2021) (Figure 1a).

2.4. Model inputs and predictors

The input data for the deep learning models consist of image patches extracted from RGB orthophotos, along with their corresponding segmentation masks derived from SIOSE-HR data. In addition to raw spectral information, the models implicitly learn spatial and contextual features such as texture, shape, and spatial relationships between land-cover elements through convolutional operations. These features are particularly relevant for distinguishing between land-use categories and for identifying tree canopy structures.

Unlike traditional machine learning approaches, where predictors are explicitly defined, convolutional neural networks automatically extract hierarchical feature representations from the input imagery. Consequently, the importance of individual predictors cannot be directly obtained from model coefficients.

2.5. Model architecture

In this study, we investigate the use of deep learning, specifically, U-Net–based modelling, combined with a

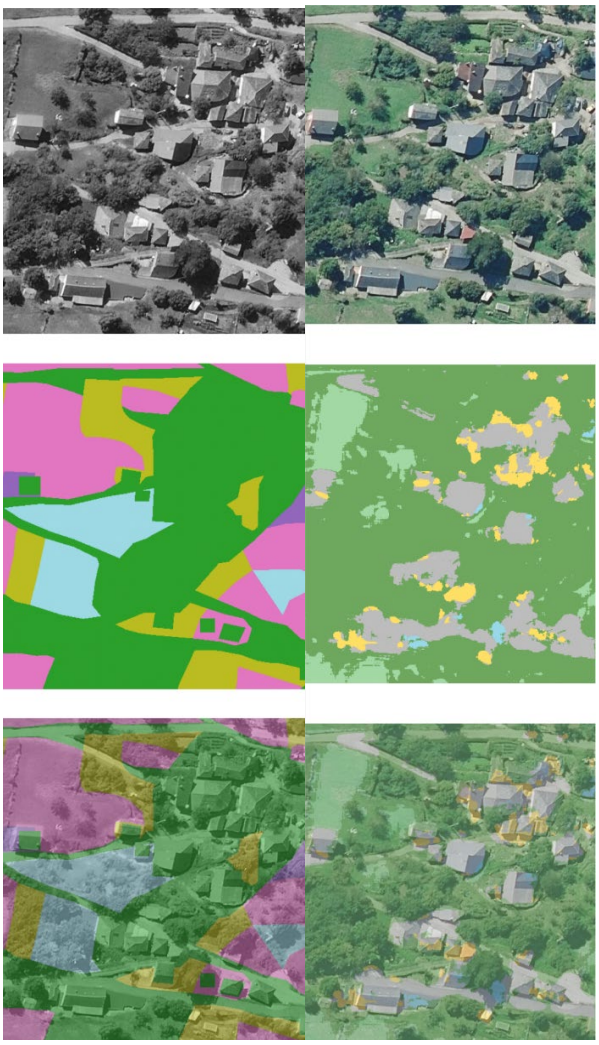


Figure 1a. Verification images to assess quality. Top superposition of mask and image, middle image, bottom mask. Green: artificial, Pink: crops, Yellow: pasture, Blue: forest, Purple: bare land.

Figure 1b. Predicted masks generated by the model. Top superposition of mask and image, middle image, bottom mask. Dark green: forest, Light green: crops, Yellow: bare land, Grey: artificial, Blue: water.

Mixture-of-Experts (MoE) architecture that integrates three independent expert models, each addressing a distinct task. The workflow establishes a cascade in which information is progressively filtered and refined from one expert to the next, providing increasingly informative inputs for subsequent inference (Figure 2).

Each expert serves a specific purpose. The first model, the context expert, identifies structural patterns and land-use classes, including forest cover. The second model, the binary expert, takes as input the forest-related information produced by the context expert and refines it, yielding a substantially more precise delineation. This design markedly reduces computational cost and runtime, as the species expert is applied exclusively to areas where tree presence is confidently detected.

Although architecture comprises three distinct models, the system is designed to produce results jointly. Accordingly, evaluation metrics are primarily reported at the system level; however, intermediate assessments

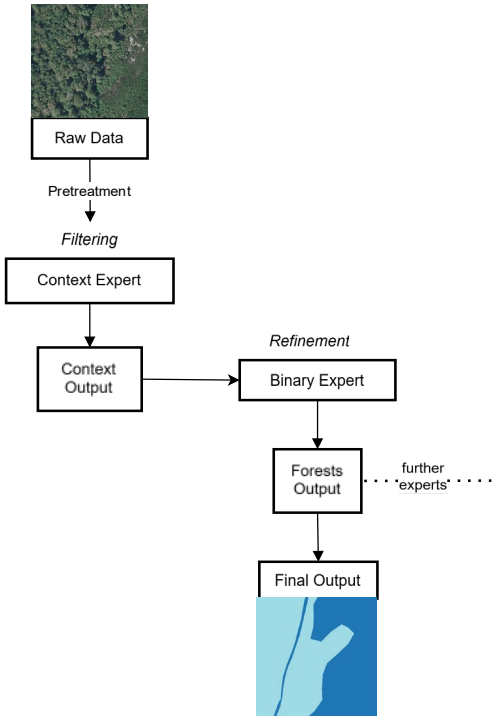


Figure 2: Cascade inference using mixture of experts architecture.

were also conducted to quantify the performance of individual experts and to ensure the robustness of each component.

3. RESULTS AND DISCUSSION

At the current stage of the study, preliminary results obtained from the proposed modelling framework (Figure 1b) are encouraging. Despite de exploratory nature of the current implementation and with further refinements, the model is already able to recognize structural patterns and delineate terrain boundaries between major land-use classes.

However, an important limitation at this stage concerns class imbalance with the available datasets. At this stage, only a single MTN50 sheet has been used to assess the feasibility of the proposed approach and to validate the correct operation of the processing pipeline. This limitation expected to be addressed in subsequent phases by incorporating additional MNT50 sheets, thereby increasing the representation of under-represented classes and reducing the relative dominance of more frequent categories such as pasture or cropland.

Given the preliminary nature of the study and the limited spatial extent currently analyzed, this work focuses primarily on qualitative and visual assessment of model outputs. A comprehensive quantitative evaluation including class-specific performance metrics is planned once the dataset is expanded and class imbalance is mitigated (Table 1).

Table 1. Preliminary metrics for individual models and cascade. PixAcc: % of pixels correctly clasified, mIoU: IoU mean for all classes, F1macro: F1 mean for all classes.

Metric	Context	Binary	Cascade
pixAcc	0.6599	0.6183	0.6009
mIoU	0.3156	0.3569	0.3418
F1macro	0.4565	0.4779	0.4600

The adoption of this methodology within remote sensing and cartographic production could represent a substantial shift in how high-resolution mapping and LULUCF categorization are implemented (Radeva *et al*., 2023) (Verburg *et al*., 2008). Specifically, the proposed approach aims to reduce the time required to construct and update maps while improving the consistency and reliability of polygon-level classification. Moreover, the underlying architecture is readily transferable and could be adapted to a broad range of related tasks, including land-use characterization and the detection of structural patterns in the landscape.

Nevertheless, several challenges remain. A major limitation, common to many deep learning pipelines, concerns data storage and management. Remote sensing datasets typically comprise large volumes of high-resolution imagery and associated products, making them difficult to store, curate, and process at scale (Müller *et al*., 2019). Without adequate infrastructure, assembling representative datasets can be a bottleneck for model development and evaluation. Despite these constraints, it is feasible to establish streamlined pipelines based on smaller, well-curated datasets, which can be easier to assess, validate, and replicate while still providing meaningful experimental evidence.

4. CONCLUSIONS

This work presents a methodology that integrates deep learning and data science with traditional labeling to address key limitations of manual LULUCF assessment. Although still under development, the current results and processing pipeline demonstrate its feasibility while highlighting challenges that warrant further refinement.

The proposed framework seeks to reduce temporal obsolescence and improve spatial detail in cartographic products by streamlining the production and revision of thematic maps, enabling more frequent updates as new observations become available. This is particularly relevant in dynamic landscapes, where land cover and land use are subject to rapid changes driven by urban expansion, agricultural practices, natural disturbances, or seasonal variability.

Furthermore, the methodology has the potential to enhance spatial precision and consistency at finer scales, mitigating common issues in traditional workflows such as operator subjectivity, heterogeneous interpretation criteria, and polygon generalization due to production constraints. Overall, it provides a pathway toward more accurate and up-to-date cartographies, strengthening monitoring capabilities and supporting improved decision-making in environmental management, land-use planning, and LULUCF reporting.

Finally, the framework could be extended to additional land-surface structures and processes (e.g., forest restoration, vegetation damage, or cropland and pasture abandonment), with the broader aim of establishing a standardized modeling approach applicable to multiple land-cover–related tasks.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This study is funded by the “Rey Juan Carlos University (Madrid)” within the project titled “Inteligencia artificial y teledeteccion avanzada para la evaluación de elementos vulnerables a incendio en la interfaz urbano-forestal.” (Ref: 2025/SOLCON-162961). Ariadna Álvarez Ripado is funded by the predoc contract from the Comunidad de Madrid (Ref. IND2023/AMB-28820).

6. REFERENCES

Alley, R., Berntsen, T., Bindoff, N.L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Friedlingstein, P., Zwiers, F. (2007). Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland, 21p.

Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (2006). Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Habib, W., Connolly, J. (2023). A national-scale assessment of land use change in peatlands between 1989 and 2020 using Landsat data and Google Earth Engine—a case study of Ireland. *Regional Environmental Change, 23*(4), 1–16.

Maniatis, D., Dionisio, D., Guarnieri, L., Marchi, G., Mollicone, D., Díaz, A.S.P., Morales, C. (2021). Toward a more representative monitoring of land-use and land-cover dynamics: The use of a sample-based assessment through augmented visual interpretation using open foris collect earth. *Remote Sensing, 13*(21).

Müller, F., Jaeger, D., Hanewinkel, M. (2019). Digitization in wood supply – A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. *Computers and Electronics in Agriculture, 162*(April 2018), 206–218.

Radeva, K., Filchev, L., Dimitrov, P., Kirilova, S. (2023). Application of remote sensing to provide support for GHG emissions and removals inventory from LULCF: a case study in Bulgaria. In Ninth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2023), Vol. 12786, 524–540.

SIOSE, E.T.N. (n.d.). Documento Técnico SIOSE 2011.

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015).

Verburg, P.H., Eickhout, B., Meijl, H. (2008). A multi scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of European land use. *Annals of Regional Science, 42*(1), 57–77.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.246

Análisis comparativo de técnicas de filtrado de vegetación para la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) a partir de datos fotogramétricos (RGB y multiespectrales) y LiDAR con dron en viñedos

González-Moreno, María Teresa [1] **Cambronero-Ruiz, Laura** [1] **Rodríguez-Galiano, Víctor** [2] **Rodrigo-Comino, Jesús** [1]

[1] Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Andalusian Research Institute in Data Science and Computational Intelligence, DaSCI, 18071, Universidad de Granada, Granada, España.

[2] Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Facultad de Geografía e Historia, 41004, Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

ORCID: González-Moreno 0009-0002-9675-9099 Cambronero-Ruiz 0009-0003-0874-9833 Rodríguez-Galiano 0000-0002-5422-8305 Rodrigo-Comino 0000-0002-4823-0871

Correspondencia: mteresagm@ugr.es lauracambro@ugr.es vrgaliano@us.es jesusrc@ugr.es

RESUMEN

El uso de Modelos Digitales de Elevación (MDE) derivados de sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*) desde drones y satélites se ha consolidado como referencia en estudios ambientales y territoriales. No obstante, esta adquisición de datos implica costes económicos, operativos y de procesamiento que pueden limitar su disponibilidad. En este escenario, los sistemas RGB y multiespectrales se presentan como una alternativa más accesible económicamente. Esta investigación analiza diferentes metodologías para la generación controlada de MDEs a partir de un vuelo realizado con un dron DJI Mavic 3 Multispectral. El objetivo es evaluar si los MDEs obtenidos mediante filtrado morfológico, discriminación espectral e interpolación pueden aproximarse al derivado de un vuelo LiDAR (DJI Zenmuse L2). El análisis se desarrolla en un viñedo localizado en el municipio de Villamena (Granada, España), donde las imágenes fueron obtenidas en condiciones comparables (hora del día similar y etapa fenológica). Los resultados evidencian diferencias altimétricas sistemáticas entre los modelos generados por defecto por los programas de procesamiento de las imágenes de ambos drones, y sugieren una mayor capacidad del LiDAR para detectar la superficie del terreno con menor influencia de la vegetación, si bien los enfoques fotogramétricos muestran potencial para aproximarse a dichos resultados bajo un procesamiento controlado. Este trabajo constituye una fase preliminar orientada a establecer un marco metodológico reproducible para la generación y evaluación de MDE fotogramétricos frente a referencia LiDAR.

Palabras clave: *Modelo Digital de Elevación (MDE), Fotogrametría UAV, LiDAR, Imágenes multiespectrales, Filtrado de vegetación.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis comparativo de técnicas de filtrado de vegetación para la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) a partir de datos fotogramétricos (RGB y multiespectrales) y LiDAR con dron en viñedos

González-Moreno, María Teresa [(1)], Cambronero-Ruiz, Laura [(1)], Rodríguez-Galiano, Víctor [(2)], Rodrigo-Comino, Jesús [(1)]

[(1)] Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Andalusian Research Institute in Data Science and Computational Intelligence, DaSCI, Universidad de Granada, España.

0009-0002-9675-9099, mteresagm@ugr.es ; 0009-0003-0874-9833, lauracambro@ugr.es

0000-0002-4823-0871, jesusrc@ugr.es

[(2)] Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Sevilla, España.

0000-0002-5422-8305, vrgaliano@us.es.

Resumen: El uso de Modelos Digitales de Elevación (MDE) derivados de sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*) desde drones y satélites se ha consolidado como referencia en estudios ambientales y territoriales. No obstante, esta adquisición de datos implica costes económicos, operativos y de procesamiento que pueden limitar su disponibilidad. En este escenario, los sistemas RGB y multiespectrales se presentan como una alternativa más accesible económicamente. Esta investigación analiza diferentes metodologías para la generación controlada de MDEs a partir de un vuelo realizado con un dron DJI Mavic 3 Multispectral. El objetivo es evaluar si los MDEs obtenidos mediante filtrado morfológico, discriminación espectral e interpolación pueden aproximarse al derivado de un vuelo LiDAR (DJI Zenmuse L2). El análisis se desarrolla en un viñedo localizado en el municipio de Villamena (Granada, España), donde las imágenes fueron obtenidas en condiciones comparables (hora del día similar y etapa fenológica). Los resultados evidencian diferencias altimétricas sistemáticas entre los modelos generados por defecto por los programas de procesamiento de las imágenes de ambos drones, y sugieren una mayor capacidad del LiDAR para detectar la superficie del terreno con menor influencia de la vegetación, si bien los enfoques fotogramétricos muestran potencial para aproximarse a dichos resultados bajo un procesamiento controlado. Este trabajo constituye una fase preliminar orientada a establecer un marco metodológico reproducible para la generación y evaluación de MDE fotogramétricos frente a referencia LiDAR.

Palabras clave: Modelo Digital de Elevación (MDE), Fotogrametría UAV, LiDAR, Imágenes multiespectrales, Filtrado de vegetación.

Comparative analysis of vegetation filtering techniques for Digital Elevation Model (DEM) generation from multispectral UAV imagery and UAV-LiDAR data in vineyards

***Abstract**: The use of Digital Elevation Models (DEMs) derived from LiDAR sensors has become a reference in environmental and territorial studies. However, the acquisition of LiDAR data involves operational and processing costs that may limit their availability. In this scenario, RGB and multispectral systems emerge as a more economically accessible alternative. This study analyzes different methodologies for the controlled generation of DEMs from a flight conducted with a DJI Mavic 3 Multispectral drone. The objective is to assess whether DEMs produced through morphological filtering, spectral discrimination, and spatial interpolation can approximate the one derived from a LiDAR flight (DJI Zenmuse L2 sensor). The analysis is carried out in a vineyard located in the municipality of Villamena (Granada, Spain), where both sensors were operated under comparable conditions (similar time of day and phenological stage). The results reveal systematic altimetric differences between the default models generated by the processing software of both drone platforms and suggest a greater capacity of LiDAR to detect the ground surface with reduced vegetation influence. Nevertheless, the photogrammetric approaches show potential to approximate these results under controlled processing conditions. This work*

represents a preliminary phase aimed at establishing a reproducible methodological framework for the generation and evaluation of photogrammetric DEMs against a LiDAR reference.

***Keywords**: Digital Elevation Model (DEM), UAV photogrammetry, LiDAR, Multispectral imagery, Vegetation filtering.*

1. INTRODUCCIÓN

Los MDS y MDE se emplean ampliamente en hidrología, geomorfología y estudios de vegetación desde hace varias décadas (Bamber, 1994; James *et al*., 2019; Roy *et al*., 2025; Schaap *et al*., 2024). La modelización adecuada de estos procesos requiere que éstos sean de alta resolución y calidad (Pereira-Zamboni *et al*., 2024). Aunque los MDS pueden resultar útiles, en ocasiones es fundamental extraer la superficie del terreno libre de vegetación, ya que esta no representa la topografía real y puede introducir errores en los análisis (Anders *et al*., 2019).

Los drones han facilitado la adquisición de datos de alta resolución en áreas de difícil acceso, permitiendo obtener información con mayor detalle espacial (Viles, 2016). El LiDAR, como técnica activa de teledetección capaz de generar nubes de puntos a partir de las cuales se obtienen MDS y MDE de elevada precisión, mejora la representación del territorio frente a sensores pasivos multiespectrales (Liu, 2008; Ma *et al*., 2018), pero su alto coste resulta limitante.

Para la extracción del terreno se han desarrollado métodos basados en morfología matemática, cálculo de pendientes, segmentación o redes triangulares irregulares (Sithole, 2005; Zhang y Lin, 2013), que permiten eliminar objetos situados sobre el suelo, aunque con limitaciones en determinados contextos. En los últimos años han adquirido creciente relevancia los enfoques basados en *deep learning* o aprendizaje profundo, especialmente mediante redes neuronales convolucionales (Gruszczyński *et al*., 2019) y arquitecturas tipo *U-Net* (Na *et al*., 2020), así como su combinación con técnicas de procesamiento por ventanas, orientadas a mejorar la segmentación y clasificación del terreno. Pese a sus resultados prometedores en precisión y rendimiento en escenarios complejos, requieren elevados tiempos de entrenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de datos.

El objetivo de este trabajo es evaluar distintas metodologías para la generación de MDE a partir de un vuelo con dron multiespectral y compararlas con un MDE derivado de un vuelo LiDAR, con el fin de evaluar las diferencias con soluciones más económicas/operativas. El uso de MDEs obtenidos a partir de drones permitirá analizar con mayor detalle la dinámica topográfica y los procesos geomorfológicos, facilitando la detección temprana de cambios y una toma de decisiones más fundamentada para su gestión y conservación.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La parcela experimental para la prueba es un viñedo ubicado en el municipio de Villamena, en la comarca del Valle de Lecrín, provincia de Granada (Fig. 1).



Figura 1. Área de estudio (a) Localización en España. (b) Vista desde satélite de la parcela. (c) Imagen del viñedo.

Se trata de una plantación de aproximadamente 10 años de antigüedad y 1 km de longitud, caracterizada por una estructura regular en hileras y una topografía suavemente ondulada. El área se sitúa en el Complejo Alpujárride, con predominio de materiales carbonatados, lo que condiciona la dinámica geomorfológica local y la respuesta del relieve a escala microtopográfica (Cambronero-Ruiz *et al*., 2025). La presencia de vegetación espontánea asociada al cultivo como cubierta entre las calles convierte el emplazamiento en un escenario adecuado para evaluar técnicas de eliminación de vegetación en la generación de MDE a partir de datos de dron.

2.2. Fuentes de datos

Los datos fotogramétricos utilizados provienen de un dron DJI Mavic 3 Multispectral y un DJI MATRICE 350 (sensor LiDAR Zenmuse L2). El vuelo LiDAR se llevó a cabo entre los días 4 y 5 de junio de 2025 y cubrió un área de 0,378 km². Se ejecutaron tres vuelos a alturas comprendidas entre 51,9 y 77,8 m y velocidad media aproximada de 4,1 m/s, mediante pasadas paralelas en modo lineal. La georreferenciación se realizó mediante posicionamiento RTK y se apoyó en 10 puntos de control terrestre medidos con GPS RTK con precisión de 0,20 cm. La nube de puntos alcanzó una densidad media de 1702 pts/m². El procesamiento se efectuó en DJI Terra (v5.1.0), incluyendo optimización geométrica, suavizado y clasificación automática de puntos de terreno. Se generaron ortomosaico y MDS de alta resolución (1,6 y 3,2 cm respectivamente), así como MDE con resolución de 10 cm. La solución POS fue fija en el 100% de la trayectoria, con *Root Mean Square Error* (RMSE)

promedio de 0,005-0,007 m en XYZ, indicando precisión milimétrica en la georreferenciación.

El vuelo de Mavic 3 Multispectral se realizó el día 23 de julio de 2025, mediante misión automatizada en rejilla con cámara en configuración nadiral, a una altura de 65 m, velocidad aproximada de 5,8 m/s y 70 % de solape. Se adquirió un bloque RGB (521 imágenes) y un bloque multiespectral de cuatro bandas (Green, Red, Red Edge y NIR; 2084 imágenes). El procesamiento se efectuó en Pix4Dmapper (v4.9.0), y la georreferenciación se realizó mediante 19 puntos de control, alcanzando un *Root Mean Square* (RMS) de 0,013 m en RGB y 0,046 m en multiespectral. Además de las bandas individuales y el índice NDVI con resolución aproximada de 3,7 cm, se generaron ortomosaico y MDS con resolución de 2,27 cm y MDE a 11,3 cm, así como nube de puntos densificada en el bloque RGB. Más información con ejemplos del uso y planificación con estos drones se puede encontrar en Rodrigo-Comino *et al*. (2026).

2.3. Metodologías aplicadas

Los vuelos fueron reproyectados al mismo sistema de coordenadas, remuestreados y alineados entre celdas, para garantizar su compatibilidad y comparabilidad. Después, se han aplicado diferentes metodologías para la obtención de MDE alternativos al generado por defecto en Pix4Dmapper.

Uno de los métodos empleados es el propuesto por González-Moreno y Rodrigo-Comino (2025), que consta de cuatro etapas: (i) aplicación de un filtro morfológico del complemento SAGA en QGIS (v3.40.10) para suavizar la vegetación (método *Opening*, kernel circular y radio de 25 píxeles); (ii) generación de un MDS normalizado (nMDS); (iii) eliminación de la vegetación mediante el establecimiento de un umbral basado en la capa anterior (0,05 m, tras análisis del histograma del nMDS e inspección visual); y (iv) aplicación de distintos métodos de interpolación (*IDW*, *Kriging* en sus distintas variantes, *RBF*, entre otros) (Gomroki *et al*., 2017; Anders *et al*., 2019), seleccionando el más preciso tras su evaluación a través del cálculo de R^2 y RMSE. Otras metodologías parten de datos diferentes al MDS generado por Pix4D. En otro enfoque, se utiliza el NDVI como base para la discriminación de la vegetación, estableciendo un umbral a partir de dicho índice.

Tras la generación de diferentes prototipos de MDE, se procederá a su comparación mediante inspección visual y operaciones matemáticas a nivel de píxel, incluyendo el cálculo de métricas descriptivas y de error entre los MDE generados.

3. RESULTADOS

Se presentan los primeros resultados basados en análisis descriptivo y en la inspección de algunos de los procesos metodológicos aplicados.

Tabla 1. Caracterización preliminar de MDEs fotogramétrico y LiDAR por defecto (metros).

MDE	Min.	Max.	Media	Desv.
Fotogramétrico	753,4	777,8	762,4	3,9
LiDAR	751,4	776,9	760,9	4,1

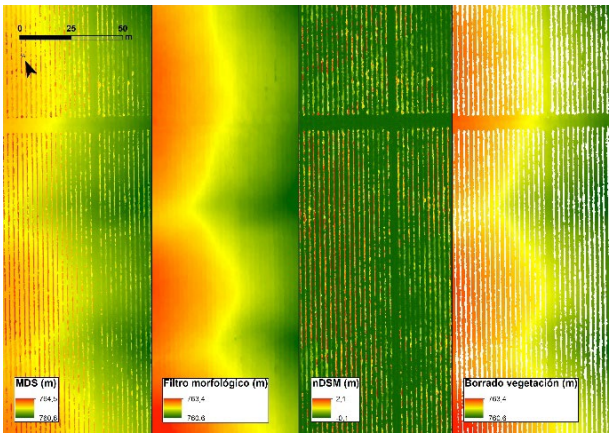


Figura 2. Secuencia de conversión MDS-MDE (metodología González-Moreno y Rodrigo-Comino, 2025).

Los resultados muestran diferencias altimétricas sistemáticas (Tabla 1) con valores medios ligeramente inferiores en el MDE LiDAR, lo que podría indicar una mayor capacidad de detección del terreno a nivel del suelo. Asimismo, el MDE LiDAR presenta una desviación estándar ligeramente superior, lo que sugiere mayor heterogeneidad altimétrica. En la Figura 2 se muestra el proceso de conversión de MDS a MDE (González-Moreno y Rodrigo-Comino, 2025), donde se observa la secuencia de suavizado de la vegetación (filtro morfológico), generación del nMDS y eliminación de la vegetación a partir del MDS, para la posterior aplicación de distintos métodos de interpolación.

4. PRIMERAS CONCLUSIONES

Los resultados preliminares evidencian diferencias altimétricas sistemáticas entre los MDE generados por defecto a partir de los vuelos fotogramétrico y LiDAR. Las metodologías alternativas aplicadas sobre los datos fotogramétricos muestran potencial para generar MDE controlados mediante la combinación de filtrado morfológico, discriminación espectral e interpolación espacial. Asimismo, la parametrización del filtrado y la selección del método de interpolación se perfilan como factores determinantes en la calidad final del modelo. Aunque la validación cuantitativa detallada se encuentra en desarrollo, y en consonancia con investigaciones previas, se considera que, bajo un procesamiento adecuado, los datos fotogramétricos podrían aproximarse de forma consistente a los modelos derivados de LiDAR, especialmente en superficies agrícolas relativamente homogéneas.

5. AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría mostrar agradecimiento al proyecto europeo SOILCRATES (Grant Agreement No. 101157354), financiado por la Unión Europea en el marco de Horizon Europe - the Framework Programme for Research and Innovation (2021-2027); los proyectos SOSVITI (MSCE). Call: HORIZON-MSCA-2023-SE-01 (MSCA Staff Exchanges 2023) y GOSOSVITI: Creación de una herramienta DSS (Decision Support System) para el manejo sostenible del suelo en viticultura; y al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, bajo

el proyecto “Desarrollo de productos basados en los nuevos sensores satelitales hiperespectrales europeos e ia para la caracterizacion de estresores en tierras de cultivo (HIPROESTRES)” (PID2023-152656OB-I00), dentro del Programa Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación (2021–2023).

6. REFERENCIAS

Anders, N., Valente, J., Masselink, R., & Keesstra, S. (2019). Comparing filtering techniques for removing vegetation from UAV-based photogrammetric point clouds. *Drones, 3*(3), 61. https://doi.org/10.3390/drones3030061

Bamber, J. L. (1994). A digital elevation model of the Antarctic ice sheet derived from ERS-1 altimeter data and comparison with terrestrial measurements. *Annals of Glaciology, 20*, 48-54. https://doi.org/10.3189/1994AoG20-1-48-54

Cambronero, L., Yu, Y., & Rodrigo-Comino, J. (2025). Scaling up analysis of human impacts on hydrological connectivity in Mediterranean viticultural landscapes: From hillslope to a watershed perspective. *Ecohydrology & Hydrobiology, 25*(4). https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2025.100700

DJI. (2025). DJI Terra v5.1.0 [Software]. https://www.dji.com/dji-terra

Gomroki, M., Jafari, M., Sadeghian, S., & Azizi, Z. (2017). Application of intelligent interpolation methods for dtm generation of forest areas based on lidar data. PFG–Journal of Photogrammetry, *Remote Sensing and Geoinformation Science, 85*(4), 227-241. https://doi.org/10.1007/s41064-017-0025-0

González-Moreno, M. T., & Rodrigo-Comino, J. (2025). Geostatistical Vegetation Filtering for Rapid UAV-RGB Mapping of Sudden Geomorphological Events in the Mediterranean Areas. *Drones, 9*(6), 441. https://doi.org/10.3390/drones9060441

James, M. R., Chandler, J. H., Eltner, A., Fraser, C., Miller, P. E., Mills, J. P., ... & Lane, S. N. (2019). Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. *Earth Surface Processes and Landforms, 44*(10), 2081-2084. https://doi.org/10.1002/esp.4637

Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. Progress in Physical *Geography, 32*(1), 31-49. https://doi.org/10.1177/0309133308089496

Ma, H., Zhou, W., & Zhang, L. (2018). DEM refinement by low vegetation removal based on the combination of full waveform data and progressive TIN densification. ISPRS *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 146*, 260-271. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.009

Na, J., Xue, K., Xiong, L., Tang, G., Ding, H., Strobl, J., & Pfeifer, N. (2020). UAV-based terrain modeling under vegetation in the chinese Loess plateau: A deep learning and terrain correction ensemble framework. *Remote Sensing, 12*(20), 3318. https://doi.org/10.3390/rs12203318

Pereira-Zamboni, P. A. P., Hendrickx, H., Sprute, D., Flatt, H., Rushdi, M. I., Brodrecht, F., & Eltner, A. (2024). Synergistic image and point cloud processing of UAV data for urban flood modeling: point cloud smart thinning and curb mapping. The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48*, 483-490. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-483-2024

Pix4D SA. (2025). Pix4Dmapper v4.9.0 [Software]. https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/

QGIS Development Team. (2026). QGIS Geographic Information System v3.40.10 [Software]. https://qgis.org/

Rodrigo Comino, J., Gatea Al-Shammary, A. A., Durán Zuazo, V. H., Serrano Bernardo, F. A., Caballero Calvo, A., & Rodríguez-Galiano, V. (2025). The Limits of RGB-Based Vegetation Indexes under Canopy Degradation: Insights from UAV Monitoring of Harvested Cereal Fields. *Drones and Autonomous Vehicles, 3*(1). https://doi.org/10.70322/dav.2025.10021

Roy, D., Desai, V. R., & Aithal, B. H. (2025). A GIS-based integrated assessment of geomorphometry with land use dynamics for topographically harsh ungauged watershed. *Journal of Earth System Science, 134*(2), 101. https://doi.org/10.1007/s12040-025-02557-7

Schaap, P., van der Velde, Y., de Louw, P., & Bartholomeus, H. (2024). DTM resolution controls the accuracy of estimating surface runoff indicators in flat, lowland landscapes. *Hydrological Processes, 38*(5), e15173. https://doi.org/10.1002/hyp.15173

Sithole, G. (2005). Segmentation and classification of airborne laser scanner data (Vol. 59). Netherlands Geodetic Commission.

Viles, H. (2016). Technology and geomorphology: Are improvements in data collection techniques transforming geomorphic science?. Geomorphology, 270, 121-133. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.011

Gruszczyński, W., Puniach, E., Ćwiąkała, P., & Matwij, W. (2019). Application of convolutional neural networks for low vegetation filtering from data acquired by UAVs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 158*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.09.014

Zhang, J., & Lin, X. (2013). Filtering airborne LiDAR data by embedding smoothness-constrained segmentation in progressive TIN densification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 81*, 44-59. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.001

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.255

Becerra, J.; Álvarez-Martínez, J.; Jiménez-Alfaro, B.; Hugé, J.; Dewaissage, C.; Poray, C.; Papadakis, D.; Cost, A.; Sousa, A. CLMS Protected Areas: un enfoque semiautomático de uso del suelo y cobertura del suelo (LULC) basado en información de series temporales de alta resolución de Copernicus y su conexión con la cartografía de hábitats.

CLMS Protected Areas: un enfoque semiautomático de uso del suelo y cobertura del suelo (LULC) basado en información de series temporales de alta resolución de Copernicus y su conexión con la cartografía de hábitats.

Becerra, Javier [1] **Álvarez-Martínez, José Manuel** [2] **Jiménez-Alfaro, Borja** [2] **Hugé, Justine** [3] **Dewaissage, Carlos** [3] **Poray, Chris** [4] **Papadakis, Dimitri** [4] **Cost, Adrián** [1] **Sousa, Ana** [5]

[1] COTESA, España

[2] CSIC-IMIB, UNIVERSITY OF OVIEDO

[3] COLLECTE LOCALISATION SATELLITES, CLS

[4] EVENFLOW

[5] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA)

ORCID: Becerra 0009-0004-5253-3746 Álvarez-Martínez 0000-0002-8150-0802 Jiménez-Alfaro 0000-0001-6601-9597 Cost 0009-0002-5484-4869

Correspondencia: javierbecerra@grupotecopy.es jm.alvarez@uniovi.es jimenezalfaro@uniovi.es jhuge@groupcls.com cdewasseige@groupcls.com chris@evenflow.eu dimitri@evenflow.eu adriancost@grupotecopy.es ana.sousa@eea.europa.eu

RESUMEN

El seguimiento del uso del suelo y la cobertura del suelo (LULC) es esencial para comprender la dinámica del paisaje y su interacción con las actividades humanas, especialmente en un contexto de cambios ambientales globales. El Servicio de Monitoreo de la Tierra de Copernicus (CLMS) ofrece una gama de productos LULC multi anuales, entre ellos el veterano CORINE Land Cover y las más recientes capas de Monitoreo de Áreas Prioritarias orientadas a zonas clave como áreas urbanas, ribereñas, costeras y espacios Natura 2000. Los productos previos del CLMS sobre LULC se han basado principalmente en la fotointerpretación manual, lo que ha supuesto limitaciones en la resolución espacial, la reproducibilidad y la eficiencia. PA-2021 presenta un flujo de trabajo novedoso y semiautomático que utiliza series temporales de Sentinel-2 con superresolución y modelos de IA para generar productos LULC de Áreas Prioritarias de alta resolución. Este flujo de trabajo busca aprovechar la valiosa información previa del CLMS para alimentar los modelos, aplicando un filtrado exhaustivo basado en el comportamiento espectro-fenológico de cada clase en comparación con los predictores derivados de los datos de observación de la Tierra (EO). PA-2021 alcanza más del 90 % de precisión en la clasificación de Nivel 1 y captura subclases detalladas, como tipos de bosque y la distinción entre pastizales y cultivos. La metodología mejora la detección de elementos de pequeña escala y permite obtener salidas vectoriales listas para su uso, reduciendo significativamente el procesamiento manual. Su escalabilidad a regiones y periodos temporales más amplios favorece una mejor estratificación para campañas de muestreo in situ y contribuye a la futura cartografía de hábitats mediante su alineación con las clasificaciones EUNIS.

Palabras clave: *Copernicus; Natura 2000; uso/cobertura del suelo; Sentinel-2; Deep-Learning*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

CLMS Protected Areas: un enfoque semiautomático de uso del suelo y cobertura del suelo (LULC) basado en información de series temporales de alta resolución de Copernicus y su conexión con la cartografía de hábitats.

Becerra, Javier [1], Álvarez-Martínez, José Manuel [2], Jiménez-Alfaro, Borja [2], Hugé, Justine [3], Dewaissage, Carlos [3], Poray, Chris [4], Papadakis, Dimitri [4], Cost, Adrián [1], Sousa, Ana [5]

[1] COTESA, España.

0009-0004-5253-3746, javierbecerra@grupotecopy.es ; 0009-0002-5484-4869, adriancost@grupotecopy.es

[2] CSIC-IMIB, UNIVERSITY OF OVIEDO.

0000-0002-8150-0802, jm.alvarez@uniovi.es ; 0000-0001-6601-9597, jimenezalfaro@uniovi.es

[3] COLLECTE LOCALISATION SATELLITES, CLS.

jhuge@groupcls.com ; cdewasseige@groupcls.com.

[4] EVENFLOW

chris@evenflow.eu ; dimitri@evenflow.eu.

[5] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA).

ana.sousa@eea.europa.eu.

Resumen: El seguimiento del uso del suelo y la cobertura del suelo (LULC) es esencial para comprender la dinámica del paisaje y su interacción con las actividades humanas, especialmente en un contexto de cambios ambientales globales. El Servicio de Monitoreo de la Tierra de Copernicus (CLMS) ofrece una gama de productos LULC multi anuales, entre ellos el veterano CORINE Land Cover y las más recientes capas de Monitoreo de Áreas Prioritarias orientadas a zonas clave como áreas urbanas, ribereñas, costeras y espacios Natura 2000. Los productos previos del CLMS sobre LULC se han basado principalmente en la fotointerpretación manual, lo que ha supuesto limitaciones en la resolución espacial, la reproducibilidad y la eficiencia. PA-2021 presenta un flujo de trabajo novedoso y semiautomático que utiliza series temporales de Sentinel-2 con superresolución y modelos de IA para generar productos LULC de Áreas Prioritarias de alta resolución. Este flujo de trabajo busca aprovechar la valiosa información previa del CLMS para alimentar los modelos, aplicando un filtrado exhaustivo basado en el comportamiento espectro-fenológico de cada clase en comparación con los predictores derivados de los datos de observación de la Tierra (EO). PA-2021 alcanza más del 90 % de precisión en la clasificación de Nivel 1 y captura subclases detalladas, como tipos de bosque y la distinción entre pastizales y cultivos. La metodología mejora la detección de elementos de pequeña escala y permite obtener salidas vectoriales listas para su uso, reduciendo significativamente el procesamiento manual. Su escalabilidad a regiones y periodos temporales más amplios favorece una mejor estratificación para campañas de muestreo in situ y contribuye a la futura cartografía de hábitats mediante su alineación con las clasificaciones EUNIS.

Palabras clave: Copernicus; Natura 2000; uso/cobertura del suelo; Sentinel-2; Deep-Learning

CLMS Protected Areas: a Land Use-Land Cover semi-automatic approach based on high-resolution Copernicus time series information and its connection with habitat mapping

***Abstract**: Land Use and Land Cover (LULC) monitoring is essential for understanding landscape dynamics and their interaction with human activities, particularly amid global environmental changes. The Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) offers a range of multiannual LULC products, including the long-standing CORINE Land Cover and the more recent Priority Area Monitoring layers targeting key zones such as urban, riparian, coastal, and Natura2000 sites. Previous CLMS products on LULC have mainly relied on manual photointerpretation, facing limitations in spatial resolution, reproducibility, and efficiency. PA-2021 presents a novel, semi-*

automatic workflow using super-resolved Sentinel-2 time-series data and AI models to generate high-resolution PA LULC products. This workflow aims to use valuable previous CLMS information to feed models by applying a thorough filtering based on the spectro-phenological behavior of each class when compared to the EO data predictors. PA-2021 achieves over 90% accuracy at Level 1 classification and captures detailed sub-classes like forest types and grassland vs cropland distinctions. The methodology enhances detection of small-scale features and enables ready-to-use vector outputs, significantly reducing manual processing. Its scalability across larger regions and timeframes supports improved stratification for in-situ surveys and contributes to future habitat mapping through alignment with EUNIS classifications.

***Keywords**: Copernicus; Natura 2000; land cover/land use; Sentinel-2; deep learning*

1. INTRODUCCIÓN

CLMS Protected Areas (PA-2021) tiene como objetivo elaborar un mapa armonizado de coberturas y usos del suelo para todas las zonas protegidas terrestres de EU-27, Gran Bretaña y las zonas Emerald de Suiza. Se trata de un producto enmarcado en el **Programa Copernicus** (componente Tierra), donde la Agencia Europea de Medio Ambiente actúa como entidad responsable de la coordinación y provisión del servicio, asegurando la coherencia metodológica y la estandarización del producto. En este contexto, PA-2021 proporciona información temática de alta resolución y homogénea para apoyar el seguimiento y la evaluación de las áreas protegidas, facilitando su integración con el resto de los productos del Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) y su uso por gestores y usuarios finales en aplicaciones de conservación, planificación y análisis de presiones territoriales.

Como antecedente, CLMS Protected Areas adopta 2021 como año de referencia y da continuidad a la serie N2K (2006, 2012 y 2018). Se trata de la **primera cartografía homogénea del conjunto de emplazamientos Natura 2000 a escala europea**, con una cobertura aproximada de 820.000 km² y más de 25.000 sitios. Este producto se organiza en 59 clases alineadas con las capas CLMS del programa de Monitorización de Áreas Prioritarias (PAM por sus siglas en inglés) e incorpora un nivel 4 de detalle MAES/CORINE, permitiendo desagregaciones temáticas dentro de formaciones principales (por ejemplo, la diferenciación de bosque caducifolio dentro de la clase 3110). Frente a ediciones previas con un enfoque más manual, PA-2021 introduce un **flujo semiautomático y operacional basado en series temporales Sentinel-2**, superresolución y modelos avanzados de inteligencia artificial, complementado con procedimientos específicos de postprocesado y control de calidad para generar un producto vectorial listo para usar, conforme a los requisitos de escala y unidades mínimas del servicio.

Las **validaciones externas** realizadas por dos entidades independientes confirman el salto cualitativo del producto, con un acierto superior al 90% en clases de nivel 1 (por encima del objetivo global del 80%) y una mejora notable del detalle geométrico, manteniendo la coherencia con la serie temporal para maximizar la intercomparabilidad entre productos de la serie. En este contexto, el proyecto promueve una participación activa de los usuarios finales en la concepción y explotación del producto, con el objetivo de que pueda actuar como columna vertebral para el diseño de muestreos in situ de biodiversidad y la cartografía experta de hábitats en áreas protegidas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El flujo de producción de PA-2021 se plantea como una cadena de procesos tecnológicos de alto valor añadido orientada a maximizar la robustez, la objetividad y la operatividad del producto final. Con el fin de capturar la diversidad biogeográfica a escala europea, se contó con el apoyo de expertos botánicos de la Universidad de Oviedo, que definieron una regionalización del continente en **38 biorregiones**, utilizada como marco para la estratificación del muestreo y el ajuste de los modelos.

Durante el proyecto se integraron múltiples capas de distinta naturaleza, con especial énfasis en productos del CLMS, al constituir la base para la **generación automática de muestras de entrenamiento**. La estrategia consistió en extraer puntos de forma automática, adaptados a la disponibilidad y a la representación de las clases en cada biorregión. Se emplearon principalmente: (i) *N2K*, *Urban Atlas*, *Riparian Zones* y *Coastal Zones* siempre que existiera cobertura espacial; (ii) productos *High Resolution Layers* para 2021 (p. ej., *Cropland*, *Forest Type* y *Grasslands*) para apoyar especialmente las clases *2xxx*, *3xxx* y *4xxx*; y (iii) CLC+BB 2021 para reforzar clases arbustivas y discriminar fenologías relevantes en bosques caducifolios. Adicionalmente, EU-Hydro y Open Street Map resultaron clave para muestrear y caracterizar elementos lineales (cursos de agua, ríos, carreteras).

Para la **estratificación de puntos** se consideró la distribución de clases por área de estudio y biorregión a partir de CORINE Land Cover, sobre la cual se generó una malla sistemática de 500 × 500 m para todo el dominio de estudio. Se definió un número máximo de puntos por celda y se aplicaron restricciones geométricas (a modo de ejemplo, *buffer* interno en cpolígonos) para reducir efectos de borde. Asimismo, se implementó un **balanceo por clase** priorizando aquellas con menor representación espacial, con el objetivo de mejorar la capacidad discriminante del modelo en categorías minoritarias. Para depurar automáticamente las muestras y reducir la presencia de etiquetas erróneas, se aplicó un control de calidad basado en ***Self-***

***Organizing Maps* (SOM)**, orientado a *clusterizar* las clases según su comportamiento espectro-fenológico. Se utilizaron series temporales de NDVI de 2021 para cada biorregión y se descartaron aquellos puntos que se alejaban significativamente del comportamiento central del clúster asignado, mejorando así la consistencia interna del conjunto de entrenamiento antes de la fase de aprendizaje profundo.

Como predictores del modelo se generó un volumen superior a 70 TB de información satelital, organizado en cubos de datos. Se construyeron mosaicos mensuales de Sentinel-2 para 1053 teselas, mediante filtrado avanzado de píxeles no válidos y cálculo de la mediana usando una ventana temporal de 45 días centrada en cada mes. Se aplicó un control de calidad intensivo para descartar meses sin observaciones fiables en determinadas biorregiones; en particular, el invierno se excluyó en la mayoría de las regiones del norte de Europa debido al impacto de la baja elevación solar en la reflectividad y la calidad radiométrica. Sobre los mosaicos mensuales se aplicó IRIX4, un modelo pre-entrenado (propiedad de COTESA) basado en redes tipo GAN para superresolver las **bandas RGBN de Sentinel-2 desde 10 m hasta 2,5 m** (equivalente a 16 píxeles por píxel original). A partir de los mosaicos superresueltos se derivaron índices espectrales como NDVI y NDWI que, junto con las bandas RGBn, generan un conjunto potencial de hasta 72 bandas anuales que capturan la señal temporal necesaria para la discriminación de clases con fenologías contrastadas.

Dada la relevancia de la dimensión temporal en la separación de coberturas y usos del suelo vía comportamiento espectro-fenológico, se empleó un modelo de aprendizaje profundo (en el contexto temporal) 1D denominado **Temp-CNN**, que detecta patrones en series temporales a nivel píxel a través del entrenamiento con muestras puntuales de alta riqueza fenológica. Tras el entrenamiento inicial, se incorporaron estrategias de ***Active Learning*** para refinar el conjunto de entrenamiento, prestando atención a (i) puntos con baja probabilidad/alta incertidumbre y (ii) clases heterogéneas (por ejemplo, *urbano*) o de separación compleja (por ejemplo, *pastizales vs matorral*), así como confusiones habituales entre clases espectralmente próximas (p. ej., *cultivos* vs. pastizales manejados). El ciclo de entrenamiento-evaluación se ha repetido en numerosas ocasiones, apoyado por ejercicios intensivos de control de calidad, hasta alcanzar resultados estables.

Los mapas ráster resultantes se sometieron a un **postprocesado avanzado** orientado a generar un producto vectorial conforme a las especificaciones del servicio (unidad mínima de 0,5 hectáreas, ancho mínimo de 10 metros y escala 1-10.000): generalización de polígonos, correcciones topológicas, eliminación de *spikes* y tratamiento de pasillos menores de 10 m. Para ciertas familias temáticas se aplicaron reglas de etiquetado plausible apoyadas en pasarelas semánticas con datos auxiliares (p. ej., correspondencias entre atributos de OpenStreetMap y clases PA-2021 para 1xxx; y apoyo de capas de Riparian/Coastal para clases *7xxx–8xxx*), así como el uso de cartografías específicas (p. ej., European Wetland Map) para delimitar turberas y humedales en latitudes altas.

Finalmente, se generó un **mapa de calor de error potencial** (ver figura 1) agregando la probabilidad del modelo y una medida de heterogeneidad (vía un índice de Shannon adaptado) a una resolución de 10 × 10 m. Este producto resultó especialmente útil para el equipo de refinamiento manual al identificar patrones de "sal y pimienta" y áreas de confusión. En esta fase, el equipo experto, mediante el análisis visual de la cobertura VHR trianual de la ESA para el año 2021 en falso color, revisa etiquetas en los polígonos dudosos y fusiona en zonas de alta incertidumbre, preservando al máximo la objetividad del flujo semiautomático a la vez que mejora el producto.



Figura 1. Mapa de calor de posibles errores en el producto automático (campo de cultivos en Bélgica), utilizado como capa auxiliar por el equipo de refinamiento manual. Colores rojos muestran mayor incertidumbre.

3. RESULTADOS Y ESTADO ACTUAL

Los resultados obtenidos indican que el flujo semiautomático propuesto es capaz de generar una cartografía homogénea y operacional a escala europea (figuras 2 y 3), manteniendo la continuidad con la serie histórica y, a la vez, incrementando el nivel de detalle temático y geométrico. A la fecha de redacción de este trabajo, el producto está pendiente de ser publicado en fechas inminentes en el portal CLMS.



Figura 2. Segmentación automática PA-2021 en una zona protegida de Alemania; en rojo se muestran los bordes de los polígonos y las etiquetas de clase a nivel 4 (por ejemplo, arbustos como 5100).

Según el informe de validación intermedia del producto PA-2021, la evaluación temática se realizó sobre el 1,5% de la superficie total de zonas protegidas del contrato (aproximadamente 10.880 km² sobre 735.000 km²),

mediante un muestreo sistemático-estratificado basado en la malla LUCAS y una respuesta en dos etapas (fotointerpretación "ciega" seguida de un análisis de plausibilidad para los casos en desacuerdo). Con 600 unidades muestrales y reporte a nivel paneuropeo en nivel 1 (8 clases), los resultados de la plausibilidad alcanzan una **precisión global del 96,38%**, cumpliendo holgadamente el requisito de exactitud global (superior al 85%) y mostrando que, en general, las precisiones de productor y usuario superan el umbral del 80% (considerando IC95%). El informe identifica, no obstante, patrones de discrepancia para tener en cuenta en la lectura de los resultados; por ejemplo, la clase Agua, muestra una disparidad notable en la comparativa entre los resultados y el nivel mostrado en las imágenes VHR en aquellas zonas con una estación estival muy marcada (zonas mediterráneas como el interior de España), debido a que en este producto se tienen en cuenta las series temporales de Sentinel-2.



Figura 3. Producto PA-2021 en una zona protegida del interior de Croacia. En verde se muestran los bosques, en amarillo los cultivos, en rojo y morado oscuro las zonas urbanos, en morado claro las zonas húmedas y en azul el agua.

Por su parte, los informes realizados por la EEA denominados "*look and feel*" confirman un **rendimiento global elevado y relativamente estable del producto entre contextos biogeográficos**, a partir de una evaluación basada en 940 muestras distribuidas en cuatro biorregiones, donde la plausibilidad temática (a nivel de clase) alcanza un valor global de 86,9% y oscila aproximadamente entre 82,8% y 91,9% según la región, lo que sugiere una generalización robusta del enfoque pese a la heterogeneidad ambiental europea. Asimismo, se muestrean los bordes de los polígonos en rejillas de 250 x 250 metros con la intención de validar las geometrías automáticas extraídas del flujo automático. En diversas biorregiones se constata la validez de las mismas, mejorando incluso al anterior producto realizado manualmente a escala 1:10.000.

4. CONCLUSIONES

PA-2021 demuestra que la combinación de series temporales Sentinel-2 (con superresolución), aprendizaje profundo y curación automática de muestras a partir de productos CLMS permite escalar la cartografía de áreas protegidas con alta exactitud y trazabilidad, reduciendo la dependencia de la fotointerpretación exhaustiva. Asimismo, la estratificación por biorregiones ha sido clave para abordar la heterogeneidad europea. Este estudio pone de manifiesto las limitaciones de las capas de referencia en términos de disponibilidad y calidad. Por ello, resulta esencial analizarlas en detalle para definir reglas específicas y/o incorporar muestras adicionales en biorregiones complejas, especialmente en contextos con heterogeneidad *intra-sitio*.

El enfoque semiautomático adoptado en PA-2021 supone un **cambio de paradigma en la cartografía de coberturas y usos del suelo**: la combinación de series temporales satelitales y aprendizaje profundo permite producir mapas más reproducibles, escalables y trazables, con criterios consistentes en grandes dominios espaciales. Este giro no busca sustituir los enfoques manuales, sino complementarlos: el sistema genera una primera cartografía objetiva basada en evidencias espectro-fenológicas, y el equipo experto concentra su esfuerzo en tareas de alto valor (validación y revisión dirigida por incertidumbre), evitando la digitación extensiva y reduciendo la subjetividad. Así, se preserva la objetividad e intercomparabilidad temporal del producto a la vez que se mejora su detalle y eficiencia de producción. En conjunto, PA-2021 proporciona una base reproducible de cartografía LC/LU en áreas protegidas que puede actuar como columna vertebral para el seguimiento de presiones, el diseño de muestreos de biodiversidad y la cartografía experta de hábitats, manteniendo la trazabilidad y la comparabilidad temporal del producto.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolla en el marco del contrato EEA/DIS/R0/23/009 de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) para el Copernicus Land Monitoring Service (CLMS). Agradecemos la colaboración de los socios del consorcio en la preparación de la información VHR y validación (CLS), el apoyo de expertos botánicos en la definición de biorregiones, así como el refinamiento de muestras (Universidad de Oviedo – CSIC IMIB) y las tareas de difusión de los resultados (EVENFLOW).

6. REFERENCIAS

Ledig, C., Theis, L., Huszár, F., Caballero, J., Cunningham, A., Acosta, A., Aitken, A., Tejani, A., Totz, J., Wang, Z., & Shi, W. (2017). *Photo-Realistic Single Image Super-Resolution Using a Generative Adversarial Network*. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (pp. 4681–4690). https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.19

Pelletier, C., Webb, G. I., & Petitjean, F. (2019). Temporal Convolutional Neural Network for the Classification of Satellite Image Time Series. *Remote Sensing, 11*(5), 523. https://doi.org/10.3390/rs11050523

Rußwurm, M., & Körner, M. (2019). Self-attention for raw optical satellite time series classification. ISPRS *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 169*, 421–435.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.268

Uso de Modelos Digitales de Alturas para objetivar la cartografía de clasificación de cubiertas del suelo

Pons Fernández, Xavier [1] **Padial-Iglesias, Mario** [2] **González-Guerrero, Oscar** [3] **Ninyerola, Miquel** [4]

[1] Grumets Research Group, Departament de Geografia y CREAF, Universitat Autònoma de Barcelona

[2] Grumets Research Group, CREAF

[3] Grumets Research Group, Departament de Geografia, Universitat Autònoma de Barcelona

[4] Grumets Research Group, Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia, Universitat Autònoma de Barcelona

ORCID: Pons Fernández 0000-0002-6924-1641 Padial-Iglesias 0000-0002-8173-5353 González-Guerrero 0000-0001-8685-5971 Ninyerola 0000-0002-1101-0453

Correspondencia: xavier.pons@uab.cat m.padial@creaf.uab.cat Oscar.Gonzalez.Guerrero@uab.cat Miquel.Ninyerola@uab.cat

RESUMEN

La utilización de Modelos Digitales de Alturas derivados de datos lidar en los procesos de clasificación automática de imágenes de teledetección destinadas a la generación de cartografía de usos y cubiertas del suelo no es nueva, pero normalmente se ha incorporado como covariable en dichos procesos. Por otra parte, las leyendas en dichos mapas suelen incluir clases como “bosque” (o sus subtipos), “matorral”, y categorías similares. Sin embargo, la concreción exacta de lo que significan semánticamente estas categorías es un terreno que se suele dejar al resultado de la propia clasificación, con lo que se echa en falta la posibilidad de una aproximación más cuantitativa. Dicha aproximación es altamente deseable en un contexto en que cada vez es más valorado el control de la fiabilidad y coherencia durante el propio proceso de generación, más allá de los indicadores generales de calidad que resulten de la verificación de resultados en la última fase. Además, cuando el objetivo último es la obtención de mapas en series temporales que permitan el estudio de dinámicas de cubiertas y/o de sus funcionalidades, este rigor garantiza la eliminación de gran parte del ruido en las trayectorias de cambio consideradas. En este trabajo mostramos los criterios que se han seguido para la generación de los Mapas de Usos y Cubiertas quinquenales en el NE peninsular durante las últimas décadas a partir de datos Landsat y Sentinel-2, y se proporciona una primera cuantificación de los beneficios obtenidos.

Palabras clave: *MDA, lidar, mapas de usos y cubiertas del suelo, dinámica territorial*

Fecha de recepción: 19 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Uso de Modelos Digitales de Alturas para objetivar la cartografía de clasificación de cubiertas del suelo

Pons Fernández, Xavier [(1)], Padial-Iglesias, Mario [(2)], González-Guerrero, Oscar [(3)], Ninyerola, Miquel [(4)]

[(1)] Grumets Research Group, Departament de Geografia y CREAF, Universitat Autònoma de Barcelona.
0000-0002-6924-1641, xavier.pons@uab.cat

[(2)] Grumets Research Group, CREAF.
0000-0002-8173-5353, m.padial@creaf.uab.cat

[(3)] Grumets Research Group, Departament de Geografia, Universitat Autònoma de Barcelona.
0000-0001-8685-5971, Oscar.Gonzalez.Guerrero@uab.cat

[(4)] Grumets Research Group, Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia, Universitat Autònoma de Barcelona.
0000-0002-1101-0453, Miquel.Ninyerola@uab.cat

Resumen: La utilización de Modelos Digitales de Alturas derivados de datos lidar en los procesos de clasificación automática de imágenes de teledetección destinadas a la generación de cartografía de usos y cubiertas del suelo no es nueva, pero normalmente se ha incorporado como covariable en dichos procesos. Por otra parte, las leyendas en dichos mapas suelen incluir clases como "bosque" (o sus subtipos), "matorral", y categorías similares. Sin embargo, la concreción exacta de lo que significan semánticamente estas categorías es un terreno que se suele dejar al resultado de la propia clasificación, con lo que se echa en falta la posibilidad de una aproximación más cuantitativa. Dicha aproximación es altamente deseable en un contexto en que cada vez es más valorado el control de la fiabilidad y coherencia durante el propio proceso de generación, más allá de los indicadores generales de calidad que resulten de la verificación de resultados en la última fase. Además, cuando el objetivo último es la obtención de mapas en series temporales que permitan el estudio de dinámicas de cubiertas y/o de sus funcionalidades, este rigor garantiza la eliminación de gran parte del ruido en las trayectorias de cambio consideradas. En este trabajo mostramos los criterios que se han seguido para la generación de los Mapas de Usos y Cubiertas quinquenales en el NE peninsular durante las últimas décadas a partir de datos Landsat y Sentinel-2, y se proporciona una primera cuantificación de los beneficios obtenidos.

Palabras clave: MDA, lidar, mapas de usos y cubiertas del suelo, dinámica territorial.

English Title: Applying Digital Height Models to enhance the objectivity of land cover classification maps

***Abstract**: The use of Digital Height Models derived from lidar data in automatic remote sensing image classification processes aimed at producing land use and land cover maps is not new; however, such information has typically been incorporated merely as a covariate within these workflows. Moreover, the legends of these maps usually include classes such as "forest" (and its subtypes), "shrubland", and similar categories. Yet the precise semantic definition of these classes is often implicitly delegated to the outcome of the classification itself, thereby limiting the possibility of a more quantitative approach. Such an approach is highly desirable in a context where increasing value is placed on controlling reliability and internal consistency during the map production process, beyond the general quality indicators obtained from final validation. In addition, when the ultimate objective is to generate time series maps enabling the analysis of land cover dynamics and/or their functional attributes, such methodological rigor helps eliminate much of the noise in the resulting change trajectories. In this work, we present the criteria adopted for producing the quinquennial Land Use and Land Cover Maps from Landsat and Sentinel-2 data in the northeastern Iberian Peninsula over recent decades, and an initial quantification of the benefits gained through this approach is provided.*

***Keywords**: DHM, lidar, land use and land cover maps, land dynamics.*

1. INTRODUCCIÓN

La generalización del uso de datos lidar (acrónimo lexicalizado -como lo terminó siendo radar- de *laser detection and ranging*) ha permitido la generación no solamente de Modelos Digitales de Superficies, sino también de Modelos Digitales de Alturas (MDA en adelante). Los datos lidar se producen actualmente con teledetección espacial (como desde ICESat de NASA entre 2003 y 2010, o GEDI desde la Estación Espacial Internacional intermitentemente desde 2018) aunque es más frecuente desde drones y, sobre todo, desde aviones, por su mayor autonomía. En algunos casos las capturas de datos lidar se realizan en áreas relativamente pequeñas (Sibona *et al*., 2016, Alexander *et al*., 2018), típicamente a altas resoluciones (de más de 10 puntos/m²), pero en la última década se han realizado también campañas en áreas muy extensas (Kotivuori *et al*., 2016, en Finlandia, Nilsson *et al*., 2017, en Suecia, ambos en más de 100 000 km²) pero a resoluciones más modestas (de menos de 1 punto/m²). En este último caso resulta muy destacado el programa lidar del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) en España, ya en su cuarta campaña, y que empezó con una resolución nominal de 0.5 puntos/m² y actualmente se realiza a 5 puntos/m². La relevancia de este programa no solamente radica en su extensa cobertura, sino también en su continuidad como serie temporal, lo que permite incorporar la información derivada en estudios de dinámica territorial.

La disponibilidad de información derivada de datos lidar, y muy particularmente de los MDA en los procesos de clasificación automática de imágenes de teledetección destinadas a la generación de mapas de usos y cubiertas del suelo (MUCS en adelante) no es nueva, pero normalmente se ha incorporado como covariable en dichos procesos (González-Guerrero & Pons 2020). En las leyendas de los MUCS se suelen incluir clases como "bosque" (a veces diferenciando por especies principales, o por grupos de especies, como coníferas, o por su fisionomía, como las frondosas caducifolias, etc), "matorral" o "prados". Sin embargo, es prácticamente inexistente una concreción exacta de lo que significan semánticamente estas categorías, incluso cuando existe una ampliación descriptiva de la leyenda. En efecto, este es un terreno que se suele dejar al resultado de la propia clasificación, ni que en algunos casos se indique algún valor orientativo de datos de cobertura, etc. Sin embargo, estas explicaciones se basan prácticamente siempre en una aproximación en realidad cualitativa, que no se contrasta de forma cuantitativa en la fase de verificación de resultados (que suele conformarse con indicadores generales como la exactitud de la clasificación desde un punto de vista categórico).

A poco que se desee tener un control de la fiabilidad y coherencia de estos datos, resulta evidente que es necesario acudir a otras fuentes que permitan cuantificar de manera mejor "qué características tiene esta categoría" más allá de un breve texto descriptivo. En este contexto los MDA, convenientemente procesados, pueden proporcionar tal cuantificación, a la vez que abren la puerta a estudios aún más completos, que incluyan aspectos de estructura vertical de la vegetación (altura, densidad de pies de árboles, estructura interna, etc).

El hecho, ya comentado, que en algunos países los MDA puedan ser multitemporales los convierte de inmediato en un recurso valiosísimo para la objetivación cuantitativa de los MUCS multitemporales. Con ello se puede conseguir, como objetivo último, la obtención de mapas en series temporales que permitan el estudio de dinámicas de cubiertas y/o de sus funcionalidades, habiendo eliminado gran parte del ruido en las trayectorias de cambio consideradas.

En este trabajo mostramos los criterios que se han seguido para la generación de los MUCS quinquenales en el NE peninsular durante las últimas décadas a partir de datos Landsat y Sentinel-2, y se proporciona una primera cuantificación de los beneficios obtenidos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Obtención del MDA multitemporal y de sus metadatos espacializados

La obtención del MDA multitemporal se describe con todo detalle en Pons *et al*., (2025). En esencia se parte de los datos lidar PNOA (lidarCat en Cataluña) que, combinados con otros datos procedentes de teledetección (mapas de pendientes, de cubiertas, ortofotografías infrarrojo color, etc) permiten obtener la altura sobre el terreno en todo el territorio cada 2x2 m². Como información complementaria de gran interés, el MDA se proporciona, a la misma resolución espacial, acompañado de la información del origen (10 clases) y la fiabilidad estimada de cada dato de altura. Además, para cada celda se proporciona el día, mes y año del punto lidar que ha sido utilizado en ella. Gracias a esta información tan detallada espacialmente es posible relacionar de forma muy precisa las alturas del MDA y los resultados de la clasificación, evitando que, por ejemplo, un incendio o una tala posteriores a las imágenes de teledetección, pero anteriores al vuelo lidar pudieran llevar a una interpretación errónea del cruce de datos. Dichos MDA se encuentran disponibles para su exploración y descarga gratuita en https://lidarteam.grumets.cat/.

2.2. Obtención de los MUCS

La obtención de los MUCS se describe con todo detalle en los trabajos de González-Guerrero Pons *et al*., (2020), Padial-Iglesias *et al*. (2021, 2022). En esencia se parte de imágenes Landsat o Sentinel-2, según el quinquenio de la serie multitemporal a obtener, y junto con información auxiliar de orografía, alturas, etc, se aplica una clasificación k-NN en la implementación del *software* gratuito MiraMon (Pons, 2026), que además de paralelización permite diversas sofisticaciones para un control óptimo de los resultados. Dichos mapas, de 24 categorías y 30 m de resolución cuando se obtienen de imágenes Landsat, y de 25 categorías y de 10 m y 30 m de resolución cuando se obtienen de imágenes

Sentinel-2, se encuentran disponibles para su exploración y descarga gratuita en https://agricultura.gencat.cat/ca/serveis/cartografia-sig/bases-cartografiques/usos-sol-subsol/usos-sol/index.html

2.3. Combinación de los MDA con los MUCS

La utilización de la información de los MDA para dar consistencia cuantitativa a las categorías puede realizarse de diversas maneras. En la presente comunicación nos ceñiremos a cubiertas naturales resumidas en 3 categorías: bosques, matorrales y prados (que resultan de la reclasificación de 3 categorías de la leyenda original en el primer caso, y de otras 3 categorías en el último caso). Los filtros proporcionados por los datos MDA han consistido en los siguientes procesos:

2.3.1. Tratamiento de la categoría prados:

Mediante la aplicación CanviRes de MiraMon se procedió al cambio de resolución del MDA siguiendo un criterio de mediana. La resolución de salida (10 m o 30 m) así como el MDA utilizado dependen de la fecha del MUCS analizado.

A continuación, cualquier celda clasificada como bosque, matorral o prado en el MUCS con una altura mediana inferior o igual a 60 cm se reclasificó como prado. El valor de 60 cm se escogió porque los histogramas de valores de las celdas clasificadas como prados originalmente mostraban como verosímil este valor con la idea fisionómica de altura máxima de un prado.

2.3.2. Tratamiento de bosques y matorrales:

a) Cálculo de la densidad de árboles:

A partir del estudio de los histogramas de las alturas de las celdas clasificadas como bosque en los distintos MUCS se establece como razonable la altura de 2 m para considerar que un elemento es un árbol. De la misma manera, se considera bosque una celda del MUCS siempre que tenga una densidad mínima de árboles del 50 %. Esta densidad se calcula según el siguiente procedimiento:

En primer lugar, teniendo en cuenta que cada celda del MDA (de 2x2 m²) contiene el valor de Z máxima de los puntos lidar en ella, se consideran pies todas las celdas del MDA con altura superior o igual a 2 m. Así pues, mediante la herramienta IMGPNT, la cual permite exportar a puntos sólo aquellas que cumplan una cierta condición, se convirtieron a puntos todas aquellas celdas de 2 m de lado del MDA con altura superior o igual a 2 m.

A continuación, se procedió al cálculo de la densidad utilizando la opción de estadísticas de vecindad de la herramienta InterPNT indicando que se deseaba contar el número de puntos en el interior de las celdas del tamaño de los MUCS a analizar (30 y 10 m). De esta forma se obtuvo un ráster en que, para cada celda, se conoce “cuántos árboles hay”.

b) Reasignación de las categorías bosque y matorral:

El uso de estadísticos de centralidad de todas las alturas, e incluso de dispersión intracelda no permiten una aproximación conveniente al concepto cultural y fisionómico de bosque ya que, por ejemplo, un solo árbol muy alto no debería convertir una celda en bosque. Lo que define, pues, un bosque queda estipulado por la densidad de elementos altos, dato que no resulta desvirtuado si los árboles tienen mayor o menor altura (siempre que superen los 2 m);

En este estudio, una densidad de más de la mitad de los árboles en una celda se ha establecido como adecuada para considerar que se trata de un bosque en el MUCS. En otros términos, un 50 % de árboles por celda representan un mínimo de 112 árboles en las celdas de 30 m y más de 12 en las celdas de 10 m.

Así pues, todas aquellas celdas clasificadas en el MUCS como prados bosque o matorral que se correspondían con celdas con una densidad de árboles calculada a partir del MDA más cercano temporalmente superior o igual al 50 % fueron reasignadas automáticamente a bosque.

Finalmente, para la categoría de matorrales se utilizó la misma información para garantizar que las celdas clasificadas como matorral no presentaban más del 50 % de árboles y, por tanto, son asimilables a formaciones claramente abiertas como bosques claros y/o matorrales. Como el resultado de las clasificaciones ya era satisfactorio para esta clase, no se evitó “limitar” los matorrales por su altura mínima puesto que en las formaciones de matorrales bajos mediterráneos es controvertido definir dicho umbral.

3. RESULTADOS

La aplicación de los métodos descritos ha permitido generar máscaras de corrección a las categorías indicadas en este trabajo. La superficie corregida ha sido mayor en los mapas obtenidos con datos Landsat que, por su menor resolución espacial y radiométrica, contenían un mayor número de confusiones (5.31 %, promedio de los quinquenios 2007 y 2012) que los mapas obtenidos con Sentinel-2 (2.91 %, promedio de los quinquenios 2017 y 2022).

En el panel superior de la Figura 1 se puede apreciar, en color azul, un ejemplo de una zona erróneamente clasificada como matorral en el MUCS de 2012, mostrada sobre la ortofoto IRC del mismo año. En el panel inferior, donde no se muestra la máscara azul, se ve claramente que son zonas de bosque donde los datos lidar nos aseguran que en cada celda más del 50 % de la superficie presenta árboles con altura >= 2 m.

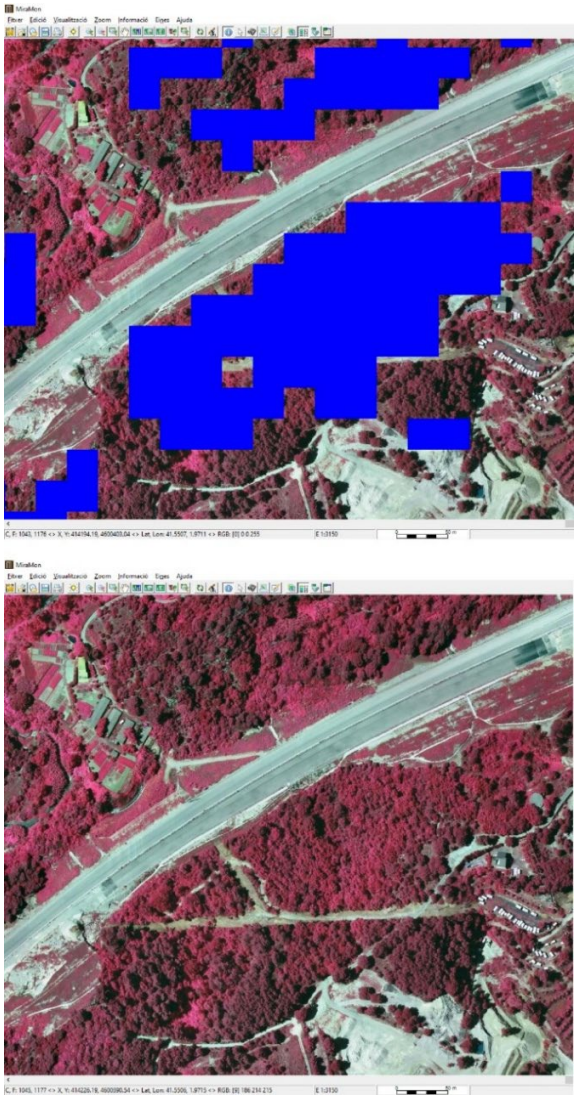


Figura 1. Zona de matorral a corregir (en azul, panel superior) a bosque (panel inferior) en el MUCS de 2012 gracias a la información del MDA. Ortofotografía IRC distribuida por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

4. CONCLUSIONES

La combinación de MDA con MUCS permite detectar problemas de frontera entre clases como prado, matorral y bosque con un criterio objetivo que da un valor cuantitativo sin precedentes a la definición de estas clases en cartografía de usos y cubiertas del suelo. Este grado superior de certidumbre permitirá una muy superior robustez en el análisis de las dinámicas de los usos y cubiertas del suelo, al tiempo que permitirá estudios más detallados de cambios de funcionalidad real en los ecosistemas terrestres.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a las subvenciones del SGR (Grupos de Investigación Consolidados y de Calidad de la Generalitat de Catalunya, SGR-2021-00554), del proyecto DynaFun (PID2023-152719OB-C21-MCIU/AEI/ERDF,EU) y de la Secretaria de Transició Ecològica de la Generalitat de Catalunya. También deseamos destacar la política de datos abiertos tanto del Instituto Geográfico Nacional (IGN) como del Institut Cartogràfic i Geogràfic de Catalunya (ICGC). Xavier Pons es beneficiario de una ayuda ICREA-Academia a la Excelencia en Investigación (2023-2027).

6. REFERENCIAS

Alexander, C., Korstjens, A.H., & Hill, R.A. (2018) Influence of Micro-Topography and Crown Characteristics on Tree Height Estimations in Tropical Forests Based on LiDAR Canopy Height Models. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 65*: 105-113. https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.10.009

González-Guerrero, O., & Pons, X. (2020). The 2017 Land Use/Land Cover Map of Catalonia based on Sentinel-2 images and auxiliary data. *Revista de Teledetección, 55*: 81-92. https://doi.org/10.4995/raet.2020.13112

Kotivuori, E., Korhonen, L., & Packalen, P. (2016) Nationwide Airborne Laser Scanning Based Models for Volume, Biomass and Dominant Height in Finland. Silva Fennica, 50: 1567. https://doi.org/10.14214/sf.1567

Nilsson, M., Nordkvist, K., Jonzén, J., Lindgren, N., Axensten, P., Wallerman, J., Egberth, M., Larsson, S., Nilsson, L., Eriksson, J., & Olson, H. (2017) A Nationwide Forest Attribute Map of Sweden Predicted Using Airborne Laser Scanning Data and Field Data from the National Forest Inventory. *Remote Sens. Environ. 194*: 447–454. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.022

Padial-Iglesias, M., Serra, P., Ninyerola, M., & Pons, X. (2021) A Framework of Filtering Rules over Ground Truth Samples to Achieve Higher Accuracy in Land Cover Maps. *Remote Sensing 13* (14): 2662. https://doi.org/10.3390/rs13142662

Padial-Iglesias, M., Ninyerola, M., Serra, P., González-Guerrero, O., Espelta, J.M., Pino, J., & Pons, X. (2022) Driving Forces of Forest Expansion Dynamics across the Iberian Peninsula (1987–2017): A Spatio-Temporal Transect. *Forests 13* (3): 475. https://doi.org/10.3390/f13030475

Pons, X., González-Guerrero, O., Masó, J., Zabala, A., Serral, I., & Ninyerola, M. (2025). LidarTeam: a remote sensing driven method for massive lidar data to regional DHM refined through user feedback. *International Journal of Digital Earth, 18*(2): 2562051. https://doi.org/10.1080/17538947.2025.2562051

Pons, X. (2026) MiraMon. Geographic Information System and Remote Sensing Software. Bellaterra: CREAF. https://www.miramon.cat/Index_spa.htm

Sibona, E., Vitali, A., Meloni, F., Caffo, L., Dotta, A., Lingua, E., Motta, R., & Garbarino, M. (2017) Direct Measurement of Tree Height Provides Different Results on the Assessment of LiDAR Accuracy. *Forests 8*: 7. https://doi.org/10.3390/f8010007

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.279

Does GEOBIA enhance vegetation classification performance in heterogeneous and dynamic landscapes?

Pfitzer-López, Daniel [1] **Roces-Díaz, José V.** [1] **Fernández-Guisuraga, José M.** [2] **García-Candanedo, Lucía** [1] **Suárez-Seoane, Susana** [1]

[1] Instituto Mixto de Investigación en Biodiversidad (IMIB)

[2] Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental, Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León, León, España.

ORCID: Pfitzer-López 0009-0009-4167-4398 Roces-Díaz 0000-0003-2569-8049 Fernández-Guisuraga 0000-0002-6065-3981 García-Candanedo 0009-0005-5272-9033 Suárez-Seoane 0000-0001-7656-4214

Correspondencia: pfitzerdaniel@uniovi.es rocesjose@uniovi.es jofeg@unileon.es garciacanlucia@uniovi.es s.seoane@uniovi.es

ABSTRACT

Mapping vegetation types in heterogeneous and dynamic landscapes using long satellite image time series remains challenging due to uncertainties associated with spectral similarity among classes, phenological variability, and sensor differences. This study evaluates different classification approaches using Landsat imagery (1984-2024) processed in Google Earth Engine to map landscape dynamics in Asturias (NW Spain), a region characterized by steep terrain and high environmental heterogeneity. Image preprocessing included cloud masking, topographic correction, and bi-seasonal compositing to capture phenological differences. Four analysis years were selected (1984, 1998, 2008, and 2023), and 21 predictor variables were compiled, including 12 spectral bands, six texture metrics, and three biophysical traits. To perform the classifications, temporally invariant training polygons were defined using a change detection algorithm, allowing their reuse across all analysis years. Two Random Forest modelling approaches were implemented, pixel-based and object-based, exploring the performance of the three predictor groups both independently and additively. Objects were defined using object-based image analysis techniques (GEOBIA), grouping spectrally and spatially homogeneous pixels. Pixel-based models using spectral bands showed the highest performance (OA ≈ 0.88) and low interannual variability, indicating that invariant polygons enable the use of a single training dataset without loss of performance and with reduced data preparation effort. Although GEOBIA did not improve overall accuracy, it did enhance the classification of fast-growing forest plantations (FSCORE +0.13), likely due to their monospecific composition and well-defined spatial boundaries. We conclude that GEOBIA approaches may be more suitable for clearly delineated vegetation types, whereas pixel-based classifications may be more appropriate for monitoring heterogeneous landscapes.

Keywords: *Landsat, Continuous Change Detection, Superpixels Segmentation*

Fecha de recepción: 21 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 21 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Does GEOBIA enhance vegetation classification performance in heterogeneous and dynamic landscapes?

Pfitzer-López, Daniel [(1)], Roces-Díaz, José V. [(1)], Fernández-Guisuraga, José M. [(2)], García-Candanedo, Lucía [(1)], Suárez-Seoane, Susana [(1)]

[(1)] Instituto Mixto de Investigación en Biodiversidad (IMIB, Universidad de Oviedo – CSIC – Principado de Asturias) y Departamento de Biología de Organismos y Sistemas (Universidad de Oviedo), Oviedo España.
0009-0009-4167-4398, pfitzerdaniel@uniovi.es ; 0000-0003-2569-8049, rocesjose@uniovi.es
0009-0005-5272-9033, garciacanlucia@uniovi.es ; 0000-0001-7656-4214, s.seoane@uniovi.es

[(3)] Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental, Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León, España.
0000-0002-6065-3981, jofeg@unileon.es.

Abstract: Mapping vegetation types in heterogeneous and dynamic landscapes using long satellite image time series remains challenging due to uncertainties associated with spectral similarity among classes, phenological variability, and sensor differences. This study evaluates different classification approaches using Landsat imagery (1984-2024) processed in Google Earth Engine to map landscape dynamics in Asturias (NW Spain), a region characterized by steep terrain and high environmental heterogeneity. Image preprocessing included cloud masking, topographic correction, and bi-seasonal compositing to capture phenological differences. Four analysis years were selected (1984, 1998, 2008, and 2023), and 21 predictor variables were compiled, including 12 spectral bands, six texture metrics, and three biophysical traits. To perform the classifications, temporally invariant training polygons were defined using a change detection algorithm, allowing their reuse across all analysis years. Two Random Forest modelling approaches were implemented, pixel-based and object-based, exploring the performance of the three predictor groups both independently and additively. Objects were defined using object-based image analysis techniques (GEOBIA), grouping spectrally and spatially homogeneous pixels. Pixel-based models using spectral bands showed the highest performance (OA ≈ 0.88) and low interannual variability, indicating that invariant polygons enable the use of a single training dataset without loss of performance and with reduced data preparation effort. Although GEOBIA did not improve overall accuracy, it did enhance the classification of fast-growing forest plantations (FSCORE +0.13), likely due to their monospecific composition and well-defined spatial boundaries. We conclude that GEOBIA approaches may be more suitable for clearly delineated vegetation types, whereas pixel-based classifications may be more appropriate for monitoring heterogeneous landscapes.

Keywords: Landsat, Continuous Change Detection, Superpixels Segmentation

¿Mejora el enfoque GEOBIA el rendimiento de la clasificación de la vegetación en paisajes heterogéneos y dinámicos?

Resumen: *El seguimiento de los tipos de vegetación en paisajes heterogéneos y dinámicos mediante series temporales largas de imágenes de satélite constituye un reto debido a la incertidumbre asociada a la similitud espectral entre clases, los cambios fenológicos o las diferencias entre sensores. En este estudio se evalúan distintos enfoques de clasificación utilizando imágenes Landsat (1984-2024) procesadas en Google Earth Engine para cartografiar la dinámica del paisaje en Asturias, una región abrupta con elevada heterogeneidad ambiental. El preprocesamiento incluyó máscaras de nubes, corrección topográfica y composiciones biestacionales para capturar diferencias fenológicas. Se seleccionaron cuatro años de análisis (1984, 1998, 2008 y 2023) y 21 variables predictoras: 12 bandas espectrales, seis métricas texturales y tres rasgos biofísicos. Para llevar a cabo las clasificaciones, se definieron, mediante un algoritmo de detección de cambio, polígonos de entrenamiento temporalmente invariantes y, por tanto, reutilizables para todos los años de análisis. Se establecieron dos aproximaciones de modelado basadas en Random Forest: píxel vs. objetos, explorando el rendimiento de los tres grupos de predictores de manera independiente y aditiva. Los objetos se definieron mediante*

técnicas de segmentación basadas en objetos (GEOBIA) que agruparon píxeles espectral y espacialmente homogéneos. Los modelos a nivel píxel basados en bandas espectrales mostraron un mayor rendimiento (OA ≈ 0.88) y una baja variabilidad interanual, indicando que los polígonos invariantes permiten aplicar un único conjunto de entrenamiento sin pérdida de rendimiento y con menor esfuerzo en la preparación de datos. Aunque GEOBIA no mejoró la precisión global, sí mejoró la clasificación de plantaciones forestales de crecimiento rápido (FSCORE +0.13), probablemente por su composición monoespecífica y límites espaciales bien definidos. Se concluye que los enfoques basados en objetos podrían ser más adecuados para clasificar tipos de vegetación claramente delimitados, mientras que las clasificaciones a nivel de píxel podrían resultar más pertinentes en contextos heterogéneos.

Palabras clave: *Landsat, Detección continua de cambios, Segmentación Superpixel*

1. INTRODUCTION

Mapping broad vegetation types over long time periods through satellite remote sensing remains challenging, particularly in heterogeneous and changing landscapes, where spectral overlaps among vegetation types and phenological variability introduces classification uncertainty. Pixel-based classifications that rely mainly on spectral information often exhibit limited temporal transferability (Verhulst *et al*., 2024), whereas Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA) approaches explicitly incorporate spatial context and may improve classification consistency. Accordingly, this study aims to develop a standardized framework for long-term landscape monitoring and to systematically compare the performance of pixel-based vs. GEOBIA classifications across four decades of Landsat observations.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study area

The Principality of Asturias is located in northwestern Spain and covers 10,604 km². This region is characterized by a humid oceanic climate, with mean annual precipitation exceeding 1,000 mm and mean annual temperatures ranging from 12 to 14 °C. Its rugged topography (ranging from sea level to ~2,650 m.a.s.l.) supports heterogeneous landscapes composed of fine-grained mosaics of settlements, agricultural lands, tree plantations mainly concentrated in coastal lowlands and semi-natural woody vegetation shifted to inland areas. The latter is dominated by temperate broad-leaved forests and heathlands. Ongoing rural depopulation has driven contrasting land-use trajectories, including agricultural intensification and eucalyptus plantation expansion, alongside passive rewilding (Pfitzer-López *et al*., 2026), reshaping the landscape over recent decades.

2.2. Landsat data preprocessing

Landsat Collection 2 Tier 1 Surface Reflectance products (Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI) were retrieved from Google Earth Engine (GEE). Images with cloud cover below 25% were selected, and clouds and shadows were masked using the Landsat pixel quality assessment band. Topographic illumination effects were corrected using the Sun-Canopy-Sensor C algorithm. Median composites were generated using a three-year temporal window centered on each target year (i.e.; 1984, 1998, 2008 and 2023) to ensure spatial completeness, with a bi-seasonal (summer-winter) design adopted to exploit vegetation spectro-phenological differences (López Trullén *et al*., 2022) and to improve discrimination between eucalyptus plantations and native broad-leaved forests (Martin-Gallego *et al*., 2024). The selected target years correspond to intermediate points within the study period and were chosen based on model performance, prioritizing classification accuracy according to validation metrics rather than enforcing strict temporal equidistance.

2.3. Predictors

A total of 21 predictor variables were derived for each analysis year, including the six Landsat surface reflectance bands (blue, green, red, NIR, SWIR1 and SWIR2) acquired for both summer and winter (12 spectral predictors), six texture metrics and three biophysical traits: fractional vegetation cover (FCOVER), leaf water content (Cw), and chlorophyll content (Cab).

Texture metrics were computed as the standard deviation within a 5 x 5 pixel moving window to capture spatial variability associated with landscape structure not fully represented by spectral information alone. The window size was selected after comparative testing, as it provided the greatest improvement in validation performance.

Biophysical traits were retrieved through radiative transfer model inversion using PROSAIL. Ranges input parameters were defined based on field knowledge, scientific literature on similar simulations in the region (e.g. Fernández-Guisuraga *et al*., 2024), and Landsat images metadata. These parameters were used to generate a synthetic dataset of spectral simulations, which were subsequently convolved with the spectral response functions of Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI. The resulting simulated database was then used to train Random Forest models (500 trees) to retrieve fractional FCOVER, Cw, and Cab.

2.4. GEOBIA segmentation

The full predictor set was used as input to the SNIC (Simple Non-Iterative Clustering) spatial segmentation algorithm (Achanta & Susstrunk, 2017), implemented in GEE. SNIC generates homogeneous superpixels objects by jointly considering spectral similarity and spatial proximity, which reduces within-object variability and pixel-level noise.

2.5. Unchanged training polygons

A single set of 697 training polygons was used across all analysis years to support consistent vegetation types classification over time. This strategy avoids the need to

delineate year-specific training data, improving operational efficiency. Unchanged vegetation types areas were first identified at the pixel level using the Continuous Change Detection (CCD) algorithm (Arévalo *et al*., 2020; Zhu & Woodcock, 2014) and subsequently validated through visual interpretation of historical PNOA orthophotographs (pnoa.ign.es). Training polygons were manually delineated in homogeneous core areas for five vegetation types classes: sparsely vegetated areas and pasturelands; herbaceous and woody agricultural lands; heathlands and shrublands; fast growing tree plantations (including conifers and eucalyptus); and native forests. Moreover, field surveys were conducted to validate a subset of polygons, and a fixed, temporally static mask was applied for water bodies and urban areas.

2.6. Classification and validation

Classification of vegetation types was conducted using Random Forest (500 trees) at both pixel and GEOBIA levels. Predictor contributions were assessed by comparing models built with individual predictor groups and under an additive framework. Temporally invariant training polygons were split into training (70%) and validation (30%) independent subsets using class-stratified sampling. Model performance was assessed using confusion matrices, from which Overall Accuracy (OA) and F-scores were derived for each analysis year. Additionally, SNIC parameters were iteratively tuned by testing multiple values until classification performance was maximized

3. RESULTS AND DISCUSSION

Pixel-level and GEOBIA classifications (Figure 1) showed very similar overall accuracy across all predictor groups for the analyzed years (1984, 1998, 2008, and 2024; Table 1) in both the individual predictor and the additive models, with pixel-based models performing slightly better. Within the pixel-level models, spectral reflectance alone provided the highest performance (0.88 ± 0.03), suggesting limited added value from non-spectral predictors. The inclusion of texture metrics resulted in only marginal improvements, with no additional gains observed after incorporating biophysical variables. The low standard deviation of overall accuracy across years indicates that using unchanged training polygons did not lead to performance degradation in earlier periods. This supports the feasibility of applying a single training dataset across multi-decadal satellite time series, reducing the need for year-specific training data and simplifying the modelling workflow.

Table 1. Overall accuracy of pixel-based and GEOBIA classifications across predictor groups (spectral, texture, biophysical) for individual predictor models and additive models.

Predictor group	Classification level	
	Pixel (average ± SD)	Geobia (average ± SD)
L8 SR Bands	0.88 ± 0.03	0.86 ± 0.05
Texture	0.63 ± 0.05	0.64 ± 0.02
Biophysical	0.73 ± 0.05	0.70 ± 0.06
L8 SR Bands + Texture	0.89 ± 0.03	0.87 ± 0.03
L8 SR Bands + Texture + Biophysical	0.88 ± 0.03	0.86 ± 0.04

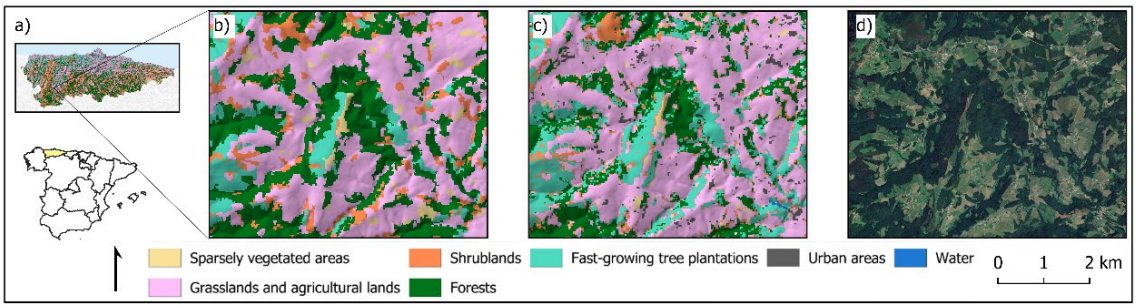


Figure 1. Land cover classification maps of the study area in 2023. (a) GEOBIA-based classification for the entire study area; (b) detailed view of the GEOBIA classification; (c) corresponding pixel-based classification detail; and (d) PNOA orthophoto from 2023

The GEOBIA approach increased the F-score for fast-growing tree plantations by 0.13 (Table 2). This improvement is likely related to the monospecific composition and well-defined boundaries of these stands, which are effectively captured by the SNIC algorithm through the grouping of contiguous pixels with similar spectral and spatial properties. The primary advantage of GEOBIA lies in its ability to mitigate the "salt-and-pepper" noise commonly observed in pixel-based methods, where high spectral variability within a class leads to fragmented and ecologically inconsistent maps (Yang *et al*., 2021). In this context, technical literature highlights that the seed spacing (size) parameter in the SNIC algorithm is critical for achieving optimal classification accuracy. Studies using comparable workflows show that classification accuracy is non-linear: it typically increases with object size until reaching an optimal peak and then declines rapidly due to under-segmentation, where multiple classes are merged into a single object (Yang *et al*., 2021). In the Asturian context, the high variability in the size and shape of natural vegetation patches makes universal parameterization difficult, explaining why the differences between pixel and GEOBIA methods are less pronounced for the other classes compared to plantations.

Table 2. Class-level F-scores comparing pixel and GEOBIA classifications for different predictor groups (Landsat surface reflectance, texture metrics, and biophysical traits) for the study period.

Predictor group	Pixel (avg ± SD)	Geobia (avg ± SD)
L8 SR Bands	0.83 ± 0.16	0.84 ± 0.11
Sparsely vegetated areas	0.92 ± 0.02	0.93 ± 0.03
Grasslands and agricultural lands	0.95 ± 0.01	0.92 ± 0.04
Shrubland	0.78 ± 0.06	0.73 ± 0.08
Forests	0.91 ± 0.04	0.89 ± 0.05
Fast-growing tree plantations	0.60 ± 0.20	0.73 ± 0.09
Textures	0.60 ± 0.21	0.61 ± 0.21
Sparsely vegetated areas	0.87 ± 0.02	0.83 ± 0.02
Grasslands and agricultural lands	0.72 0.04	0.74 ± 0.02
Shrubland	0.40 ± 0.09	0.42 ± 0.06
Forests	0.66 ± 0.08	0.68 ± 0.02
Fast-growing tree plantations	0.34 ± 0.06	0.33 ± 0.07
Biophysical traits	0.69 ± 0.15	0.67 ± 0.16
Sparsely vegetated areas	0.82 ± 0.05	0.80 ± 0.05
Grasslands and agricultural lands	0.80 ±0.08	0.78 ± 0.11
Shrubland	0.50 ± 0.08	0.46 ± 0.10
Forests	0.76 ± 0.02	0.77 ± 0.03
Fast-growing tree plantations	0.71 ± 0.20	0.56 ± 0.06

4. CONCLUSIONS

GEOBIA did not improve overall classification performance in the heterogeneous and dynamic landscape of Asturias, highlighting the sensitivity of this approach to landscape complexity and parameterization. However, it proved to be particularly useful for spatially well-defined, monospecific classes such as fast-growing tree plantations, which are important to monitor given their rapid expansion and landscape impacts in the area. The use of temporally invariant training polygons demonstrates the feasibility of long-term mapping with reduced manual effort. Overall, the limited gains from additional predictors suggest that Landsat spectral bands alone remain the primary driver of classification performance in heterogeneous landscapes, while GEOBIA adds value for structurally homogeneous vegetation types with clear boundaries. Evaluating performance along gradients of landscape heterogeneity would help disentangle the contexts in which object-based approaches yield tangible benefits.

5. ACKNOWLEDGMENTS AND FUNDING

This study was supported by the research projects LANDSUSFIRE (PID2022-139156OB-C22; Spanish Ministry of Science and Innovation, State Research Agency and FEDER); Severo Ochoa pre-doctoral contract from the Regional Government of Asturias (AYUD0029T01); research grant 'FIREPROs' (IDE/2024/000780) funded by the Principality of Asturias Government (Spain) and BIO10-PA (MRR-24-BIODIVERSIDAD-B10, Complementary Biodiversity Program (EU-funded Next Generation EU Recovery, Transformation and Resilience Plan). We also thank Paula Cembranos for proofreading and Miguel Menéndez for support with field surveys.

6. REFERENCES

Achanta, R., & Susstrunk, S. (2017). Superpixels and Polygons Using Simple Non-iterative Clustering. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 4895–4904. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.520

Arévalo, P., Bullock, E. L., Woodcock, C. E., & Olofsson, P. (2020). A Suite of Tools for Continuous Land Change Monitoring in Google Earth Engine. Frontiers in Climate, 2. https://doi.org/10.3389/fclim.2020.576740

Fernández-Guisuraga, J. M., González-Pérez, I., Reguero-Vaquero, A., & Marcos, E. (2024). Estimating Grassland Biophysical Parameters in the Cantabrian Mountains Using Radiative Transfer Models in Combination with Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis. *Remote Sensing, 16*(23), 4547. https://doi.org/10.3390/rs16234547

López Trullén, D., Álvarez-Martínez, J. M., Sánchez Labrador, J. D., Jiménez-Alfaro, B., Pérez-Silos, I., Hernández-Romero, G., & Barquín, J. (2022). Espectrofenología con datos Sentinel 2: definición de curvas de referencia para la caracterización de ecosistemas forestales. *Ecosistemas, 2411*. https://doi.org/10.7818/ECOS.2411

Martin-Gallego, P., Marston, C. G., Altamirano, A., Pauchard, A., & Aplin, P. (2024). Mapping alien and native forest dynamics in Chile using Earth observation time series analysis. *Forest Ecology and Management, 560*, 121847. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121847

Pfitzer-López, D., Ramírez-Rodríguez, R., Roces-Díaz, J. V., Álvarez-Martínez, J. M., Quevedo, M., García, D., Jiménez-Alfaro, B., & Suárez-Seoane, S. (2026). A new index for monitoring non-linear trends in passive forest recovery at regional scale. *Ecological Indicators, 182*, 114532. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114532

Verhulst, M., Heremans, S., Blaschko, M. B., & Somers, B. (2024). Temporal Transferability of Tree Species Classification in Temperate Forests with Sentinel-2 Time Series. *Remote Sensing, 16*(14), 2653. https://doi.org/10.3390/rs16142653

Yang, L., Wang, L., Abubakar, G. A., & Huang, J. (2021). High-Resolution Rice Mapping Based on SNIC Segmentation and Multi-Source Remote Sensing Images. *Remote Sensing, 13*(6), 1148. https://doi.org/10.3390/rs13061148

Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment, 144*, 152–171. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.285

Priorización espacial de turberas altoandinas mediante FAHP y teledetección en la cuenca del río Utcubamba (Perú)

Silva López, Jhonsy Omar [1,2] **Ruiz, Luis Á.** [3] **Ramos Fernández, Lia** [1] **Turpo, Efraín** [1] **Rojas-Briceño, Nilton B.** [4] **Gutiérrez, R. R** [5]

[1] Doctoral Programme in Environmental Engineering and Science, Universidad Nacional Agraria La Molina , Lima, Perú

[2] Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú

[3] Universitat Politècnica de València, España.

[4] Universidad Nacional de Moquegua, Pacocha, Perú

[5] Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), Lima, Perú.

ORCID: Silva López 0000-0002-2618-7526 Ruiz 0000-0003-0073-7259 Ramos Fernández 0000-0003-3946-7188 Turpo 0000-0002-6691-9867 Rojas-Briceño 0000-0002-5352-6140 Gutiérrez 0000-0003-0150-7439

Correspondencia: 20240314@lamolina.edu.pe laruiz@cgf.upv.es liarf@lamolina.edu.pe eturpo@lamolina.edu.pe nrojasb@unam.edu.pe rgutierrezl@utec.edu.pe

RESUMEN

Las turberas altoandinas son ecosistemas clave para la regulación hidrológica y el almacenamiento de carbono en regiones de montaña tropical; sin embargo, enfrentan procesos acelerados de degradación asociados al cambio de uso del suelo y la presión antrópica. En los Andes peruanos persisten vacíos metodológicos en la integración de teledetección multifuente y análisis multicriterio difuso para su priorización espacial. Este estudio desarrolló un modelo de idoneidad basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), el método Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) y la combinación lineal ponderada (WLC) para identificar áreas prioritarias de conservación en la cuenca alta del río Utcubamba (Amazonas, Perú). Se integraron variables biofísicas (ASTER DEM, NDVI de Sentinel-2, SWI de Copernicus, temperatura y proximidad hídrica) y antrópico-territoriales (uso del suelo, distancia a centros poblados y carreteras), reclasificadas en cuatro niveles de idoneidad (S0–S3). Los pesos se determinaron mediante FAHP a partir de 42 especialistas, de los cuales siete cumplieron el criterio de consistencia (CR < 0,1). El modelo identificó tres zonas prioritarias en cabeceras por encima de 3.500 m s.n.m., asociadas a alta integridad ecológica y baja presión antrópica. Las variables más influyentes fueron la distancia a centros poblados (39 %), la presencia de turberas (36 %) y el NDVI (11 %). La validación ROC-AUC (0,78) evidenció un desempeño predictivo aceptable. Este enfoque constituye una herramienta robusta para la planificación territorial y la conservación de turberas altoandinas.

Palabras clave: *Turberas altoandinas; FAHP; teledetección multifuente; análisis multicriterio; planificación territorial*

Fecha de recepción: 22 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 13 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Priorización espacial de turberas altoandinas mediante FAHP y teledetección en la cuenca del río Utcubamba (Perú)

Silva López, Jhonsy Omar [1,2], Ruiz, Luis Á. [3], Ramos Fernández, Lia [1], Turpo, Efraín [1], Rojas-Briceño, Nilton B. [4], Gutiérrez, R. R [5]

[1] Doctoral Programme in Environmental Engineering and Science, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.

0000-0003-3946-7188, liarf@lamolina.edu.pe ; 0000-0002-6691-9867, eturpo@lamolina.edu.pe

[2] Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú.

0000-0002-2618-7526, 20240314@lamolina.edu.pe

[3] Universitat Politècnica de València València, España.

0000-0003-0073-7259, laruiz@cgf.upv.es

[4] Universidad Nacional de Moquegua, Pacocha, Perú.

0000-0002-5352-6140, nrojasb@unam.edu.pe

[5] Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), Perú.

0000-0003-0150-7439, rgutierrezl@utec.edu.pe

Resumen: Las turberas altoandinas son ecosistemas clave para la regulación hidrológica y el almacenamiento de carbono en regiones de montaña tropical; sin embargo, enfrentan procesos acelerados de degradación asociados al cambio de uso del suelo y la presión antrópica. En los Andes peruanos persisten vacíos metodológicos en la integración de teledetección multifuente y análisis multicriterio difuso para su priorización espacial. Este estudio desarrolló un modelo de idoneidad basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), el método Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) y la combinación lineal ponderada (WLC) para identificar áreas prioritarias de conservación en la cuenca alta del río Utcubamba (Amazonas, Perú). Se integraron variables biofísicas (ASTER DEM, NDVI de Sentinel-2, SWI de Copernicus, temperatura y proximidad hídrica) y antrópico-territoriales (uso del suelo, distancia a centros poblados y carreteras), reclasificadas en cuatro niveles de idoneidad (S0–S3). Los pesos se determinaron mediante FAHP a partir de 42 especialistas, de los cuales siete cumplieron el criterio de consistencia (CR < 0,1). El modelo identificó tres zonas prioritarias en cabeceras por encima de 3.500 m s.n.m., asociadas a alta integridad ecológica y baja presión antrópica. Las variables más influyentes fueron la distancia a centros poblados (39 %), la presencia de turberas (36 %) y el NDVI (11 %). La validación ROC-AUC (0,78) evidenció un desempeño predictivo aceptable. Este enfoque constituye una herramienta robusta para la planificación territorial y la conservación de turberas altoandinas.

Palabras clave: *Turberas altoandinas; FAHP; teledetección multifuente; análisis multicriterio; planificación territorial*

Spatial prioritization of high Andean peatlands using FAHP and remote sensing in the Utcubamba River basin (Peru)

***Abstract**: High-Andean peatlands are key ecosystems for hydrological regulation and carbon storage in tropical mountain regions; however, they face accelerated degradation driven by land-use change and anthropogenic pressure. In the Peruvian Andes, methodological gaps persist in integrating multi-source remote sensing and fuzzy multi-criteria analysis for spatial prioritization. This study developed a suitability model based on Geographic Information Systems (GIS), the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), and weighted linear combination (WLC) to identify priority conservation areas in the upper Utcubamba River basin (Amazonas, Peru). Biophysical variables (ASTER DEM, Sentinel-2 NDVI, Copernicus SWI, temperature, and proximity to water sources) and anthropic-territorial variables (land use, distance to settlements, and roads) were integrated and reclassified into four suitability levels (S0–S3). Criteria weights were determined using FAHP based on evaluations from 42 experts, of whom seven met the consistency threshold (CR < 0.1).The model identified three priority zones located in headwaters above 3,500 m a.s.l., characterized by high ecological integrity and low anthropogenic pressure. The most influential*

variables were distance to settlements (39%), peatland presence (36%), and NDVI (11%). Model validation using ROC-AUC (0.78) indicated acceptable predictive performance. This approach provides a robust tool for territorial planning and the conservation of high-Andean peatlands.

***Keywords**: Mountain peatlands, wetlands; FAHP; conservation; GIS; Andes and remote sensing*

1. INTRODUCCIÓN

A nivel global, las turberas constituyen uno de los reservorios más importantes de carbono terrestre. Aunque ocupan aproximadamente el 3 % de la superficie del planeta, almacenan cerca del 30 % del carbono orgánico del suelo, superando incluso a muchos ecosistemas forestales en densidad de almacenamiento (Leifeld *et al*., 2025; IPCC, 2023). La alteración de estos ecosistemas puede generar emisiones significativas de gases de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático (Strack *et al*., 2022). En regiones altoandinas, las turberas de montaña conocidas (*bofedales)* desempeñan además un papel crucial en la regulación hidrológica, el mantenimiento de flujos base y la recarga de acuíferos en cabeceras de cuenca, sosteniendo sistemas socioecológicos altamente dependientes de su funcionalidad (Loisel *et al.*, 2022; Bonnesoeur *et al*., 2019).

En la cuenca alta del río Utcubamba (Amazonas, Perú), estos ecosistemas enfrentan presiones crecientes derivadas de la expansión agropecuaria, el sobrepastoreo y la fragmentación territorial. Se estima que aproximadamente el 12 % de las turberas han experimentado procesos de degradación en la última década (MINAM, 2021), mientras que menos del 20 % cuenta con algún nivel de protección efectiva en los Andes norte-peruanos (Bruijnzeel, 2004). Esta situación evidencia la necesidad de fortalecer herramientas de planificación territorial que permitan identificar áreas estratégicas para su conservación bajo criterios científicos y espaciales integrados.

La priorización espacial de ecosistemas complejos requiere enfoques que integren variables biofísicas, climáticas y antrópicas bajo marcos de decisión capaces de manejar incertidumbre. En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) combinados con métodos de análisis multicriterio, como el *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP), han demostrado eficacia para estructurar problemas jerárquicos y asignar ponderaciones robustas a múltiples criterios ambientales (Chen *et al*., 2022; Malczewski, 2019; Kahraman *et al*., 2016). No obstante, en los Andes persiste una limitada integración de teledetección multifuente y análisis multicriterio difuso para la priorización espacial de turberas en cabeceras.

En este marco, la presente investigación desarrolla un modelo espacial basado en SIG, FAHP y combinación lineal ponderada, integrando criterios biofísicos y antrópico-territoriales con el objetivo de identificar zonas estratégicas para la conservación de turberas altoandinas en la cuenca del río Utcubamba. El enfoque propuesto busca aportar una herramienta replicable para la planificación territorial climáticamente inteligente en ecosistemas de montaña vulnerables.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La cuenca del río Utcubamba (Amazonas, Perú – Figura 1) abarca aproximadamente 6.650 km^2 con altitudes entre 360 y 4.130 msnm, lo que genera una heterogeneidad climática marcada por gradientes térmicos y pluviométricos característicos de los Andes norte-peruanos (Curatola Fernández et al., 2023). En sus cabeceras predominan bosques montanos húmedos y zonas altoandinas donde se desarrollan turberas de montaña, ecosistemas con funciones clave en la regulación hídrica y el almacenamiento de carbono (Curatola Fernández *et al*., 2023)

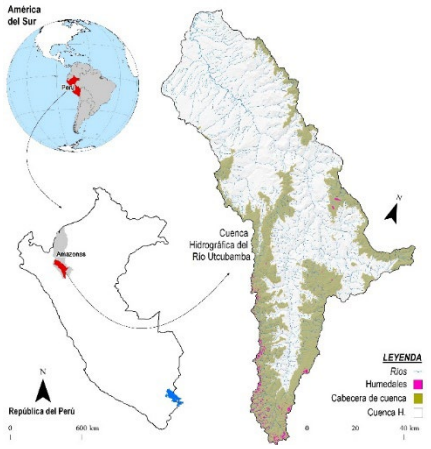


Figura 1. Ubicación de la Cuenca Hidrográfica del Río Utcubamba.

2.2. Metodología

La metodología (Figura 2) integra teledetección multifuente, SIG y el método FAHP para la priorización espacial de turberas. El proceso se desarrolló en tres etapas: (i) definición y estandarización de criterios, (ii) asignación de pesos mediante FAHP y (iii) modelamiento de idoneidad mediante combinación lineal ponderada (WLC).

2.2.1. Definición y reclasificación de criterios

Se seleccionaron criterios biofísicos y antrópico-territoriales (Tabla 1) en función de su relación con la funcionalidad ecológica de las turberas y su vulnerabilidad frente a presiones externas (Chen *et al*., 2023). Los criterios biofísicos incluyeron el modelo digital de elevación (ASTER DEM, 30 m), índice de vegetación (NDVI de Sentinel-2, 10 m), índice de humedad del suelo (SWI de Copernicus, resolución aproximada de 1 km), temperatura (WorldClim) y proximidad a fuentes de agua (ANA). Los criterios antrópicos incluyeron uso del suelo, distancia a centros poblados (INEI) y distancia a carreteras (MTC).

Cada variable fue reclasificada en cuatro niveles de idoneidad (S0–S3) utilizando umbrales definidos a partir

de la literatura científica. La reclasificación se realizó mediante herramientas SIG, asignando valores altos a condiciones favorables para la conservación (por ejemplo, NDVI > 0,5, pendiente < 15°, SWI > 0,2) y valores bajos a condiciones limitantes o con alta presión antrópica.

Tabla 1. Umbrales de idoneidad (S0–S3)

Sub-criterio	No Apto (S0)	Baja idoneidad (S1)	Idoneidad Media (S2)	Alta idoneidad (S3)	Referencia
Criterio Biofísico					
Presencia de turberas	Ausencia	< 1 km	< 500 m	Presencia directa	Leifeld & Menichetti (2018); Strack et al. (2022)
Humedad del suelo (SWI)	< 0,2	0,2 – 0,25	0,25 – 0,3	> 0,3	Zhang et al. (2019); Wang et al. (2021)
Altitud (msnm)	< 2.500	2500 – 2800	2.800 – 3.000	> 3.000	Furukawa et al. (2005); Chimner et al. (2010)
Pendiente (°)	> 30	20 – 30	15 – 20	< 15	López-Téllez et al. (2022); Peña et al. (2020)
Temperatura (°C)	> 18	14 – 18	10 – 14	8 – 10	Pärn et al. (2023); Günther et al. (2020)
Fuentes de agua (m)	> 1.500	1.000 – 1.500	500 – 1.000	< 500	Calabrese et al. (2021); Anderson et al. (2023)
NDVI	< 0,2	0,2 – 0,35	0,35 – 0,5	> 0,5	Chen et al. (2022); Campos et al. (2023)
Criterio Antrópico-territorial					
Uso del suelo (CUS)*	24; 25	9; 15; 21	3; 4; 12; 13; 29; 66; 68	11	Keddy et al. (2009); Epting et al. (2018)
Dist. a centros poblados (m)	< 500	500 – 1.000	1.000 – 2.000	> 2.000	Rodríguez-Galiano et al. (2012); Wilson et al. (2021)
Dist. a carreteras (m)**	< 300	300 – 800	800 – 1500	> 1.500	Li et al. (2024); Silva et al. (2023)

Map Biomas LULC 2024*Infraestructura urbana (24); Otra área sin vegetación (25) Plantación forestal (9); Pasto (15); Mosaico agropecuario (21) Bosque (3); Bosque seco (4); Pastizal/herbazal (12); Otra formación no boscosa (13); Afloramiento rocoso (29); Matorral (66); Otra área natural sin vegetación (68) Zona pantanosa o pastizal inundable (11)

Vías de acceso** Descargadfo del geoportal del MTC. https://portal.mtc.gob.pe/

2.2.2 Determinación de los pesos de los criterios mediante FAHP

Los pesos de los criterios y subcriterios se determinaron mediante el método FAHP, que permite incorporar la incertidumbre asociada a los juicios de expertos (Kahraman *et al*., 2016). Se consultó a 42 especialistas en teledetección, gestión de ecosistemas y conservación de turberas; sin embargo, solo siete cumplieron con el criterio de consistencia (CR < 0,1), por lo que sus evaluaciones fueron consideradas en el análisis final. Cada experto construyó matrices de comparación por pares utilizando una escala difusa de Saaty. Estas matrices fueron transformadas en números difusos triangulares y posteriormente agregadas mediante la media geométrica difusa (Buckley, 1985). Los pesos finales se obtuvieron mediante el método del centroide, garantizando su normalización. Los pesos fueron estructurados en dos niveles jerárquicos: (i) criterios principales (biofísico y antrópico-territorial) y (ii) subcriterios asociados, lo que permitió mejorar la coherencia del modelo y reducir la subjetividad en la toma de decisiones.

2.3. Modelamiento de idoneidad

Los criterios reclasificados se transformaron en capas raster y se estandarizaron a una resolución espacial de 30 m. Se generaron dos submodelos: uno biofísico y otro antrópico-territorial, los cuales fueron integrados mediante combinación lineal ponderada (WLC):

$$\mathbf{GRIDresult} = \mathbf{\Sigma}\ [(\mathbf{GRIDi})\ (\mathbf{WEIGHTi})]$$

donde $\boldsymbol{GRID_i}$es el valor reclasificado y $\boldsymbol{WEIGHT_i}$su peso relativo. Las áreas urbanas y cuerpos de agua mayores se clasificaron como S0 (No apto).

2.2.4 Validación del modelo

La validación del modelo se realizó mediante la curva ROC (Receiver Operating Characteristic) y el área bajo la curva (AUC), utilizando como referencia la distribución espacial de turberas previamente identificadas mediante trabajo de campo y cartografía existente. El valor obtenido (ROC-AUC = 0,78) indica un desempeño predictivo aceptable.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Pesos de importancia y jerarquización de criterios

Según la Tabla 2, el análisis FAHP evidenció que el componente biofísico (62 %) tiene mayor influencia que el antrópico-territorial (38 %), indicando que la integridad ecológica es el principal determinante en la priorización de turberas. A nivel de subcriterios, la presencia de turberas (44 %) fue el factor más relevante, seguida de la humedad del suelo (14 %) y el NDVI (10 %), lo que resalta la importancia de las condiciones hidrológicas y la cobertura vegetal en la funcionalidad de estos ecosistemas (Leifeld & Menichetti, 2018; Strack et al., 2022).

En el componente antrópico, la distancia a centros poblados (39 %) y a carreteras (35 %) fueron determinantes, confirmando que la presión humana condiciona la vulnerabilidad de las turberas (Rodríguez-Galiano *et al.*, 2012; Grantham *et al*., 2020). Estos resultados evidencian que la priorización responde a la interacción entre integridad ecológica y accesibilidad antrópica.

Tabla 2. Pesos finales (Wi) obtenidos mediante Fuzzy-AHP

Criterio	Wi (%)	Ranking	Subcriterio	Wi (%)	Ranking
Biofísico	62%	1	Presencia de turberas	44%	1
			Humedad del suelo (SWI)	14%	2
			Altitud (msnm)	11%	3
			Pendiente (°)	9%	4
			Temperatura (°C)	8%	5
			Fuentes de agua (m)	4%	6
			NDVI	10%	7
Antrópico -territorial	38%	2	Distancia a centros poblados	39%	1
			Distancia a carreteras	35%	2
			Uso del suelo (CUS)	26%	3

3.2. Modelo espacial de idoneidad y zonas prioritarias

Las áreas de alta idoneidad (S3) se concentran en cabeceras de cuenca por encima de los 3.500 m**snm**, donde se registran condiciones de alta cobertura vegetal, adecuada humedad y baja intervención antrópica. Este patrón coincide con estudios que destacan la dependencia de las turberas de condiciones hidrológicas estables (Loisel *et al*., 2022; Bonnesoeur *et al.*, 2019). El modelo alcanzó un ROC-AUC de 0,78, indicando un desempeño predictivo aceptable. En contraste, las zonas de baja idoneidad se asocian a áreas accesibles y con mayor presión antrópica.

Los resultados destacan la necesidad de priorizar cabeceras con baja intervención humana para la conservación de turberas. El enfoque FAHP–SIG demuestra ser una herramienta robusta y replicable para la planificación territorial en ecosistemas altoandinos vulnerables.

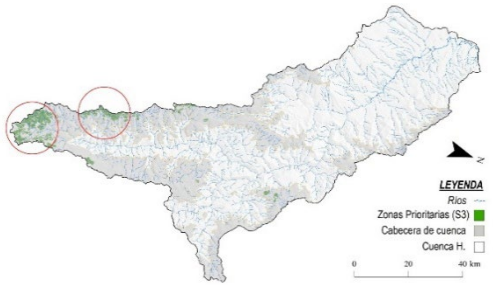


Figura 2. Zonas prioritarias para la conservación de turberas de montaña

4. CONCLUSIONES

El enfoque integrado FAHP–SIG permitió identificar de manera robusta áreas prioritarias para la conservación de turberas altoandinas en la cuenca del río Utcubamba, evidenciando que la presencia de turberas, la cobertura vegetal (NDVI) y la distancia a centros poblados son los principales determinantes espaciales. La consistencia de los juicios expertos (CR < 0,1) y el desempeño del modelo (ROC-AUC = 0,78) respaldan la validez metodológica del análisis. Los resultados destacan la necesidad de priorizar cabeceras de cuenca con alta integridad ecológica y baja presión antrópica, aportando una base técnica sólida para la planificación territorial y la conservación de ecosistemas altoandinos frente al cambio climático.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) y el Programa Nacional de Investigación Científica y de Estudios Avanzados (PROCIENCIA), en el marco de la convocatoria E033-2023-01-BM "Alianzas Interinstitucionales para Programas de Doctorado", número de subvención PE501089685-2024.

6. REFERENCIAS

Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M. R., & Ochoa-Tocachi, B. F. (2019). Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *Forest Ecology and Management, 433*, 569–584. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.033.

Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment, 104*(1), 185–228. https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015

Campos, J., et al. (2023). Spatial prioritization of Andean wetlands using GIS-based approaches. *Journal of Environmental Management, 345*, 118921.

Chen, Z., Zhu, R., Yin, Z., Feng, Q., Yang, L., Wang, L., Lu, R., & Fang, C. (2022). Hydrological response to future climate change in a mountainous watershed in the northeast of the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 44*, 101256. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101256

Curatola Fernández, G. F., Makowski Giannoni, S., Delgado Florián, E., Rengifo, P., Rascón, J., Chichipe Vela, E., Butrich, C., Salas López, R., Oliva-Cruz, M., & Scheske, C. (2023). Mapping high-altitude peatlands to inform a landscape conservation strategy in the Andes of northern Peru. *Environmental Conservation, 50*(4). https://doi.org/10.1017/S0376892923000267

Grantham, H. S., Shapiro, A., Bonfils, D., Gond, V., Goldman, E., Maisels, F., Plumptre, A., Rayden, T., Strassburg, B., & Watson, J. E. M. (2020). Anthropogenic modification of forests means only 40% of remaining forests have high ecosystem integrity. *Nature Communications, 11*, 5978. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19493-3

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate change 2023: Synthesis report. IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

Kahraman, C., Onar, S. C., & Oztaysi, B. (2016). Fuzzy multicriteria decision-making: A literature review. International *Journal of Computational Intelligence Systems, 9*(3), 367–392. https://doi.org/10.1080/18756891.2016.1180815.

Leifeld, J., & Menichetti, L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications, 9*, 1071. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6

Leifeld, J., Paul, S.M., Gross-Schmölders, M. et al. Crediting peatland rewetting for carbon farming: some considerations amidst optimism. Mitig Adapt *Strateg Glob Change 30*, 13 (2025). https://doi.org/10.1007/s11027-025-10203-2

Loisel, J., Gallego-Sala, A. Ecological resilience of restored peatlands to climate change. *Commun Earth Environ 3*, 208 (2022). https://doi.org/10.1038/s43247-022-00547-x

Malczewski, J. (2019). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey. International J*ournal of Geographical Information Science, 20*(7), 703–726. https://doi.org/10.1080/13658810600661508

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2021). Evaluación nacional de ecosistemas del Perú. Ministerio del Ambiente.

Rodríguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sánchez, J. P. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 67*, 93–104. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002

Strack, M., Davidson, S.J., Hirano, T. et al. The Potential of Peatlands as Nature-Based Climate Solutions. *Curr Clim Change Rep 8*, 71–82 (2022). https://doi.org/10.1007/s40641-022-00183-9

Tavana, M., Soltanifar, M. & Santos-Arteaga, F.J. Analytical hierarchy process: revolution and evolution. *Ann Oper Res 326*, 879–907 (2023). https://doi.org/10.1007/s10479-021-04432-2

Terzano, D., Trezza, F. R., Rezende, M., Malatesta, L., Yan, S. L. S., Parish, F., ... & Attorre, F. (2023). Prioritization of peatland restoration and conservation interventions in Sumatra, Kalimantan and Papua. *Journal for Nature Conservation, 73*, 126388. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2023.126388

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.286

Cartografía de la innivación: más allá del NDSI

Pons Fernández, Xavier [1] **Navarro, Martí** [1] **Pesquer, Lluís** [1] **Cea, Cristina** [1] **Gómez-Gener, Lluís** [2]

[1] Universitat Autònoma de Barcelona, España

[2] Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA-CSIC)

ORCID: Pons Fernández 0000-0002-6924-1641 Navarro 0009-0009-8174-0505 Pesquer 0000-0002-7396-2468 Cea 0000-0003-0776-6706 Gómez-Gener 0000-0003-3279-3589

Correspondencia: xavier.pons@uab.cat Marti.NavarroP@autonoma.cat l.pesquer@creaf.uab.cat Cristina.Cea@uab.cat lgghse@cid.csic.es

RESUMEN

La cartografía de la cubierta de nieve y su dinámica han constituido aplicaciones típicas de las imágenes de teledetección. La automatización de estas aplicaciones ha sido un objetivo importante por el evidente interés que tiene el conocimiento del manto nival para la hidrología, el funcionamiento de los ecosistemas y el balance energético terrestre. La disponibilidad de sensores espaciales capaces de captar radiación reflejada en el infrarrojo de onda corta a la vez que en el verde fue especialmente importante para definir índices como el de innivación de diferencia normalizada (Normalized Difference Snow Index, NDSI), de cálculo rápido, una característica especialmente importante cuando se propuso. La utilización de umbrales simples y universales para separar superficies cubiertas de nieve de las no nevadas hacían todavía más atractivas estas aproximaciones. Sin embargo, las diferencias entre imágenes, las confusiones con otras cubiertas, etc., han ido llevando, primero, al uso de umbrales distintos y, más tarde a cuestionar si hoy en día está justificada una solución tan simple cuando disponemos de mucha más información espectral y de mucha más capacidad de cálculo. A estos interrogantes se une el hecho de que algunos productos de innivación proporcionados por las grandes agencias espaciales presentan frecuentes errores de omisión y comisión. Este trabajo plantea abandonar la incertidumbre asociada al NDSI y, en su lugar, utilizar aproximaciones más robustas, como las basadas en aprendizaje automático (k-NN) fuertemente multivariante con datos MSI de Sentinel-2. A continuación se explora la obtención de la innivación en días concretos en que se simula no disponer de imágenes MSI pero se modeliza la innivación en base a productos MODIS entrenados con los resultados de MSI y variables geográficas. Los resultados, muy prometedores, nos permiten vislumbrar una vía no solamente para mejorar la cartografía en fechas concretas, sino para generar series temporales coherentes.

Palabras clave: *NDSI, mapas de cubiertas nivales, aprendizaje automático, k-NN, dinámica nival*

Fecha de recepción: 23 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 23 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Cartografía de la innivación: más allá del NDSI

Pons Fernández, Xavier [(1)], Navarro, Martí [(1)], Pesquer, Lluís [(1)], Cea, Cristina [(1)], Gómez-Gener, Lluís [(2)]

[(1)] Universitat Autònoma de Barcelona, España.

0000-0002-6924-1641, xavier.pons@uab.cat ; 0009-0009-8174-0505, Marti.NavarroP@autonoma.cat

0000-0002-7396-2468, l.pesquer@creaf.uab.cat ; 0000-0003-0776-6706, Cristina.Cea@uab.cat

[(2)] Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA-CSIC).

0000-0003-3279-3589, lgghse@cid.csic.es

Resumen: La cartografía de la cubierta de nieve y su dinámica han constituido aplicaciones típicas de las imágenes de teledetección. La automatización de estas aplicaciones ha sido un objetivo importante por el evidente interés que tiene el conocimiento del manto nival para la hidrología, el funcionamiento de los ecosistemas y el balance energético terrestre. La disponibilidad de sensores espaciales capaces de captar radiación reflejada en el infrarrojo de onda corta a la vez que en el verde fue especialmente importante para definir índices como el de innivación de diferencia normalizada (*Normalized Difference Snow Index*, NDSI), de cálculo rápido, una característica especialmente importante cuando se propuso. La utilización de umbrales simples y universales para separar superficies cubiertas de nieve de las no nevadas hacían todavía más atractivas estas aproximaciones. Sin embargo, las diferencias entre imágenes, las confusiones con otras cubiertas, etc., han ido llevando, primero, al uso de umbrales distintos y, más tarde a cuestionar si hoy en día está justificada una solución tan simple cuando disponemos de mucha más información espectral y de mucha más capacidad de cálculo. A estos interrogantes se une el hecho de que algunos productos de innivación proporcionados por las grandes agencias espaciales presentan frecuentes errores de omisión y comisión. Este trabajo plantea abandonar la incertidumbre asociada al NDSI y, en su lugar, utilizar aproximaciones más robustas, como las basadas en aprendizaje automático (k-NN) fuertemente multivariante con datos MSI de Sentinel-2. A continuación se explora la obtención de la innivación en días concretos en que se simula no disponer de imágenes MSI pero se modeliza la innivación en base a productos MODIS entrenados con los resultados de MSI y variables geográficas. Los resultados, muy prometedores, nos permiten vislumbrar una vía no solamente para mejorar la cartografía en fechas concretas, sino para generar series temporales coherentes.

Palabras clave: NDSI, mapas de cubiertas nivales, aprendizaje automático, k-NN, dinámica nival.

Snow Cover Mapping: Beyond the NDSI

***Abstract**: Snow cover mapping and the analysis of its dynamics have long been standard applications of remote sensing imagery. The automation of these applications has been a major objective due to the importance of snow cover information for hydrology, ecosystem functioning, and the Earth's energy balance. The availability of spaceborne sensors capable of acquiring reflected radiation in both the shortwave infrared and the green wavelengths was particularly relevant for defining indices such as the Normalized Difference Snow Index (NDSI), whose rapid calculation was a key advantage at the time it was proposed. The use of simple, universal thresholds to distinguish snow covered surfaces from snow free areas further increased the appeal of these approaches. However, differences among images, confusions with other land cover types, and additional sources of variability have progressively led first to the adoption of alternative thresholds and later to questioning whether such a simple solution remains justified today, given the much richer spectral information and far greater computational capacity now available. These concerns are compounded by the fact that several snow cover products distributed by major space agencies exhibit frequent omission and commission errors. This study proposes abandoning the uncertainty associated with the NDSI and, instead, adopting more robust approaches, such as strongly multivariate machine-learning methods (k-NN) using Sentinel-2 MSI data. The work then explores the retrieval of snow cover on specific days for which MSI imagery is assumed to be unavailable, modelling snow presence on the basis of MODIS products trained with MSI-derived results and geographic variables. The results, which are highly*

promising, point to a pathway not only for improving snow cover cartography on specific dates but also for generating coherent time series.

***Keywords**: NDSI, snow cover maps, machine learning, k-NN, snow dynamics.*

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del manto nival es fundamental para el estudio de la hidrología, el funcionamiento de los ecosistemas y el balance energético terrestre en zonas de alta montaña. Desde los inicios de la teledetección espacial se vieron las imágenes de satélite como prometedoras fuentes de datos para cartografiar la innivación así como para realizar un seguimiento de la misma. Con la llegada de sensores como el Thematic Mapper en el Landsat-4, capaces de captar la radiancia en la región espectral del infrarrojo de onda corta (IRoc, donde la nieve presenta una señal baja), además de en el verde (V, donde la nieve presenta una señal muy alta), se planteó la utilización de índices simples, como el de innivación de diferencia normalizada (*Normalized Difference Snow Index*), NDSI, formulado como se presenta en la Ecuación 1 (Cea *et al*., 2007; Dozier, 1989):

$$NDSI = \frac{\mathrm{V} - \mathrm{IRoc}}{\mathrm{V} + \mathrm{IRoc}} \qquad (1)$$

Como puede verse en la Ecuación 1, el cálculo del NDSI es rápido y, además, por su naturaleza de cociente, razonablemente tolerable sin correcciones radiométricas cuando los niveles digitales son proporcionales a radiancias y con factores de transformación parecidos. Si a estas características añadimos la utilización de umbrales simples y universales para discriminar las superficies nevadas de las no nevadas, es fácil entender el atractivo que supusieron dichas aproximaciones en tiempos con recursos de cálculo mucho más limitados que los actuales.

Sin embargo, a lo largo del tiempo ha ido haciéndose evidente que las diferentes características entre imágenes, las confusiones con otras cubiertas, etc. conllevaban problemas que se han intentado solucionar mediante el uso de umbrales cambiantes (Dozier, 1989, propuso un umbral 0.4, pero este criterio ha sido cuestionado por Härer *et al*., 2018, y pueden encontrarse en la literatura valores entre 0.18 y 0.70, o autores, como Painter *et al*., 2009, que proponen umbrales distintos según la cubierta existente bajo la zona nevada). La pérdida de generalización que implica esta "solución" plantea si hoy en día está justificado un procesado tan simple cuando disponemos de mucha más información espectral y de mucha más capacidad de cálculo. A estos interrogantes se une el hecho de que algunos productos de innivación proporcionados por las grandes agencias espaciales presentan frecuentes errores de omisión y comisión, y que con sensores con poca resolución radiométrica las zonas en sombra producen índices especialmente inestables.

Este trabajo plantea abandonar la incertidumbre asociada al NDSI que pretende discriminar la superficie innivada mediante un umbral simple y, en su lugar, explorar aproximaciones más robustas, como las basadas en aprendizaje automático (k-NN) fuertemente multivariante, o basadas en regresiones logísticas también multivariantes. El objetivo inmediato es conseguir resultados más robustos en la cartografía del manto nival en fechas concretas y, en un horizonte cercano, generar series temporales coherentes.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos utilizados y área de estudio.

Para este trabajo se han utilizado imágenes del sensor MSI de los satélites Sentinel-2. Para obtener resultados más generalizables se ha optado por un nivel de procesado 2A, aunque para futuros trabajos se contemplará la posibilidad de aplicación de métodos propios para la obtención de reflectancias terreno de mayor calidad. Las imágenes utilizadas corresponden a la tesela 31TCH, ubicada en la zona pirenaica NO de Cataluña, y corresponden a los días 14, 19 y 24 de febrero de 2021. Para esas fechas se realizó un concienzudo trabajo de fotointerpretación de combinaciones RGB para generar áreas de entrenamiento y de test que proporcionen zonas nevadas y no nevadas.

Como covariables para la modelización en fechas supuestamente sin datos Sentinel-2 se han utilizado variables topográficas (altitud, pendiente), radiación solar calculada mediante el algoritmo InsolMets (Roca-Fernández *et al*. 2025) implementado en el *software* gratuito MiraMon (Pons, 2026) y con datos libremente disponibles en "Mapas de radiación solar de la península ibérica", e imágenes de fracción de cubierta de innivación (FSC) de MODIS.

2.2. Clasificación mediante aprendizaje automático (k-NN) multivariante

De entre los métodos de aprendizaje automático que permiten obtener clasificaciones robustas sin una inversión enorme en tiempo de cálculo (que en este método depende sobre todo del número de muestras de entrenamiento) y, a la vez, entender los resultados sin tratarlos como una total "caja negra", el método k-NN ocupa un lugar destacado. k-NN es el acrónimo de k (que hace referencia a un número preestablecido de píxeles entre los píxeles usados para definir las clases deseadas en el mapa categórico que se desea obtener) y NN (siglas en inglés de *nearest neighbors*, vecinos más próximos). El método asume que es plausible que los píxeles próximos entre sí en el espacio estadístico pertenezcan a la misma clase informacional.

Para cada píxel de la imagen a clasificar, se calcula la distancia euclidiana (en el espacio estadístico de representación de las variables independientes) a cada píxel de las áreas de entrenamiento. Se eligen los k

píxeles más próximos de entre los de las áreas de entrenamiento y la clase predominante de este grupo de k píxeles será la clase que se le asigna al píxel a clasificar.

La implementación k-NN de MiraMon además de paralelización permite diversas sofisticaciones para un control óptimo de los resultados, como calcular la clase predominante mediante la moda o aplicando un peso en función del inverso de la distancia (es decir, que en el cálculo de la moda las muestras más cercanas en el espacio estadístico pesan más), etc.

2.3. Modelización mediante k-NN y mediante regresión logística para la obtención de la superficie innivada en fechas supuestamente sin datos MSI.

En una fecha en que no se disponga de datos MSI es posible abordar la cartografía a partir de una modelización entrenada con las variables geográficas y el producto MODIS citado en la sección anterior. Dicha modelización puede llevarse a cabo de nuevo con la implementación k-NN de MiraMon ya que ésta permite que las áreas de entrenamiento estén ubicadas en otra posición espacial y/o temporal a los datos a clasificar. En este caso los datos de entrenamiento corresponden a los resultados de la clasificación en la fecha en que se dispone de datos MSI, y se clasifica usando los datos de las covariables disponibles en la fecha problema. Los datos de test utilizados serán los resultados de las clasificaciones con imágenes Sentinel-2 si se demuestra que su calidad es cercana al 100 %.

Por otro lado, la naturaleza binaria del problema a resolver (nieve o no nieve) lo hace también especialmente adecuado para abordarlo mediante regresiones logísticas, tentativamente sofisticadas mediante modelos aditivos generalizados (GAM, por sus siglas en inglés). En este caso se ha utilizado la implementación del *software* gratuito R (R Core Team, 2026).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado de la clasificación en una fecha en que se dispone de datos MSI (14 de febrero de 2021) puede verse en la Figura 1. En el panel superior de dicha figura 1 se muestra una combinación RGB en la que puede apreciarse muy bien, en tonos fucsia, la extensión de la nieve en la zona cubierta por la imagen Sentinel-2. En el panel inferior puede apreciarse la clasificación prácticamente perfecta de color celeste (acierto muy cercano al 100 %). En los días 19 y 24 también se han obtenido clasificaciones prácticamente perfectas con los datos Sentinel-2, las cuales servirán de datos de test para las modelizaciones suponiendo que no se dispone de datos del sensor MSI.

Para cada una de las tres fechas de febrero de 2021 (días 14, 19 y 24) se han realizado modelizaciones basadas en los datos del día 14 para conocer con qué exactitud se pueden obtener los datos de innivación ya sin presentar los datos de las imágenes Sentinel-2, sino simplemente utilizando las covariables explicadas en el apartado anterior.

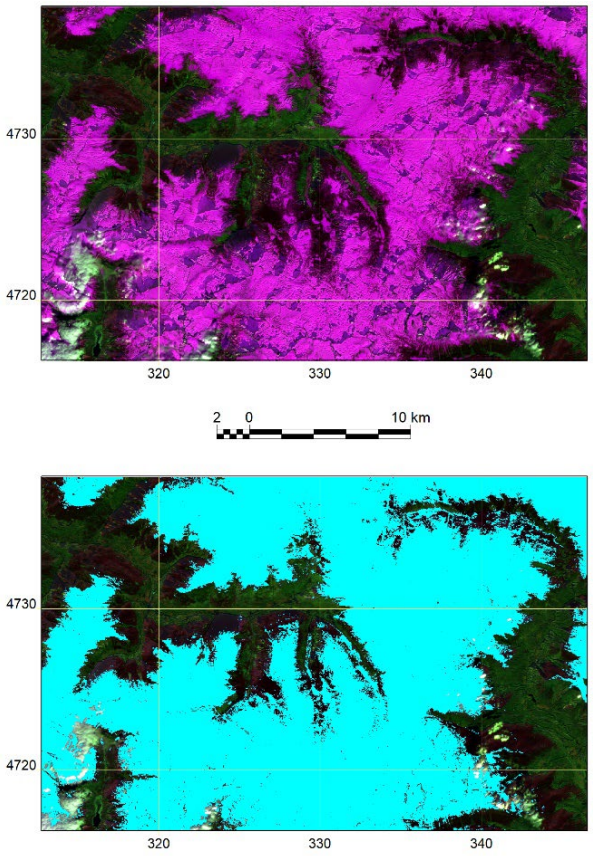


Figura 1. Detalle de composición RGB (bandas MSI 7,12,3) de la imagen del 14 de febrero de 2021 (panel superior) donde el color fucsia corresponde a píxeles innivados, y la clasificación obtenida mediante k-NN (panel inferior) donde el color celeste representa los píxeles clasificados como nieve. Sistema de referencia UTM-31-N WGS84. Coordenadas en km.

Como era esperable, en el día 14 la modelización con las variables geográficas y el producto MODIS permite obtener un mapa de innivación que presenta un 96 % de exactitud global con k-NN, y un 98 % con GAM. Cuando nos alejamos de la fecha de entrenamiento (día 14) y modelizamos en el día 19 obtenemos unos aciertos del 94 % con k-NN y del 97 % con GAM. Finalmente, alejándonos todavía más de la fecha de entrenamiento, el día 24 obtenemos unos aciertos del 95 % con k-NN y de un 96 % con GAM.

Cuando se modelizan los datos en los días 19 y 24 con los resultados de la clasificación MSI en dichas fechas el acierto es, como era de esperar, mayor (98 % en k-NN y entre 97 y 96 % con GAM).

Como ha podido verse, los niveles de acierto han sido muy altos con ambos métodos, oscilando alrededor de cifras parecidas, que no arrojan un resultado nítido sobre cuál de los métodos de modelización es mejor, pero que parecen indicar que cualquiera de los dos métodos da muy buenos resultados y que las pequeñas diferencias pueden deberse a fenómenos aleatorios o coyunturales.

4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

La aplicación de k-NN a los datos MSI de Sentinel-2 permite una excelente cartografía de superficie innivada en las fechas en que se dispone de dichas imágenes, con resultados robustos que evitan la vacilación en los umbrales de los índices NDSI. Por otro lado, la modelización, tanto con k-NN como con GAM, en fechas sin imágenes MSI (en este experimento sí que se disponía de ellas pero se han utilizado para poder verificar la calidad de la modelización) ha proporcionado también muy buenos resultados de cartografía de innivación. Si en futuros experimentos se confirma una similar bondad de ambos métodos podría optarse por k-NN por su menor coste computacional y su mayor simplicidad conceptual, lo que permite un control mayor en caso de obtener resultados extraños. Finalmente, en futuros experimentos se comprobará el acierto obtenido ante la aparición de nuevas nevadas a la luz de las mismas variables geográficas y de FSC de MODIS.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a las subvenciones del SGR (Grupos de Investigación Consolidados y de Calidad de la Generalitat de Catalunya, SGR-2021-00554) y del proyecto DynaFun (PID2023-152719OB-C21-MCIU/AEI/ERDF,EU). Xavier Pons es beneficiario de una ayuda ICREA-Academia a la Excelencia en Investigación (2023-2027).

6. REFERENCIAS

Cea, C., Cristóbal, J., & Pons, X. (2007). Determinación de la superficie nival del Pirineo catalán mediante imágenes Landsat y MODIS. XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. https://www.researchgate.net/publication/23992680

Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment, 28*:9–22. https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6

Härer, S., Bernhardt, M., Siebers, M., & Schulz, K. (2018). On the need for a time- and location-dependent estimation of the NDSI threshold value for reducing existing uncertainties in snow cover maps at different scales. *The Cryosphere, 12*(5):1629–1642. https://doi.org/10.5194/tc-12-1629-2018

Painter, T. H., Rittger, K., McKenzie, C., Slaughter, P., Davis, R. E., & Dozier, J. (2009). Retrieval of subpixel snow covered area, grain size, and albedo from MODIS. R*emote Sensing of Environment, 113*(4):868–879. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.001

Pons, X. (2026) MiraMon. Geographic Information System and Remote Sensing Software. Bellaterra: CREAF. https://www.miramon.cat/Index_spa.htm

R Core Team (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.r-project.org/

Roca-Fernández, C., Pons, X., Ninyerola, M. (2025) A Comparison of Different Solar Radiation Models in the Iberian Peninsula. *Atmosphere 16* (5): 590. https://doi.org/10.3390/atmos16050590.

SESIÓN 10

Ciencias Hidrológicas, Ingeniería Hidráulica y Recursos Hídricos

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.103

Modelación hidrodinámica en zonas deltaicas para evaluar alternativas de solución a inundaciones

Pérez Montiel, Jhonny I. [1] **Escobar Villanueva, Jairo R.** [1] **Nardini, Andrea Gianni Cristoforo** [2]

[1] Universidad de La Guajira, Colombia

[2] Fundación CREACUA—Centro Recuperación Ecosistemas Acuáticos, Riohacha-Colombia

ORCID: Pérez Montiel 0000-0003-0826-5452 Escobar Villanueva 0000-0002-2558-3500 Nardini 0000-0002-8486-7597

Correspondencia: jpemon@uniguajira.edu.co jrescobar@uniguajira.edu.co nardiniok@gmail.com

RESUMEN

La creciente vulnerabilidad en las zonas deltaicas se agrava por la variabilidad climática. Este estudio integra teledetección y modelación numérica para analizar la hidrodinámica de inundaciones en el delta del río Ranchería (norte de Colombia). La topografía se representó mediante un DEM fotogramétrico y refinado mediante observación remota y en terreno. El caudal de entrada se estimó a partir de una curva de gasto derivada de una estación limnimétrica en el límite aguas arriba del modelo. El nivel del mar se obtuvo con datos de un mareógrafo cercano. La calibración y validación del modelo hidrodinámico (IBER) se realizaron con mediciones de caudal y calado en box culverts representativos ubicados dentro y en la frontera del dominio. La extensión de la inundación se validó con imágenes multiespectrales PlanetScope. Para simular las alternativas de intervención, se modificó el DEM según las obras propuestas (RAS Mapper). Los indicadores de ajuste evidencian una calibración adecuada y la validación confirma la robustez del modelo. Tras el filtrado de la vegetación y las zonas no inundadas, se obtuvo una aceptable concordancia espacial (Kappa ≈ 0.75). La simulación de las alternativas fue clave para evaluar la amenaza de inundación en función de viviendas afectadas, los calados máximos y las cotas alrededor de los diques.

Palabras clave: *modelo hidrodinámico, zona deltaica, inundaciones, amenaza, Imagen satelital*

Fecha de recepción: 24 enero 2026 · **Fecha de aceptación:** 24 enero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Modelación hidrodinámica en zonas deltaicas para evaluar alternativas de solución a inundaciones

Pérez Montiel, Jhonny I. [(1)], Escobar Villanueva, Jairo R. [(1)], Nardini, Andrea Gianni Cristoforo [(2)]

[(1)] Universidad de La Guajira, Colombia.

0000-0003-0826-5452, jpemon@uniguajira.edu.co ; 0000-0002-2558-3500, jrescobar@uniguajira.edu.co.

[(2)] Fundación CREACUA—Centro Recuperación Ecosistemas Acuáticos, Riohacha-Colombia,

0000-0002-8486-7597, nardiniok@gmail.com.

Resumen: La creciente vulnerabilidad en las zonas deltaicas se agrava por la variabilidad climática. Este estudio integra teledetección y modelación numérica para analizar la hidrodinámica de inundaciones en el delta del río Ranchería (norte de Colombia). La topografía se representó mediante un DEM fotogramétrico y refinado mediante observación remota y en terreno. El caudal de entrada se estimó a partir de una curva de gasto derivada de una estación limnimétrica en el límite aguas arriba del modelo. El nivel del mar se obtuvo con datos de un mareógrafo cercano. La calibración y validación del modelo hidrodinámico (IBER) se realizaron con mediciones de caudal y calado en box culverts representativos ubicados dentro y en la frontera del dominio. La extensión de la inundación se validó con imágenes multiespectrales PlanetScope. Para simular las alternativas de intervención, se modificó el DEM según las obras propuestas (RAS Mapper). Los indicadores de ajuste evidencian una calibración adecuada y la validación confirma la robustez del modelo. Tras el filtrado de la vegetación y las zonas no inundadas, se obtuvo una aceptable concordancia espacial (Kappa ≈ 0.75). La simulación de las alternativas fue clave para evaluar la amenaza de inundación en función de viviendas afectadas, los calados máximos y las cotas alrededor de los diques.

Palabras clave: modelo hidrodinámico, zona deltaica, inundaciones, amenaza, Imagen satelital.

Hydrodynamic modeling in deltaic areas to evaluate alternative solutions to flooding

Abstract: *Increasing vulnerability in deltaic regions is exacerbated by climate variability. This study integrates remote sensing and numerical modeling to analyze flood hydrodynamics in the Ranchería River delta (northern Colombia). Topography was represented using a photogrammetric DEM, refined through remote sensing and field observations. Inflow discharge was estimated from a stage–discharge rating curve derived from a limnimetric station located at the upstream boundary of the model domain, while sea levels were obtained from a nearby tide gauge. Calibration and validation of the hydrodynamic model (IBER) were performed using discharge and water depth measurements at representative box culverts located within and along the domain boundaries. Flood extent was validated using PlanetScope multispectral imagery. Intervention alternatives were simulated by modifying the DEM according to proposed works (RAS Mapper). Performance metrics indicate satisfactory calibration, and validation confirms the robustness of the model. After filtering vegetation and non-flooded areas, an acceptable spatial agreement (Kappa ≈0.75) was achieved. The simulation of alternatives was critical for assessing flood hazard in terms of affected dwellings, maximum water depths, and elevations around levees.*

Keywords*: hydrodynamic model, delta region, flooding, threat, satellite image.*

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas deltaicas enfrentan presiones crecientes derivadas en parte del cambio climático (CC) y crecimiento poblacional acelerado. Los modelos hidrodinámicos bidimensionales (2D) constituyen una herramienta clave para comprender, predecir y gestionar el riesgo de inundación. Estos modelos permiten simular con mayor detalle espacial procesos de inundación de llanuras aluviales e interacción río–mar. (Cea & Costabile, 2022), No obstante, su confiabilidad depende en gran medida de la calidad de los datos de entrada, tales como el modelo digital de elevación (DEM), los hidrogramas, el nivel del mar y la información temática del terreno. En este contexto, la teledetección desempeña un papel fundamental al proporcionar

información geoespacial clave para la modelación de inundaciones. Sin embargo, en regiones con limitada disponibilidad de datos, como el delta del río Ranchería, Caribe colombiano (Pérez *et al*., 2018) la generación de estos insumos representa un desafío significativo.

La integración de sensores remotos fue fundamental para generar y ajustar un DEM fotogramétrico, así como para validar la extensión de la inundación. Esto permitió estimar la amenaza en distintos escenarios hidrológicos y de crecimiento poblacional, en un contexto de alta escasez de datos. En este trabajo se presenta la modelación hidrodinámica de alternativas de solución frente a inundaciones y se destaca el papel de la teledetección como herramienta clave de soporte.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El delta del río Ranchería se ubica al norte de Colombia (Fig.1), con una dinámica fluvio-marina compleja, habitado principalmente por indígenas wayuu.

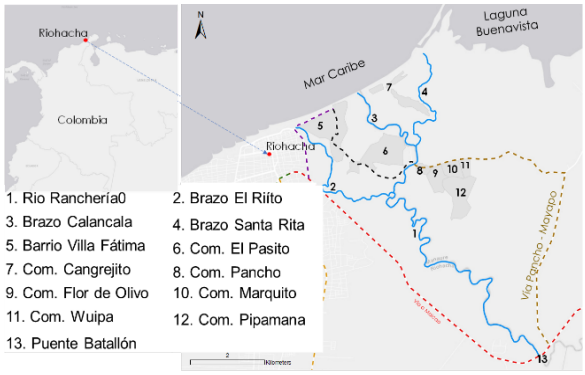


Figura 1. Delta del Ranchería, brazos y comunidades

2.1. DEM fotogramétrico

Se disponía de un DEM de resolución gruesa (10 m), suministrado por el Fondo de Adaptación de Colombia y generado a partir de imágenes aerotransportadas (2017). No obstante, presentaba limitaciones significativas, como baja resolución en zonas densamente vegetadas (especialmente en el corredor fluvial), presencia de artefactos y una representación inadecuada de la topografía hidráulicamente relevante. Por ello, se generó un nuevo DEM mediante fotogrametría (Agisoft Metashape®), actualizado a 2023, a partir de: (i) filtrado de vegetación mediante clasificación semiautomática de la nube de puntos; (ii) incorporación de nuevas vías y correcciones hidráulicas en diques, incluyendo box culvert no detectables por teledetección; (iii) validación altimétrica independiente mediante GNSS-RTK; y (iv) inserción del cauce principal y sus brazos, en gran medida no visibles en las imágenes. La mejora se evidencia en la reducción del RMSE de 0.991 m a 0.387 m al pasar del modelo digital de superficie (DSM) al DEM (terreno). Se observó una discrepancia del 11,7 % en el perfil longitudinal del cauce del río con respecto a las secciones transversales medidas en campo. Este proceso y sus resultados se documenta en Escobar Villanueva *et al*., (2025).

Esta fue la única forma con que la modelación 2D logró brindar un comportamiento dinámico conforme con las observaciones realizadas en campo y con imágenes satelitales de Google Earth y PlanetScope. Luego, el DEM resultante fue modificado con la herramienta RAS Mapper (Brunner, 2023) para representar y obtener un DEM en cada alternativa de solución considerada (sección 2.4), incorporando conexiones a meandros abandonados o paleo-cauces (madres viejas) y insertando o eliminando terraplenes de protección, etc. Los box culvert se incorporaron a través de la centerline, considerando las cotas en los extremos, y los polígonos se usaron para las madres viejas, terraplenes y vías, con elevaciones específicas que permiten representar su función como barreras o zonas preferenciales de flujo.

2.2 Condiciones hidráulicas

Ante la inoperatividad de la estación hidrométrica más cercana (≈16 km), se instaló un limnímetro en la entrada del modelo (Puente Batallón) y, mediante topografía, se construyó la relación caudal–nivel Q(h)=A(h) v(h) a partir de mediciones con el método del flotador. Con los niveles registrados en eventos de crecida de 2022 se definió el hidrograma requerido a la entrada del modelo. La condición de salida se estableció con datos del mareógrafo de Ballenas (DIMAR), ajustados altimétricamente con un limnímetro instalado por nuestro equipo en la desembocadura del brazo El Riíto, aplicando una corrección de −14.12 cm.

La condición inicial en rigor es desconocida, pero seguramente cercana a una condición de estiaje, se suplió garantizando un intervalo de tiempo de 48 horas suficientes para el "warm up" del modelo. La precipitación se excluyó debido a la limitada disponibilidad de datos -solo diarios-, vacíos durante los eventos considerados y su baja sensibilidad hidrodinámica preliminar.

2.3 Calibración y validación del modelo

Se adoptó la teledetección para definir y actualizar las coberturas de uso del suelo y definir los coeficientes de Manning (n) y el número de curva (NC). Este último se estimó según el tipo y cobertura del suelo para representar la infiltración (Diaz Carvajal & Mercado Fernández, 2017). Pese a excluir la precipitación, el NC se consideró para estimar la pérdida por infiltración por inundación fluvial. IBER fue el modelo 2D elegido para el análisis hidrodinámico del delta. La calibración (2023) inició evaluando la sensibilidad "n" y NC independientemente y luego en conjunto. El mejor desempeño se obtuvo con un incremento del 15% en "n" y NC inicial, configuración que se utilizó en la validación (2022 y 2024). El desempeño del modelo se evaluó mediante indicadores de ajuste, comparando caudales y profundidades simulados y medidos en *box culvert* representativos, ubicados dentro del dominio y en sus fronteras. La extensión de la inundación se evaluó mediante la comparación entre imágenes PlanetScope y los resultados del modelo, utilizando el índice de Kappa (Ahmad *et al*., 2025; Hostache *et al*., 2018) complementado con verificación en campo en zonas con vegetación densa y áreas con confusión espectral, especialmente suelos desnudos. Antes de los ajustes, Kappa era ≈0.20. Aunque el índice presenta limitaciones

(sensibilidad a la distribución de clases y bajo desempeño en conjuntos desbalanceados), no se emplearon métricas alternativas (p. ej., F1-score, precision, recall) que proporcionan una evaluación más informativa de la evaluación de la exactitud de la clasificación, aunque estudio comparativo entre estos dos índices han encontrado resultados similares (Ahmad *et al*., 2025). Considerando que las deficiencias en los datos eran lejos más importantes que las deficiencias estructurales del índice, se implementó un procedimiento bien estructurado así: (i) exclusión de áreas con vegetación densa no detectables por satélite; (ii) inclusión de zonas inundadas confirmadas por trabajo de campo o reportes locales; y (iii) exclusión de áreas clasificadas como inundadas que correspondían a cotas no inundables o a suelos húmedos.

2.4 Simulación de alternativas

Las alternativas, diseñadas de manera participativa, se simularon para evaluar la reducción de la amenaza y, con ella, el riesgo. Se consideraron: i) "ALT_0" (condición actual con crecimiento demográfico), ii) "NATURAL" (restablecimiento de la dinámica hidráulica eliminando todos los obstáculos, sin nuevas protecciones y con re conexión de cuerpos hídricos ahora desconectados), iii) "INGENIERIL" (basada en obras de protección, o sea diques alrededor de los asentamientos), iv) "MIXTA" (combinación de medidas estructurales y naturales) y v) APTA (convivencia con la inundación sin realizar nuevas protecciones, pero apuntándole a la adaptación de vivienda, o sea su elevación o sellado, realización de "caminos secos" peatonales y otras adecuaciones para evitar el aislamiento). Su simulación se efectuó bajo escenarios sin y con cambio climático proyectado a 2100 (incremento del caudal en 30% y nivel medio del mar en 75 cm).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Calibración y validación del modelo

En la Tabla 1 se presentan los indicadores de ajuste obtenidos en la calibración y validación del modelo.

Tabla 1. Indicadores de ajuste en la validación y calibración del modelo

Indicador	Calibración, 2023		Validación 2022		Validación 2024	
	Caudales	*Calados*	*Caudales*	*Calados*	*Caudales*	*Calados*
BIAS unitario	-0.90	0.01	-2.17	0.35	-0.82	-0.14
PBIAS	-15.28	1.57	-11.64	21.70	-16.59	-17.06
RMSE	1.97	0.44	0.00	0.52	1.60	0.46
Var. explicada	0.98	0.64	1.00	0.81	0.98	0.63
NSE	0.97	0.64	0.90	0.64	0.97	0.61
R^2	0.98	0.87	1.00	0.99	0.98	0.82
Balance Q (m^3/s)	-14.38	NA	-8.67	NA	-13.04	NA
Kappa (Planet)	0.75		0.77		0.73	

La Figura 2 presenta mapas binarios de inundación (agua/no agua) que comparan el producto derivado de teledetección con los resultados del modelo para el evento de 2023, evidenciando una concordancia espacial consistente con los valores aceptables del índice de Kappa. La buena concordancia espacial (Kappa 0.73–0.77) están cercanos a los reportados en la literatura (Ahmad *et al*., 2025; Berezowski *et al.*, 2024; Hostache *et al.*, 2018)**.** Los resultados de calibración y validación evidencian un desempeño robusto del modelo hidrodinámico, con PBIAS aceptable *(López-Bermeo et al*., 2022), altos valores de NSE y R^2 especialmente en caudales; bajos valores de RMSE, esto indica una adecuada representación hidrodinámica (El Gharamti *et al., 2024)*. Las variaciones del RMSE se deben a la sensibilidad de este indicador (An & Ouyang, 2025). El menor desempeño para el calado indica que el modelo no logra mantener la coherencia vertical, un comportamiento reportado por Kuhanestani *et al.* (2025).

3.2 Simulación de alternativas

Los mapas de inundación de cada alternativa permitieron evaluar criterios como: número de viviendas inundadas con diferentes calados (>10, 50, 100 cm); número de viviendas aisladas; proxy del riesgo residual asociado al posible colapso de los diques, etc.. Como ejemplo (Fig. 3), la ALT_0 muestra inundación generalizada, que se intensifica bajo el escenario de cambio climático. La alternativa APTA fue la más favorable en términos técnicos, ambientales y socioculturales.

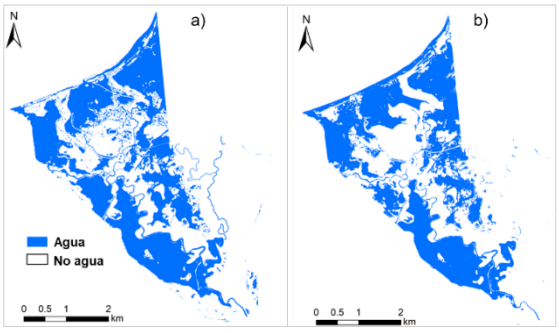


Figura 2. Mapa binario de inundación evento 2023: a) producto modelación 2D, b) teledetección (PlanetScope).

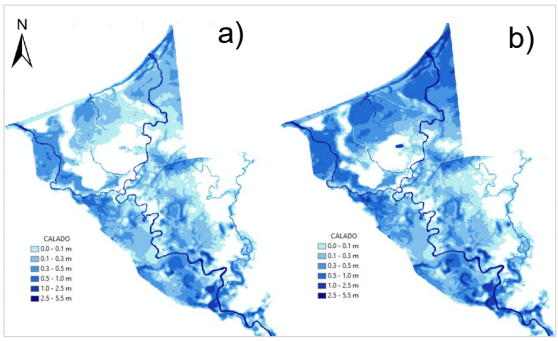


Figura 3. Simulación alternativa_0: a) sin, b) con CC.

4. CONCLUSIONES

A pesar de no contar con insumo geoespaciales oficiales de detalles, se logró obtener a partir de la teledetección un DEM aerofotogramétrico robusto e información semántica como mascara de inundación, apoyo esencial para la modelación hidrodinámica 2D. La estrategia se articuló en varias acciones que, en su conjunto, nos permitieron producir un DEM coherente con las observaciones remota y de campo.

Gracias a las imágenes satelitales (PlanetScope), y las mediciones de caudales y niveles en box culvert realizadas por el equipo durante eventos de crecida, se pudo calibrar y validar con éxito el modelo hidrodinámico. A pesar de las limitaciones estructurales del índice Kappa, resultó particularmente útil, acompañado por diversos otros indicadores de desempeño para evaluar la prestación del modelo 2D.

La simulación de las alternativas permitió cuantificar la amenaza y el riesgo. La propuesta APTA resultó óptima en términos técnicos y socioambientales, al priorizar la adaptación mediante arquitectura palafítica, viaductos peatonales y conectividad resiliente.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Conv. 890-2020, Proy. 82207), recursos administrados por el ICETEX. Al Fondo de Adaptación de Colombia por las aerofotografías base del DEM, y a la DIMAR (datos mareógrafo). En general a todo el equipo de trabajo del proyecto Delta del Ranchería.

6. REFERENCIAS

Ahmad, I., Farooq, R., Ashraf, M., Waseem, M., & Shangguan, D. (2025). Improving flood hazard susceptibility assessment by integrating hydrodynamic modeling with remote sensing and ensemble machine learning. *Natural Hazards*, *121*(7), 7839–7868. https://doi.org/10.1007/s11069-025-07109-2

An, H., & Ouyang, C. (2025). A hybrid framework for real-time flash flood forecasting in small ungauged catchments: integrating hydrodynamic simulations with LSTM networks. *Journal of Hydrology*, *661*, 133688. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133688

Berezowski, T., Niemiec, S., & Chybicki, A. (2024). Floodsar: Automatic mapping of river flooding extent from multitemporal SAR imagery. *SoftwareX*, *26*, 101717. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101717

Brunner, G. W. (2023). *HEC-RAS river analysis system: hydraulic reference manual (6.4)*. Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

Cea, L., & Costabile, P. (2022). Flood Risk in Urban Areas: Modelling, Management and Adaptation to Climate Change. A Review. *Hydrology*, *9*(3). https://doi.org/10.3390/hydrology9030050

Diaz Carvajal, Á., & Mercado Fernández, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingenier{\'\i}a y Desarrollo*, *35*(2), 452–470.

El Gharamti, M., Rafieeinasab, A., & McCreight, J. L. (2024). Leveraging a novel hybrid ensemble and optimal interpolation approach for enhanced streamflow and flood prediction. *Hydrology and Earth System Sciences*, *28*(14), 3133–3159. https://doi.org/10.5194/hess-28-3133-2024

Escobar Villanueva, J. R., Pérez-montiel, J. I., & Nardini, A. G. C. (2025). *DEM Generation Incorporating River Channels in Data-Scarce Contexts : The " Fluvial Domain Method ."* *12*(2), 1–21. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/hydrology12020033

Hostache, R., Chini, M., Giustarini, L., Neal, J., Kavetski, D., Wood, M., Corato, G., Pelich, R.-M., & Matgen, P. (2018). Near-Real-Time Assimilation of SAR-Derived Flood Maps for Improving Flood Forecasts. *Water Resources Research*, *54*(8), 5516–5535. https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2017WR022205

Kuhanestani, P. K., Bomers, A., Booij, M. J., & Hulscher, S. J. M. H. (2025). Hydraulic river model calibration and validation for comprehensive hydrograph simulation: Evaluating accuracy across discharge ranges. *Journal of Hydrology*, *660*, 133210. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133210

López-Bermeo, C., Montoya, R. D., Caro-Lopera, F. J., & Díaz-García, J. A. (2022). Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *127*(July 2021), 103184. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184

Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha-Colombia. *Información Tecnológica*, *29*(4), 143–156. https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000400143

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.115

Evaluación del estado de la vegetación de ribera mediante teledetección como referencia para el análisis de caudales ecológicos adaptativos.

Herrera, Francisco [1] **Contreras, Eva** [1] **Pimentel, Rafael** [1] **Andreu, Ana** [1]

[1] DAUCO, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Córdoba, 14071, Córdoba, España

ORCID: Herrera 0000-0002-1469-992X Contreras 0000-0002-6777-820X Pimentel 0000-0001-6990-4874 Andreu 0000-0001-8346-5417

Correspondencia: o92hegaf@uco.es econtreras@uco.es rpimentel@uco.es ana.andreu@uco.es

RESUMEN

La teledetección puede ser una herramienta de apoyo eficaz para evaluar el estado ecológico de las masas de agua, especialmente en sistemas regulados donde los umbrales hidrológicos fijos no siempre reflejan la respuesta ecológica real. Este estudio examina el régimen hidrológico en la cuenca del río Giribaile (Andalucía) y cómo se ajusta a los umbrales definidos por el Plan Hidrológico vigente, analizando su grado de cumplimiento, y explora cómo la dinámica de la vegetación de ribera, evaluada mediante series de imágenes del satélite Landsat, puede integrarse para ajustar los umbrales de caudal ecológico según las condiciones locales. El régimen de caudal incumple con frecuencia los umbrales establecidos en el plan, lo que evidencia la necesidad de estrategias de gestión específicas para incorporar las dinámicas de distintas masas de agua. El NDVI captura la fenología ribereña, pero su relación con el caudal no es directa ni lineal y depende de múltiples factores ambientales. Sin embargo, su monitoreo ayuda a detectar situaciones de desequilibrio ecológico y puede servir para adaptar y actualizar los umbrales de caudal.

Palabras clave: *NDVI, vegetación de ribera, caudales ecológicos, embalses, Landsat*

Fecha de recepción: 4 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 4 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación del estado de la vegetación de ribera mediante teledetección como referencia para el análisis de caudales ecológicos adaptativos.

Herrera, Francisco [(1)], Contreras, Eva [(1)], Pimentel, Rafael [(1)], Andreu, Ana [(1)]

[(1)] DAUCO, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Córdoba, España.

0000-0002-1469-992X, o92hegaf@uco.es ; 0000-0002-6777-820X, econtreras@uco.es.

0000-0001-6990-4874, rpimentel@uco.es; 0000-0001-8346-5417, ana.andreu@uco.es.

Resumen: La teledetección puede ser una herramienta de apoyo eficaz para evaluar el estado ecológico de las masas de agua, especialmente en sistemas regulados donde los umbrales hidrológicos fijos no siempre reflejan la respuesta ecológica real. Este estudio examina el régimen hidrológico en la cuenca del río Giribaile (Andalucía) y cómo se ajusta a los umbrales definidos por el Plan Hidrológico vigente, analizando su grado de cumplimiento, y explora cómo la dinámica de la vegetación de ribera, evaluada mediante series de imágenes del satélite Landsat, puede integrarse para ajustar los umbrales de caudal ecológico según las condiciones locales. El régimen de caudal incumple con frecuencia los umbrales establecidos en el plan, lo que evidencia la necesidad de estrategias de gestión específicas para incorporar las dinámicas de distintas masas de agua. El NDVI captura la fenología ribereña, pero su relación con el caudal no es directa ni lineal y depende de múltiples factores ambientales. Sin embargo, su monitoreo ayuda a detectar situaciones de desequilibrio ecológico y puede servir para adaptar y actualizar los umbrales de caudal.

Palabras clave: NDVI, embalses, Directiva Marco del Agua, Landsat

Assessment of riparian vegetation status using remote sensing as a reference for adaptive environmental flows

***Abstract**: Remote sensing can be an effective supporting tool for assessing the ecological status of water bodies, particularly in regulated systems where fixed hydrological thresholds do not always reflect the actual ecological response. This study examines the local flow regime in the Giribaile basin (Andalusia) and its alignment with the thresholds defined in the current Hydrological Plan, and analyses the degree of compliance. In parallel, the study explores how riparian vegetation dynamics, assessed using time-series Landsat imagery, can be integrated to adjust ecological flow thresholds to local conditions. Flows frequently fail to meet the thresholds established in the plan, highlighting the need for management strategies tailored to the different dynamics of water bodies. NDVI captures riparian phenology, but its relationship with flow is neither direct nor linear and depends on multiple environmental factors. Nevertheless, NDVI monitoring helps detect ecological imbalances and supports the adaptation and updating of ecological flow thresholds.*

***Keywords**: NDVI, reservoirs, Water Framework Directive, Landsat*

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de infraestructuras hidráulicas, como embalses, ha alterado significativamente los regímenes naturales de caudal de los ríos, afectando su estructura y su funcionamiento ecológico. En los ríos mediterráneos, caracterizados por una elevada variabilidad climática y una marcada estacionalidad, estas alteraciones se traducen con frecuencia en procesos de degradación del ecosistema fluvial (Meztger *et al*., 2021). La Directiva Marco del Agua (DMA) busca garantizar y mantener el buen estado ecológico de las masas de agua, para lo cual introduce el concepto de caudal ecológico. Este se define como "aquel que contribuye a alcanzar el buen estado o buen potencial ecológico en los ríos o en las aguas de transición y mantiene, como mínimo, la vida piscícola y su vegetación de ribera".

Este caudal debe ser representativo de la variabilidad natural del régimen de caudales del río y garantizar la correcta dinámica de los componentes del ecosistema fluvial. Sin embargo, la definición de estos caudales se basa habitualmente en umbrales hidrológicos estáticos que no siempre reflejan la respuesta ecológica real del sistema, especialmente en cuencas reguladas y altamente variables, como las mediterráneas, o en estudios de hábitat difícilmente extrapolables entre ríos. En este contexto, la teledetección puede servir como

herramienta de apoyo para el seguimiento del estado ecológico del sistema. Las series temporales de índices de vegetación, como el NDVI, permiten caracterizar patrones fenológicos, identificar anomalías y evaluar el estado de la vegetación de ribera de forma continua y distribuida (Ivits *et al*., 2009; Wu *et al*., 2022). El uso de estos indicadores permite integrar la respuesta ecológica observada como elemento de referencia para una gestión más adaptativa y sensible a las condiciones locales de los caudales ecológicos.

El objetivo de este trabajo es evaluar el estado de la vegetación de ribera mediante series temporales de NDVI en la cuenca del embalse del Giribaile y explorar su potencial como referencia eco-hidrológica para apoyar la definición de caudales ecológicos adaptativos en ríos mediterráneos regulados. Como paso previo, se analiza el grado de cumplimiento de los umbrales de caudal ecológico establecidos en el Plan Hidrológico del Guadalquivir (PHG) vigente, con el fin de contextualizar la respuesta observada de la vegetación de ribera y evaluar las limitaciones de los enfoques basados en umbrales hidrológicos fijos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

El área de estudio se localiza en la cuenca vertiente al embalse de Giribaile, en la cuenca del río Guadalquivir (sur de España). Se trata de una cuenca mediterránea con marcada estacionalidad climática, caracterizada por veranos secos e inviernos húmedos y por una intensa regulación asociada a los embalses de Giribaile, Guadalmena y Siles. La vegetación de ribera está compuesta por comunidades herbáceas, arbustivas y arbóreas típicas de ríos mediterráneos, mientras que los usos del suelo dominantes en el entorno son el olivar tradicional de secano y el monte mediterráneo (Fig. 1).

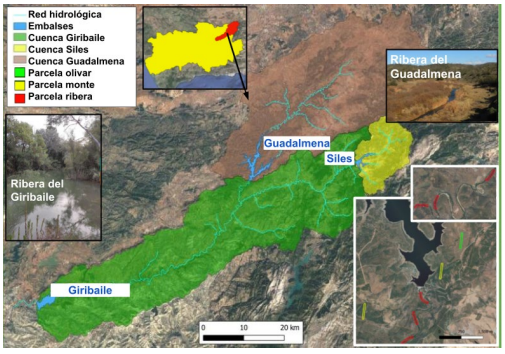


Figura 1. Área de estudio.

2.2. Evaluación de la respuesta de la vegetación al régimen de caudal mediante información remota

Se utilizaron las composiciones de NDVI de 8 días, derivadas de imágenes de Landsat (Colección 2, Nivel 2), para el período 2000–2023. Se delimitaron parcelas de aproximadamente 3 ha de vegetación de ribera, aguas arriba y aguas abajo de los embalses, así como parcelas de olivar tradicional de secano y de monte mediterráneo, para comparar patrones fenológicos y diferenciar la respuesta de la vegetación de ribera respecto de otros usos. Las series temporales de NDVI se suavizaron mediante medias móviles mensuales para reducir el ruido. Se calculó una curva media multianual representativa del comportamiento fenológico típico de la vegetación de ribera y se analizó la desviación del NDVI respecto de dicha curva como indicador de anomalía ecológica y de posibles alteraciones en el funcionamiento ecohidrológico del sistema.

2.3. Análisis del cumplimiento del régimen de caudal ecológico mediante información hidrometeorológica

Se utilizaron datos diarios de caudal de entrada (Qe), caudal de salida (Qs) y precipitación (P) en los embalses de Giribaile, Guadalmena y Siles, correspondientes al periodo 2000–2023, obtenidos del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir para caracterizar el régimen hidrológico y su variabilidad interanual.

El PHG (ciclo 2022–2027) define un régimen de caudal mínimo (Qmin) caracterizado por una escasa variabilidad interanual, manteniéndose dentro de un rango estrecho y cuasi constante, de 0.3–0.74 m^3/s y 0.55–0.63 m^3/s, para Guadalmena y Giribaile, respectivamente. Sobre esta base, se evaluó el incumplimiento de tres supuestos habitualmente utilizados en la gestión hidrológica: (A) caudales de entrada inferiores al 50 % del Qmin; (B) caudales de entrada inferiores al 20 % del Qmin durante más de 72 horas consecutivas en un mes; y (C) número anual de episodios de incumplimiento del Qmin como indicadores operativos del grado de presión hidrológica sobre el sistema. Como referencia teórica, también se comparó el régimen natural de entrada con los umbrales definidos para evaluar su consistencia con el funcionamiento hidrológico natural. Estos resultados se utilizaron como información complementaria para interpretar la respuesta de la vegetación de ribera. Para garantizar la homogeneidad del análisis a lo largo de la serie temporal, los umbrales son para condiciones ordinarias. La incorporación de escenarios de sequía constituye una línea de trabajo futura.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Funcionamiento hidrológico y cumplimiento del régimen de caudales mínimos

Los embalses analizados presentan dinámicas de Qe claramente diferenciadas, lo que se traduce en patrones distintos de cumplimiento del caudal ecológico, definido como el régimen de caudal mínimo establecido en el PHG. El Qe en Giribaile (Fig. 2, línea azul) se sitúa en torno a un valor medio durante la mayor parte del año y aumenta durante los episodios de lluvia. Durante el periodo estival, debido a la necesidad de atender la demanda de riego, el Qe en Giribaile se ve claramente influido por los desembalses procedentes del Guadalmena (Fig. 2, línea verde) y, en menor medida, del embalse de Siles (Fig. 2, línea roja), lo que atenúa la señal climática natural. Por el contrario, el Qe del embalse del Guadalmena presenta un régimen más

próximo al natural (Fig. 3) y su Qs también está regulado para cubrir las necesidades de riego.

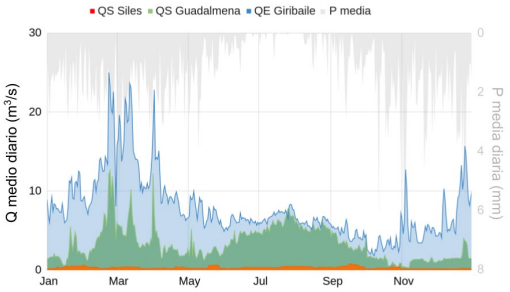


Figura 2. Evolución del Qe y de la P en Giribaile y del Qs en Guadalmena y Siles, en un año hidrológico medio (2019/20).

En el embalse de Giribaile, los caudales de entrada son relativamente estables y están fuertemente condicionados por los desembalses desde el Guadalmena, lo que se traduce en un bajo grado de incumplimiento de los umbrales mínimos. Por el contrario, el embalse del Guadalmena presenta un régimen de aportaciones natural, con incumplimiento del régimen ecológico recurrente, especialmente durante el periodo estival y en años secos, lo que evidencia la vulnerabilidad del sistema ante la demanda de riego.

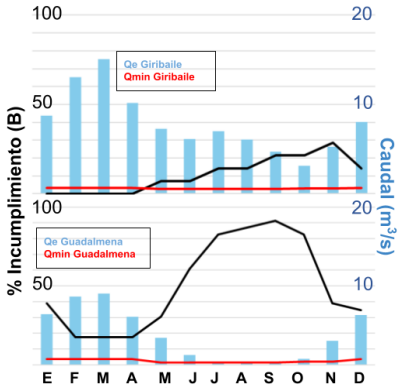


Figura 3. Valor medio de Qe, incumplimiento del supuesto B y Qmin, en los embalses del Giribaile y del Guadalmena para 2000-2023.

Estos resultados evidencian que un régimen de caudal mínimo más o menos constante, como el actualmente definido en el PHG, no captura adecuadamente la diversidad de respuestas hidrológicas y ecológicas en sistemas regulados (Fig. 3).

3.2. Caracterización de la variabilidad de la vegetación de ribera mediante el NDVI

Los resultados muestran patrones estacionales consistentes con su diferente vegetación de ribera: matorral y herbáceos para el Giribaile, con valores máximos en primavera y un descenso progresivo durante el período seco, y vegetación arbórea en el Guadalmena, con valores más estables a lo largo de todo el año y sus máximos dependientes de la radiación solar disponible (Fig. 4). Estos patrones difieren claramente de los observados en las parcelas de olivar tradicional y en el monte mediterráneo, que presentan una mayor dependencia directa de la precipitación (Fig. 4). Esta comparación refuerza el papel diferenciador de la vegetación de ribera como indicador ecohidrológico, al integrar no solo la señal climática, sino también la disponibilidad hídrica asociada al régimen de caudales. Al estar el Qe del Giribaile influenciado por los aportes del Guadalmena, muestra valores de NDVI similares tanto en la entrada como en la salida del embalse durante todo el periodo (Fig. 4). En este caso, la vegetación de ribera se ve favorecida por los desembalses en época de riego, como lo indica el aumento del NDVI en la época estival. Sin embargo, este régimen alterado puede generar una mayor vulnerabilidad de la vegetación de ribera ante períodos de sequía. Por el contrario, en el Guadalmena, cuyo Qe presenta un régimen más natural, los valores de NDVI a la entrada son inferiores a los observados a la salida, lo que sugiere un efecto directo de la operación del embalse sobre el estado de la vegetación ribereña aguas abajo (Fig. 4).

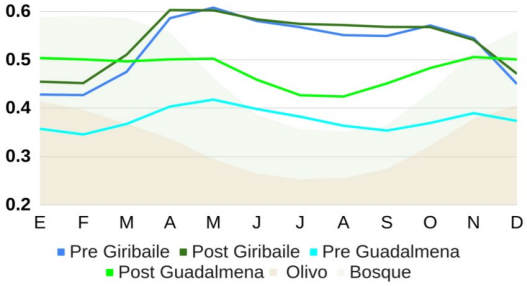


Figura 4. Análisis de la evolución media del NDVI de diferentes tipos de vegetación: ribereña aguas arriba (Pre) y aguas abajo (Post) de los embalses Giribaile y Guadalmena, de olivar y de monte mediterráneo.

3.3. Adaptación del régimen caudal ecológico al estado de la vegetación de ribera

En el embalse de Giribaile se identifica un rango de valores de NDVI similar tanto a la entrada como a la salida del embalse (Fig. 5), lo que permite definir una horquilla de referencia asociada a un estado relativamente estable de la vegetación de ribera (Fig. 6). Este rango puede utilizarse como elemento de control para evaluar desviaciones anómalas del sistema, especialmente durante periodos secos. En el caso del Guadalmena, se observan dos rangos diferenciados de NDVI: uno a la entrada del embalse y otro a la salida (Fig. 4 y 5). Estas diferencias reflejan el efecto de la regulación sobre la disponibilidad hídrica para la vegetación de ribera. Además, los menores valores de NDVI a la entrada evidencian que las aportaciones naturales al embalse incumplen con frecuencia el régimen de caudal ecológico establecido (Fig. 3), por lo que el régimen de caudal mínimo definido en el PHG no se ajusta al régimen natural del río. La identificación de rangos de referencia del NDVI asociados a un estado ecológico estable (Fig. 6) permite vincular el estado observado de la vegetación con los valores medidos de caudal circulante. Sin embargo, las interacciones entre el caudal y el NDVI son complejas y no lineales. Así lo demuestran las relaciones

observadas entre P y NDVI, y entre Qe/Qs y NDVI, existiendo otros factores que modulan dichas relaciones (fenología, nivel freático y superficie de ribera cubierta de agua). En el caso del Qe del Guadalmena, en régimen natural, se observa que a menores valores de precipitación disminuyen los valores de NDVI. Asimismo, la vegetación alcanza un punto de saturación a partir del cual un incremento adicional en la disponibilidad hídrica no se traduce en un aumento del NDVI.

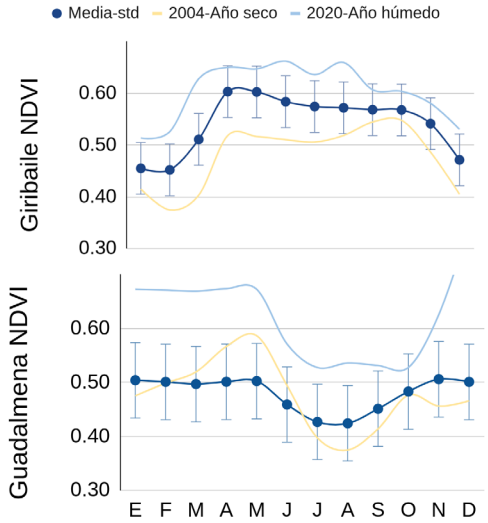


Figura 5. Comparación de la evolución estacional del valor medio (± desviación estándar) de NDVI a la salida de Giribaile y Guadalmena (Pre) con la del año seco de 2004 y la del año húmedo de 2020.

Los factores que afectan al estado de la vegetación de ribera muestran, además, retrasos temporales en su respuesta. El crecimiento y desarrollo de la vegetación dependen de los periodos de inundación y del nivel freático, y no únicamente del caudal instantáneo (Merritt *et al*., 2010). Las especies leñosas, además, suelen presentar una respuesta más lenta y sostenida a los cambios en el régimen de caudal. Esto refuerza la necesidad de considerar el efecto acumulado de periodos prolongados de caudal reducido, más allá de los eventos puntuales. Sin embargo, no es fácil determinar qué factor influye de forma dominante en los cambios observados en los ciclos fenológicos ni cuál es su contribución individual. Es necesario analizar el efecto continuo de niveles de caudal reducidos para identificar posibles puntos de inflexión en la respuesta del NDVI, así como los periodos más adecuados para su monitorización. En este sentido, un análisis estadístico más detallado, que profundice en las interacciones entre el caudal y el NDVI y otras variables relevantes, como el momento fenológico de la vegetación, el nivel freático o los períodos de inundación, y que permita cuantificar la contribución relativa de cada uno de estos factores al mantenimiento del buen estado de la vegetación de ribera, constituye una línea de investigación futura necesaria.

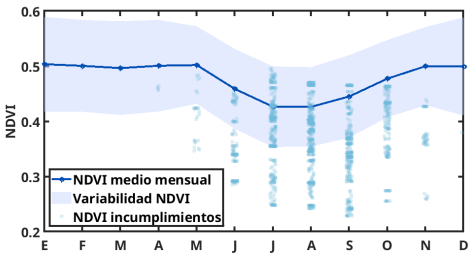


Figura 6. Densidad de valores de NDVI asociados al incumplimiento del supuesto B para todo el periodo estudiado respecto de la media de NDVI en la entrada del embalse del Guadalmena.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que la evaluación de los caudales ecológicos basada exclusivamente en umbrales hidrológicos fijos presenta limitaciones en ríos mediterráneos regulados. La integración de indicadores derivados de información remota complementa la evaluación tradicional, aportando información directa y actualizada sobre la respuesta ecológica. Así, la monitorización del NDVI podría ser un indicador para activar mecanismos de alarma en aquellos casos en los que se aleje de la horquilla local, complementando de forma efectiva los sistemas de monitoreo de la DMA. No obstante, la relación entre el caudal y el NDVI es compleja, no lineal y modulada por otros factores. Aunque la resolución espacial de Landsat captura patrones generales, futuros trabajos explorarán información con mayor detalle para mejorar la representación y analizar los efectos de escala.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de la subvención RYC2022-035320-I, y es parte del proyecto TED2021- 130937A-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/ 501100011033 y por la Unión Europea “Next GenerationEU” /PRTR .

6. REFERENCIAS

Ivits, E., Cherlet, M., Mehl, W., & Sommer, S. (2009). Estimating the ecological status and change of riparian zones in Andalusia assessed by multi-temporal AVHHR datasets. E*cological Indicators, 9*(3), 422–431.

Merritt, D. M., Scott, M. L., Poff, N. L., Auble, G. T., & Lytle, D. A. (2010). Theory and tools for determining environmental flows for riparian vegetation. *Freshwater Biology, 55*(1), 206–225.

Meztger, G., González del Tánago, M., De Stefano, L. Environmental flows and the mitigation of hydrological alteration downstream from dams: The Spanish case. *Journal of Hydrology, 598* (2021).

Wu, C., Webb, J. A., & Stewardson, M. J. (2022). Modelling Impacts of Environmental Water on Vegetation of a Semi-Arid Floodplain–Lakes System Using 30-Year Landsat Data. *Remote Sensing, 14*(3), 708.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.154

El proyecto DESPISTE como fuente de información para la evaluación de la presión de las piscinas de uso privado sobre masas de agua subterránea

Gómez Enri, Jesús [1] **Pérez Cayeiro, María Luisa** [1] **Arcila Garrido, Manuel** [1] **Chica Ruíz, Juan Adolfo** [1] **Mañanes Salinas, Rafael** [1] **Román-Cascón, Carlos** [1] **Tejedor Álvarez, Begoña** [1] **Barragán Sánchez, Jesús** [2] **Moreno Camacho, Juan** [3]

[1] Universidad de Cádiz, España

[2] Ayuntamiento de Chiclana de la Frontera

[3] Ayuntamiento de Conil de la Frontera

ORCID: Gómez Enri 0000-0001-6053-5160 Pérez Cayeiro 0000-0001-9652-1342 Arcila Garrido 0000-0002-9724-3767 Chica Ruíz 0000-0001-7215-4015 Mañanes Salinas 0000-0003-1987-478X Román-Cascón 0000-0003-4724-8102 Tejedor Álvarez 0000-0002-3022-8095 Barragán Sánchez 0000-0002-0498-7821

Correspondencia: jesus.gomez@uca.es isa.perez@uca.es manuel.arcila@uca.es adolfo.chica@uca.es rafael.salinas@uca.es carlos.roman@uca.es begonia.tejedor@uca.es jbarraga@chiclananatural.com juan.moreno.camacho@conil.org

RESUMEN

La gestión municipal del territorio necesita contar con información diversa de calidad y actualizada, que ayude a sus responsables a la toma correcta de decisiones. La gestión de los recursos hídricos supone uno de los grandes retos a nivel municipal, especialmente en municipios costeros con una fuerte actividad turística, principalmente durante la época estival. La Teledetección es una herramienta muy eficaz a la hora de suministrar información de gran calidad a distintas escalas tanto espaciales como temporales. Dicha información se puede complementar con otras fuentes de datos disponibles en abierto. En este trabajo presentamos una metodología para la detección de piscinas de uso privado en dos municipios de la vertiente atlántica de la provincia de Cádiz: Chiclana de la Frontera y Conil de la Frontera. A partir del análisis de imágenes ópticas de gran resolución espacial (25 cm de tamaño de píxel), obtenidas en junio/julio de 2022 en el marco de los vuelos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, junto con información disponible en el catastro, se ha encontrado que el 40% de las piscinas detectadas en Chiclana de la Fra. no están registradas en el catastro, mientras que en el caso de Conil de la Fra. este porcentaje se reduce al 26%. Aunque la superficie de Chiclana de la Fra. es 2,3 veces superior, el número de piscinas no registradas en el catastro es 5 veces superior a las detectadas en Conil de la Fra. Esto se refleja en la densidad de piscinas por km2 (tanto registradas como no registradas en el catastro). Con la información generada a partir de datos procedentes de repositorios de carácter gratuito, ambos municipios podrán contar con información útil para una mejor gestión de sus recursos hídricos, especialmente en periodos de fuertes sequías.

Palabras clave: *Teledetección, planificación urbanística, piscinas, recursos hídricos*

Fecha de recepción: 13 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 13 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

El proyecto DESPISTE como fuente de información para la evaluación de la presión de las piscinas de uso privado sobre masas de agua subterránea

Gómez Enri, Jesús [(1)], Pérez Cayeiro, María Luisa [(1)], Arcila Garrido, Manuel [(1)], Chica Ruíz, Juan Adolfo [(1)], Mañanes Salinas, Rafael [(1)], Román-Cascón, Carlos [(1)], Tejedor Álvarez, Begoña [(1)], Barragán Sánchez, Jesús [(2)], Moreno Camacho, Juan [(3)]

[(1)] Universidad de Cádiz, España.

0000-0001-6053-5160, jesus.gomez@uca.es ; 0000-0001-9652-1342, isa.perez@uca.es

0000-0002-9724-3767, manuel.arcila@uca.es ; 0000-0001-7215-4015, adolfo.chica@uca.es

0000-0003-1987-478X, rafael.salinas@uca.es ; 0000-0003-4724-8102, carlos.roman@uca.es

0000-0002-3022-8095, begonia.tejedor@uca.es

[(2)] Ayuntamiento de Chiclana de la Frontera, Cádiz, España.

0000-0002-0498-7821, jbarraga@chiclananatural.com

[(3)] Ayuntamiento de Conil de la Frontera Cádiz, España.

juan.moreno.camacho@conil.org

Resumen: La gestión municipal del territorio necesita contar con información diversa de calidad y actualizada, que ayude a sus responsables a la toma correcta de decisiones. La gestión de los recursos hídricos supone uno de los grandes retos a nivel municipal, especialmente en municipios costeros con una fuerte actividad turística, principalmente durante la época estival. La Teledetección es una herramienta muy eficaz a la hora de suministrar información de gran calidad a distintas escalas tanto espaciales como temporales. Dicha información se puede complementar con otras fuentes de datos disponibles en abierto. En este trabajo presentamos una metodología para la detección de piscinas de uso privado en dos municipios de la vertiente atlántica de la provincia de Cádiz: Chiclana de la Frontera y Conil de la Frontera. A partir del análisis de imágenes ópticas de gran resolución espacial (25 cm de tamaño de píxel), obtenidas en junio/julio de 2022 en el marco de los vuelos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, junto con información disponible en el catastro, se ha encontrado que el 40% de las piscinas detectadas en Chiclana de la Fra. no están registradas en el catastro, mientras que en el caso de Conil de la Fra. este porcentaje se reduce al 26%. Aunque la superficie de Chiclana de la Fra. es 2,3 veces superior, el número de piscinas no registradas en el catastro es 5 veces superior a las detectadas en Conil de la Fra. Esto se refleja en la densidad de piscinas por km^2 (tanto registradas como no registradas en el catastro). Con la información generada a partir de datos procedentes de repositorios de carácter gratuito, ambos municipios podrán contar con información útil para una mejor gestión de sus recursos hídricos, especialmente en periodos de fuertes sequías.

Palabras clave: Teledetección, planificación urbanística, piscinas, recursos hídricos.

The DESPISTE project as a source of information for the assessment of the pressure on groundwater bodies from private swimming pools

***Abstract**: The local land management requires access to high-quality and updated information to help managers make the best decisions. Water resource management is one of the major challenges at the municipal level, especially in coastal municipalities with significant tourism activity, primarily (but not exclusively) during the summer months. Remote Sensing is a highly effective tool for providing high-quality information at various spatial and temporal scales. This information can be complemented with other free data sources. In this paper, we present a methodology for detecting privately owned swimming pools in two municipalities on the Atlantic coast of the province of Cadiz: Chiclana de la Frontera and Conil de la Frontera. Based on the analysis of high spatial resolution optical images (25 cm pixel size) obtained in June/July 2022 as part of the National Aerial Orthophotography Plan flights, along with information available in the cadastral registry, we found that 40% of the swimming pools detected in Chiclana de la Fra. are not registered in the cadastral registry, while in the case of Conil de la Fra. this percentage is*

reduced to 26%. Although the area of Chiclana de la Fra. is 2.3 times larger than Conil, the number of swimming pools not registered in the cadastral registry is 5 times higher in Chiclana de la Fra. This is also reflected in the density per km² of swimming pools (both registered and unregistered). With the information generated from data from free repositories, both municipalities will have access to useful information for better management of their water resources, especially during periods of severe droughts.

***Keywords**: Remote Sensing, urban planification, swimming pools, water resources*

1. INTRODUCCIÓN

La frecuencia, intensidad y duración de las olas de calor y la creciente duración de los periodos de sequía, debido principalmente a los efectos del cambio climático han aumentado de manera significativa en muchas regiones mediterráneas. La provincia de Cádiz no es ajena a los efectos que provoca una menor precipitación durante el año hidrológico que, junto con una mayor presión por el incremento del turismo residencial y el aumento de la población en algunos municipios, sobre todo costeros, hace que el agua sea cada vez más escasa como recurso básico y, por lo tanto, más difícil de gestionar. A esta problemática se enfrentan los ayuntamientos de los municipios objeto de estudio: Chiclana de la Frontera y Conil de la Frontera, ambos situados en la vertiente atlántica de la provincia de Cádiz (Figura 1). El número de piscinas de uso privado en ambas localidades ha aumentado significativamente en los últimos años, pero se desconoce el número real y cómo ha sido su evolución reciente. Esta circunstancia provoca una presión añadida al recurso agua, tanto en lo que respecta a la red de abastecimiento como a la explotación del acuífero, lo que dificulta aún más la gestión hídrica que tienen que realizar los municipios. A esto se añade el suministro extra para evitar la pérdida por evaporación de agua que se produce en las piscinas (Hof *et al*., 2018).

El proyecto DESPISTE: *DEtección y eStudio de PIScinas mediante técnicas y herramientas de TEledetección en municipios turísticos costeros de la provincia de Cádiz*, ha comenzado a ejecutarse en septiembre de 2025, con una duración de 2 años. El objetivo principal es aplicar herramientas y técnicas de Teledetección de bajo coste para la identificación y caracterización de piscinas de uso privado, con el fin de mejorar el conocimiento en esta materia y favorecer la gestión de los recursos hídricos.

En este trabajo se muestran los resultados preliminares obtenidos en los tres primeros meses de ejecución. Concretamente, se analizará la información generada sobre el número total de piscinas de uso privado en ambos municipios a fecha julio de 2022, diferenciando entre aquéllas que se encuentran registradas en el catastro y las que no lo están. Los datos utilizados para esta investigación se han recopilado exclusivamente de fuentes públicas y accesibles.

2. ZONA DE ESTUDIO

El trabajo se centra en dos municipios costeros de la provincia de Cádiz: Chiclana de la Fra. y Conil de la Fra. (Figura 1); ambos tienen el turismo como uno de los principales motores de sus respectivas economías. En este sentido, las segundas residencias en las cercanías de sus respectivas playas son un foco de atracción que conlleva una alta densidad de población, especialmente en los meses de verano. Según el Instituto Nacional de Estadística, Chiclana de la Fra. cuenta con 90864 habitantes (revisión del padrón municipal de 2025), mientras que Conil de la Fra. cuenta con 24102 habitantes.

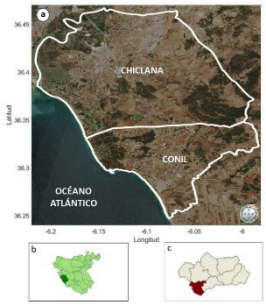


Figura 1. *Zona de estudio (1.a): Chiclana de la Frontera y Conil de la Frontera, situados en la vertiente atlántica de la provincia de Cádiz (1.b), Andalucía (1.c).*

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Imágenes del PNOA

Las imágenes usadas en este trabajo se descargaron de la página web del PNOA (https://pnoa.ign.es/). Las imágenes tienen una resolución espacial de 25 cm (tamaño de píxel) y tienen formato GeoTIFF. De los productos que ofrece el PNOA, se han usado las ortofotos de Máxima Actualidad, que se corresponden con los mosaicos de ortofotos definitivas más recientes disponibles en la página web, realizadas en la zona de estudio durante junio y julio de 2022. En la página web del PNOA se proporcionan las especificaciones técnicas de las ortofotos usadas. La descarga es libre y gratuita, bajo licencia CC-BY 4.0.

3.2. Información catastral

Para reducir parte de la incertidumbre asociada a la metodología de detección automática de piscinas (sección 3.3), se ha utilizado la información catastral de ambos términos municipales a fecha de julio de 2022. Se ha empleado la información de las parcelas existentes (rústicas y urbanas) y el tipo de construcción en cada parcela. Dentro de cada parcela, el término 'PI' hace referencia a la existencia de una piscina. Esto ha permitido añadir piscinas que el procedimiento descrito no había podido aislar y también eliminar falsos positivos.

La información catastral se puede descargar de manera gratuita en: https://www.sedecatastro.gob.es/.

3.3. Metodología

El procedimiento seguido se basa en la detección automática de piscinas utilizando imágenes ópticas de alta resolución espacial. Se ha desarrollado un algoritmo de detección de piscinas que combina dos bandas RGB (rojo y azul) de la imagen, generándose una imagen binaria en la que cada píxel tiene un nivel digital igual a 0 (si no pertenece a la piscina) o 1 (si forma parte de ella). Posteriormente, se ha aplicado una técnica de umbralización y segmentación para eliminar falsos positivos y se ha recurrido a la información procedente del catastro para completar las detecciones, añadiendo las piscinas registradas en el catastro que no han sido detectadas por el algoritmo. A continuación, se describe brevemente la metodología seguida.

3.3.1. Creación de sub-imágenes

Se descargaron las ortofotos del PNOA que cubrían ambos términos municipales y un *shapefile* con los límites del término municipal de cada municipio, del Centro de Descargas del CNIG (IGN): https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/home. El siguiente paso consistió en la unión de las ortofotos con el objetivo de tener una sola imagen con la que poder crear subimágenes de pequeño e igual tamaño, para que pudieran ser procesadas. Posteriormente, se eliminó toda la información que no estuviese dentro del término municipal y posteriormente se crearon las sub-imágenes con una superficie de 0.5 x 0.5 km^2, las cuales se guardaron en formato GeoTIFF. Estos pasos se muestran en la Figura 2, tomando como ejemplo el término municipal de Chiclana de la Fra.

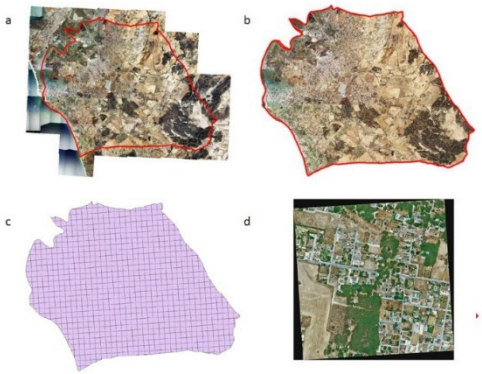


Figura 2. *Fases del pre-procesamiento de imágenes ópticas: conjunto de imágenes que abarcan el término municipal de Chiclana de la Fra. (2.a), eliminación de información que se encuentre fuera de los límites del municipio (2.b), selección del tamaño de cuadrícula (2.c) y generación de las sub-imágenes.*

3.3.2. Índice de Diferencia Normalizada de Piscinas (NDSPI)

El siguiente paso consistió en utilizar un índice que permitiese diferenciar las piscinas del resto de usos del terreno. Se usó el Índice de Diferencia Normalizada de Piscinas (NDSPI por sus siglas en inglés), obtenido a partir del estudio realizado por Rodríguez-Cuenca y Alonso (2014). Se fundamenta en que las piscinas poseen una signatura espectral diferente a otros cuerpos de agua, debido a sus propiedades y al color que poseen. En el trabajo mencionado, identifican la mayor reflectancia en el color azul y menor en el rojo. De esta forma, se crea el NDSPI siguiendo (Eq. 1):

$$NDSPI = \frac{\text{ND_azul} - \text{ND_rojo}}{\text{ND_azul} + \text{ND_rojo}} \quad (1)$$

donde *ND_azul* y *ND_rojo* son los niveles digitales en la imagen GeoTIFF, relacionados con la reflectancia de la superficie correspondiente a las longitudes de onda del color azul y rojo, respectivamente.

3.3.3. Umbralización

A la imagen creada con el índice NDSPI se le aplicó un umbral para retener sólo aquellos píxeles con alta probabilidad de pertenecer a una piscina. La discriminación se hizo empleando un umbral mediante el método descrito en Otsu (1979). Este paso crea una imagen binarizada (cada píxel tendrá un nivel digital igual a 0 ó 1). Posteriormente, se eliminaron falsos positivos discriminando por tamaño las detecciones. Se consideraron detecciones válidas aquellas que tuviesen un ancho superior a 1.2 m y un largo inferior a 45 m. Finalmente, las detecciones obtenidas se compararon con la información suministrada por el catastro.

4. RESULTADOS

En primer lugar, se realizó una validación del procedimiento de detección de piscinas. Para ello, se llevó a cabo una inspección visual de las detecciones encontradas sobre el 10% de las imágenes (30) de Chiclana de la Fra. De las 1136 piscinas registradas en el catastro, el 83% (948) fueron detectadas. Del 17% restante, el 54% se corresponde con piscinas indetectables por diversos motivos: piscinas abandonadas, situadas dentro de una vivienda, tapadas por arbolado, etc., mientras que el resto (46%) son piscinas que el procedimiento no fue capaz de detectar. De las detecciones no registradas en el catastro, la inspección visual determinó que el 97% correspondían a piscinas y sólo un 3% fueron consideradas falsas detecciones. Estos resultados demuestran que el procedimiento seguido es bastante eficaz detectando piscinas.

La Tabla 1 muestra información sobre el nº total de piscinas detectadas (registradas y no registradas en el catastro). El nº total de piscinas es tres veces mayor en Chiclana de la Fra., mientras que el nº de piscinas no registradas en el catastro es 5 veces superior. Considerando la superficie de ambos términos municipales, la densidad de piscinas por km^2 es de 73,95 piscinas/km^2 (Chiclana de la Fra.) y 52,77 piscinas/km^2 (Conil de la Fra.). Si se tiene en cuenta únicamente la superficie en la que existen piscinas, la densidad sube a 172,98 piscinas/km^2 (Chiclana de la Fra.) y 92,59 piscinas/km^2 (Conil de la Fra.). Esto implica que en julio de 2022 la presión sobre el recurso agua debido a la existencia de piscinas (tanto registradas como no registradas en el catastro), era casi el doble en Chiclana de la Fra., respecto a Conil de la Fra.

Tabla 1. Información sobre la superficie, nº total de piscinas detectadas y nº de piscinas detectadas que no aparecen registradas en el catastro.

Municipio	Superficie (km^2)	Nº total de piscinas	Nº de piscinas no registradas
Chiclana	207	15309	6114 (40%)
Conil	88,61	4676	1209 (26%)

La Figura 3 muestra la distribución del número total de piscinas detectadas en ambos municipios para cada sub-imagen analizada. En Chiclana de la Fra. se observa un número mayor de sub-imágenes con una alta densidad de piscinas (>100). En algunos casos, se llega incluso a superar las 180/190 piscinas en una superficie de 0,25 km^2, correspondiente al área de cada sub-imagen (equivalente a 25 ha). La mayor concentración se observa para el caso de Chiclana de la Fra., en las zonas conocidas como *los Gallos (GA), el Marquesado (MA)* y parte de la playa de la *Barrosa*. En Conil de la Fra., esta alta concentración se observa en la urbanización *Roche (RO)*.

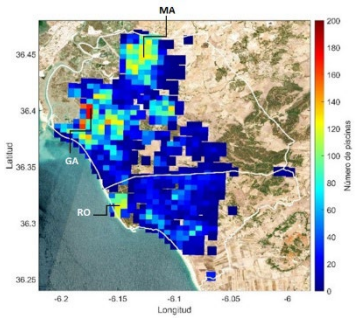


Figura 3. *Número total de piscinas detectadas en cada sub-imagen de 0,5 km x 0,5 km en ambos municipios*. MA: el Marquesado; GA: los Gallos; RO: Roche.

La Figura 4 muestra la distribución del número de piscinas detectadas que no se encuentran registradas en el catastro. En ambos municipios se constata una alta densidad de piscinas no registradas, especialmente en aquellas sub-imágenes con una alta densidad de piscinas detectadas (Figura 3). En el caso de Conil de la Fra., el número de piscinas no registradas en el catastro es superior a 50 en zonas muy concretas del municipio, mientras que, en el caso de Chiclana de la Fra., existe una mayor distribución a lo largo de buena parte del municipio donde se detectaron piscinas.

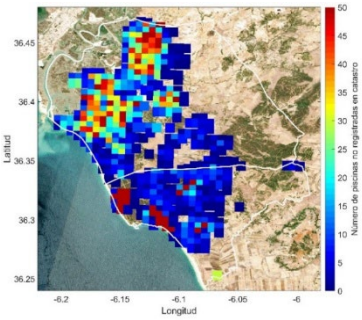


Figura 4. *Número de piscinas detectadas que no están registradas en el catastro (ambos municipios)*.

5. CONCLUSIONES

En el marco del proyecto DESPISTE se ha analizado la distribución de piscinas de uso privado en dos municipios de la provincia de Cádiz: Chiclana de la Fra. y Conil de la Fra. Para ello, se han usado las imágenes ópticas del vuelo realizado por el PNOA durante junio/julio de 2022. La información suministrada por el catastro ha permitido mejorar el procedimiento de detección de piscinas y determinar el número de piscinas que no estaban registradas en el catastro en la fecha de toma de las imágenes. De los resultados obtenidos se pueden extraer algunas conclusiones preliminares.

El número de piscinas identificadas es tres veces superior en Chiclana de la Fra., lo cual tiene sentido si se considera que tiene una superficie 2,3 veces superior a Conil de la Fra. Por otra parte, el número de piscinas no registradas en el catastro es 5 veces superior en Chiclana de la Fra. (el 40% de las piscinas detectadas en este municipio no están registradas en el catastro, mientras que en el caso de Conil de la Fra. este porcentaje se reduce al 26%). A esto debemos sumar que la densidad de piscinas por km^2 no registradas en el catastro es prácticamente el doble en Chiclana. Por lo tanto, en el año de estudio existía una fuerte presión del recurso agua en ambas localidades por el uso de piscinas (especialmente durante la época estival), pero dicha presión ha demostrado ser mayor en Chiclana de la Fra. En un trabajo futuro se compararán estos resultados con lo obtenidos en 2019 y 2025, para poder analizar la tendencia en el número de piscinas de uso privado, construidas en ambos municipios durante los últimos años.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del Proyecto DESPISTE (FEDER-UCA-2024-A2-11), financiado por el Programa Operativo FEDER Andalucía 2021-2027, y por la Consejería de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía. Las imágenes ópticas fueron obtenidas del repositorio del PNOA bajo licencia CC-BY 4.0. La información catastral ha sido suministrada por el Ministerio de Hacienda, Dirección General del Catastro.

7. REFERENCIAS

Hof A., Morán-Tejeda E., Lorenzo-Lacruz J. & Blázquez-Salom M. (2018). Swimming Pool Evaporative Water Loss and Water Use in the Balearic Islands (Spain). *Water. 10* (12):1883. https://doi.org/10.3390/w10121883.

Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, (9)*, 62–66. https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076.

Rodríguez-Cuenca, B., & Alonso, M. C. (2014). Semi-Automatic Detection of Swimming Pools from Aerial High-Resolution Images and LIDAR Data. *Remote Sensing (6)*, 2628-2646. https://doi.org/:10.3390/rs6042628.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.162

Iniciativa: Estimación de la Evapotranspiración en España

Andreu, Ana [1] **Bellvert, Joaquim** [2] **Burchard-Levine, Vicente** [3] **Cristóbal, Jordi** [4] **Garrido-Rubio, Jesús** [5] **González-Dugo, María P.** [6] **Gómez-Giraldez, Pedro** [7] **Nieto, Héctor** [8] **Sánchez, Juan Manuel** [9]

[1] DAUCO, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Córdoba, España

[2] Programa Uso Eficiente del Agua en Agricultura, IRTA, España

[3] Laboratorio de Espectro-radiometría y Teledetección Ambiental (SpecLab-IEGD-CSIC), España

[4] Departament de Geografía, Universitat Autònoma de Barcelona, España

[5] Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (IMDEA Agua), España

[6] Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA), España

[7] Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC), España

[8] Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC), España

[9] Grupo de Teledetección y SIG, Universidad de Castilla-La Mancha (TySIG-UCLM), España

ORCID: Andreu 0000-0001-8346-5417 Bellvert 0000-0002-9234-7110 Burchard-Levine 0000-0003-0222-8706 Cristóbal 0000-0001-6244-4289 Garrido-Rubio 0000-0002-1739-2616 González-Dugo 0000-0003-0423-8246 Gómez-Giraldez 0000-0002-1247-7557 Nieto 0000-0003-4250-6424 Sánchez 0000-0003-1027-9351

Correspondencia: z92anmea@uco.es Joaquim.Bellvert@irta.cat vburchard@ica.csic.es Jordi.Cristobal@uab.cat jesus.garrido@imdea.org mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es pedro.gomez@ebd.csic.es hector.nieto@ica.csic.es JuanManuel.Sanchez@uclm.es

RESUMEN

La evapotranspiración (ET) es una variable clave para la gestión del agua y la comprensión del funcionamiento del sistema suelo – vegetación – atmósfera, especialmente en regiones con una elevada variabilidad climática y fuertes presiones sobre los recursos hídricos. Aunque las medidas in situ son esenciales para el estudio de procesos y la validación de modelos, su representatividad espacial es limitada y su mantenimiento resulta costoso, lo que dificulta su extrapolación a escalas relevantes para la gestión. En este contexto, la teledetección se ha consolidado como una herramienta fundamental para la estimación distribuida y continua de la evapotranspiración real, permitiendo integrar información biofísica de la vegetación y de la temperatura de la superficie. Esta comunicación presenta una iniciativa de ámbito nacional, surgida en el XX Congreso de la AET 2024, orientada a estructurar y coordinar los esfuerzos en el seguimiento y evaluación de la ET en España, con un foco principal en productos basados en teledetección. Se presenta una síntesis preliminar de las medidas y los productos disponibles, identificando vacíos, solapamientos y oportunidades para evaluaciones conjuntas.

Palabras clave: *Balance de energía, balance de agua, teledetección, satélite*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Iniciativa: Estimación de la Evapotranspiración en España

Andreu, Ana [(1)], Bellvert, Joaquim [(2)], Burchard-Levine, Vicente [(3)], Cristóbal, Jordi [(4)], Garrido-Rubio, Jesús [(5)], González-Dugo, María P. [(6)], Gómez-Giraldez, Pedro [(7)], Nieto, Héctor [(8)], Sánchez, Juan Manuel [(9)]

[(1)] DAUCO, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Córdoba, España
0000-0001-8346-5417, z92anmea@uco.es.

[(2)] Programa Uso Eficiente del Agua en Agricultura, IRTA, España.
0000-0002-9234-7110, Joaquim.Bellvert@irta.cat.

[(3)] Laboratorio de Espectro-radiometría y Teledetección Ambiental (SpecLab-IEGD-CSIC), España.
0000-0003-0222-8706, vburchard@ica.csic.es.

[(4)] Departament de Geografía, Universitat Autònoma de Barcelona, España.
0000-0001-6244-4289, Jordi.Cristobal@uab.cat.

[(5)] Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (IMDEA Agua), España.
0000-0002-1739-2616, jesus.garrido@imdea.org.

[(6)] Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA), España.
0000-0003-0423-8246, mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es.

[(7)] Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC), España.
0000-0002-1247-7557, pedro.gomez@ebd.csic.es.

[(8)] Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC), España.
0000-0003-4250-6424, hector.nieto@ica.csic.es.

[(9)] Grupo de Teledetección y SIG, Universidad de Castilla-La Mancha (TySIG-UCLM), España.
0000-0003-1027-9351, JuanManuel.Sanchez@uclm.es.

Resumen: La evapotranspiración (ET) es una variable clave para la gestión del agua y la comprensión del funcionamiento del sistema suelo – vegetación – atmósfera, especialmente en regiones con una elevada variabilidad climática y fuertes presiones sobre los recursos hídricos. Aunque las medidas in situ son esenciales para el estudio de procesos y la validación de modelos, su representatividad espacial es limitada y su mantenimiento resulta costoso, lo que dificulta su extrapolación a escalas relevantes para la gestión. En este contexto, la teledetección se ha consolidado como una herramienta fundamental para la estimación distribuida y continua de la evapotranspiración real, permitiendo integrar información biofísica de la vegetación y de la temperatura de la superficie. Esta comunicación presenta una iniciativa de ámbito nacional, surgida en el XX Congreso de la AET 2024, orientada a estructurar y coordinar los esfuerzos en el seguimiento y evaluación de la ET en España, con un foco principal en productos basados en teledetección. Se presenta una síntesis preliminar de las medidas y los productos disponibles, identificando vacíos, solapamientos y oportunidades para evaluaciones conjuntas.

Palabras clave: Balance de energía, balance de agua, teledetección, satélite

Initiative on Evapotranspiration Estimation in Spain

***Abstract**: Evapotranspiration (ET) is a key variable for water management and for understanding soil – vegetation – atmosphere interactions, particularly in regions with high climatic variability and increasing water stress. While in situ measurements are essential for process understanding and model validation, their limited spatial representativeness and high maintenance costs constrain their application at management-relevant scales. In this context, remote sensing has become a fundamental tool for estimating actual evapotranspiration in a spatially distributed and temporally consistent manner, integrating vegetation biophysical properties and land surface temperature. This study presents a national initiative, launched during the XX AET 2024 Conference, to structure and coordinate shared efforts for evapotranspiration assessment in Spain, with a primary*

focus on remote-sensing-based ET products. We provide a preliminary synthesis of existing in situ measurements and available ET products, highlighting current gaps, overlaps, and opportunities for joint evaluation.

***Keywords**: Energy balance, water balance, remote sensing, satellite*

1. INTRODUCCIÓN

La gestión del agua a nivel nacional se enfrenta a un escenario de creciente complejidad, caracterizado por una elevada variabilidad climática, un aumento sostenido de la demanda y conflictos cada vez más frecuentes entre usos agrícolas, ambientales, urbanos e industriales. En este contexto, la evapotranspiración (ET) constituye una de las variables clave para comprender el funcionamiento del sistema suelo - vegetación - atmósfera, contribuyendo a la toma de decisiones en ámbitos tan diversos como la planificación del regadío, la gestión de sequías o la conservación de ecosistemas.

Tradicionalmente, hemos afrontado la variabilidad climática aumentando la oferta hídrica, fundamentalmente mediante el almacenamiento del recurso, lo que sitúa a España entre los países con mayor número de embalses a nivel mundial. Sin embargo, este paradigma está cambiando: ya no se puede incrementar la oferta, sino que es necesario gestionar el recurso disponible y los conflictos asociados. Este cambio de enfoque exige disponer de información sobre el uso y las necesidades hídricas de los ecosistemas que sea no solo fiable, sino también continua en el tiempo y representativa en el espacio.

Aunque la ET puede medirse en campo, su elevada heterogeneidad espacial y variabilidad temporal limitan la representatividad de las observaciones puntuales y dificultan su extrapolación a muchas de las escalas relevantes para la gestión. Además, el elevado coste de estos sistemas de medida limita su operatividad, pese a la aparición de aproximaciones de menor coste. Estas medidas son, sin embargo, imprescindibles para entender los procesos, simularlos y calibrar o validar modelos (CAL/VAL), siendo necesario disponer de series temporales largas que cubran una amplia variabilidad de condiciones ambientales y superficiales.

En este contexto, la teledetección se ha consolidado como una herramienta fundamental para la estimación de la ET real, al permitir obtener información espacialmente distribuida y consistente en el tiempo. Los enfoques basados en sensores remotos permiten integrar rasgos biofísicos de la vegetación con la temperatura de la superficie, lo que permite estimar tanto la transpiración de la vegetación como la evaporación del suelo.

Más allá de su aplicación directa en la gestión del agua, disponer de estimaciones de ET robustas y bien caracterizadas es clave para avanzar científicamente en el desarrollo de modelos hidrológicos más complejos, para mejorar los pronósticos estacionales, para analizar escenarios de cambio climático o para cuantificar la incertidumbre asociada tanto a las observaciones como al modelado.

Esta iniciativa surge de la identificación de estas necesidades, impulsada por una comunidad de investigadores y profesionales vinculados a la estimación de la ET, y se gesta inicialmente durante el XX Congreso de la AET en 2024. El **objetivo** es establecer un marco común a nivel nacional que permita estimar y evaluar conjuntamente la ET en distintos ecosistemas, escalas espaciales y contextos de uso, avanzando hacia el horizonte de disponer de información de ET “en todas partes y en todo momento” (“*everywhere, all the time*”, Baldocchi, 2014) y en las escalas necesarias, un desafío aún lejos de alcanzarse de forma efectiva.

Esta comunicación pretende presentar y dar estructura a esta iniciativa mediante los siguientes **objetivos específicos**: 1) revisar las metodologías y productos disponibles actualmente para la estimación de la ET mediante teledetección a nivel nacional; 2) revisar el estado actual de las localizaciones de medida de ET dentro del territorio español y su representatividad; y 3) iniciar un espacio de coordinación y reflexión (*think-tank*) que permita identificar necesidades y desafíos futuros, promoviendo la participación activa de la comunidad científica.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Hemos realizado una revisión de los productos de ET actualmente disponibles derivados de la teledetección, así como de las zonas de medida de ET existentes en el territorio español. Esta revisión se fundamenta en una búsqueda bibliográfica sistemática y en el contacto directo con los investigadores responsables. Con el fin de reforzar esta búsqueda y favorecer la coordinación de la comunidad, también hemos elaborado un formulario estructurado en torno a los tres objetivos específicos.

Para avanzar en el tercer objetivo, proponemos las siguientes acciones en el marco de la AET 2026: a) la presentación del formulario y de los resultados preliminares; b) la creación de un grupo de trabajo específico; c) la propuesta de un curso precongreso; d) la organización de un taller online orientado a la elaboración de un artículo de posición.

2.1. ¿Cómo, dónde y cuándo estimamos?

La estimación de la ET integrando datos remotos tiene una larga trayectoria (Rana y Katerji, 2000), y se han desarrollado numerosos modelos basados tanto en el balance hídrico del suelo (Carpintero *et al*., 2020; Garrido-Rubio *et al*., 2020) como en el balance energético superficial (González-Dugo *et al*., 2021; Burchard-Levine *et al*., 2022; Bozorgi *et al*., 2024). Cada uno de estos enfoques presenta ventajas y limitaciones relacionadas con la complejidad de la formulación, la disponibilidad y la resolución espacial de los datos de entrada, o con la frecuencia temporal de observación. Por ello, en los últimos años ha cobrado relevancia el desarrollo de productos de ET derivados de la fusión de

varias fuentes, que integran metodologías empíricas y mecanicistas, o de tipo *ensemble*, que además permiten evaluar la incertidumbre asociada a los modelos (Guzinski y Nieto, 2019; Sánchez *et al*., 2025).

2.2. ¿Cubren nuestras medidas en campo la variabilidad nacional?

La ET puede medirse en campo (Fig. 1) mediante diferentes tecnologías, en función de si se aborda el cierre del balance energético superficial (p. ej., torres de covarianza de torbellinos, escintilómetros) o del balance hídrico del suelo (p.ej., lisímetros), y con métodos fisiológicos (p. ej., flujo de savia) (Rana y Katerji, 2000). Cada una de estas metodologías presenta ventajas e inconvenientes, como las dificultades de escalado, la falta de cierre del balance energético o la procedencia de los flujos.

3. RESULTADOS

Se presenta el formulario para reforzar la búsqueda de aplicaciones, datos y contribuciones a la comunidad. Las referencias están en formato de hipervínculo por motivos de espacio en el documento.



Figura 1. Torres de covarianza de torbellinos en la Sierra de Cardeña y Montoro (izquierda) y en almendros, en Tarazona de la Mancha (derecha).

3.1. ¿Cómo, dónde y cuándo estimamos?

Hemos identificado diversos productos de ET basados en teledetección, actualmente disponibles para el territorio español, con resoluciones espaciales y temporales variables y basados en diferentes enfoques de modelado, siendo mayoritarios los modelos de balance energético (Tabla 1, sin incluir productos globales más extendidos como GLEAM, MODIS ET o FLUXCOM). Sin embargo, la disponibilidad de estos productos no es homogénea ni en el espacio ni en el tiempo.

Tabla 1. Productos disponibles. S-2 (Sentinel-2), S-3 (Sentinel-3), LTM (Landsat). CH (Confederación Hidrográfica). * Otras zonas y periodos a demanda

Modelo	Resolución y Período	Zona
TSEB	300m. Día, mes. 2018-2025	Península
TSEB-Copernicus Land Monitoring Service	300m. 10 días, casi real. 2025-	Global
ETLook-Copernicus Land Monitoring Service	300m. 10 días, casi real. 2025-	Global
TSEB	300m. Día 2000-2022	Doñana
TSEB	20m. Día, mes. S-2, S-3 y LTM. 2017-2024	CH Tajo*
TSEB	20m. ~15 días. S-2, S-3 y LTM. 2017-2025	CH Segre, Regadios en Aragón, Cataluña, Badajoz, Sevilla, Córdoba*
TSEB	20m. Casi real. S-2, S-3 y LTM. 2024-	Cataluña
TSEB	20m. Día. LTM, S-2, S-3. 2000-2024	Cuenca del Río Mundo
3SEB	0.05° Hora, dia, mes. MSG-SEVIRI 2012	Dehesa Península
3SEB	300m día, mes. S-3 2018-2024	Dehesa Península
3SEB	20m. Día, mes. S-2, S-3 y LTM. 2018-2024	Dehesa Cáceres
METRIC EEFLUX	30m. Día, mes. LTM 2021-2024*	Castilla-La Mancha y Acuífero de Arenales*
RS-SWB	30m. Mes. LTM. Mes, año. 2014-2015	Regadío Península
	10m. Mes, año. S-2. 2016-2017 2018	Regadío Península Regadío Nacional
	10m. Mes, año. S-2 2017 y 2020	Regadío CH Júcar
Kc-FAO	2023-2025	Cataluña

3.2. ¿Cubren nuestras medidas en campo la variabilidad nacional?

En una búsqueda preliminar, se ha identificado un amplio conjunto de localizaciones distribuidas por el territorio español (Tabla 2 y Tabla 2 extendida), que será necesario completar con la colaboración de toda la comunidad. Estas abarcan una diversidad relevante de ecosistemas y usos del suelo, propios del contexto español. No obstante, su distribución espaciotemporal es desigual, con vacíos relevantes en determinadas regiones, usos del suelo y periodos temporales, así como diferencias en la duración de las series disponibles.

Tabla 2. Zonas de medición de ET. Métodos: (TC) torre de covarianza de torbellinos, (LIS) lisímetro. * Huecos

Zona-Institución (Método, Periodo)
Cultivos leñosos
Tarazona Mancha-UCLM (TC, 2020-2025, 2023-2025); Las Tiesas-UCLM (TC, 2017-2019, 2014-2015); Córdoba-IAS (TC, 2007-2008); Lleida-IRTA (TC, 2017-2020, 2022-); Mollerussa-IRTA (LIS, 2002-, 2002-); Moncada-CEAM (TC, 2018-); Úbeda-UGR (TC, 2018-2019); Córdoba-IAS (TC, 1998-2000); La Orden-CICYTEX (LIS, 2018-); Madrid-iMiDRA (TC, 2022 y 2023)
Bosque
INDALO -UCO (TC, 2024-), -UJA (TC, 2024-); Mairena-UCO (TC, 2024-, 2024-); Quintos-CIFU (TC, ?, ?); El Saler-CEAM (TC, 1998-2008); Almodovar-UCLM (TC, 2010-2013, 2011-2013); Cuenca-UCLM (TC, 2011-, 2011-); Yestes-UCLM (TC, 2012-); Hellín-UCLM (TC, 2019-, 2014-); Manzanera-CITA (TC, 2023-); Sarrión-CITA (TC, 2023-); Fontmartina-UAB (TC, 2027-)

Zona-Institución (Método, Periodo)
Agroforestal
Cardeña-IFAPA (TC, 2012-*); Hinojosa-IFAPA (TC, 2023-2025); Majadas-CEAM (TC, 2003-); Majadas-JENA (TC, 2014-, 2014-); La Albuera-JENA (TC, 2016-); El Bonillo-UCLM (TC, ?); Conde-UGR (TC, 2014-2020); Guadiana-UGR (TC, 2014-); Doñana-CSIC (TC, 2011-)
Matorral
Lanjarón-UGR (TC, 2008-2009); Balsa Blanca-CSIC (TC, 2006-); Amoladeras-CSIC-UGR (TC, 2009-); Llano Juanes-UGR (TC, 2004-); Laguna Seca-UGR (TC, 2007-2009); Aguamarga-CSIC-UGR (TC, 2006-); Mallorca-UIB (TC, 2021); Monte Negro-CSIC (TC, 2012-); Monte Blanco-CSIC (TC, 2019-); Caroig-CEAM (TC, 2021-); Muela de Cortes-CEAM (TC, 2009-2018, 2009-2018); Quintos-CIFU (TC, ?, ?)
Marisma
Sueca-CEAM (TC, 2004-); Doñana-CSIC (TC, 2020-); Doñana-IGME (LIS, 2021-); Alfacada-UAB (TC, ?); Riet-Vell-UAB (TC, 2025); Padul-UGR (TC, 2012-); Fuente Duque-CSIC (TC, 2024-)
Pasto
Cardeña-IFAPA (TC, 2015-*); Pozoblanco-IFAPA (TC, 2020-); Majadas-CEAM (LIS, 2016-2018); Majadas-JENA (TC, 2014-)); Guadarrama-UCM (TC, ?); Vall d'Aliñá (TC, 2003-); Pirineo-UdL (TC, 2010-*, ?); Castellar-CTFC (TC, 2011-); La Bertolina-CTFC (TC, 2011-)
Cultivos herbáceos
Madrid-CENTER (LIS, ?); Oran-UCLM (TC, 2018-); Valle Ebro-? (TC, 1997, 1999; LIS, 1997, 1999); Las Tiesas-ITAP-UCLM (LIS, 2011-2016 múltiples); Vegas-CICYTEX (LIS, 2021-*)

4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

4.1. Conclusiones

Paralelamente a la presentación de la iniciativa Evapotranspiración Española, el objetivo de la comunicación es ofrecer una síntesis del estado actual de los productos de ET en nuestro territorio, así como de las zonas CAL/VAL disponibles. Queremos que sirva de eje para iniciar una discusión y reflexionar sobre las necesidades, limitaciones y desafíos a los que nos enfrentamos.

4.2. Próximos pasos

Uno de los principales retos como comunidad será definir hacia dónde queremos avanzar: ¿Hacia el desarrollo de un producto de ET que sirva de referencia a escala nacional? ¿Hacia la generación de estimaciones ET tipo *ensemble* que permitan integrar distintas metodologías y caracterizar la incertidumbre asociada?

Para avanzar en esta dirección, necesitaremos abordar desafíos relacionados con la continuidad y la calidad de las observaciones, como la dificultad para asegurar una financiación estable, la integración en redes internacionales con altos requisitos de estandarización, la necesidad de perfiles técnicos especializados o la incorporación de sensores de bajo coste, acompañados de estrategias adecuadas de calibración y validación.

Avanzar hacia el objetivo de una ET continua implica atender desafíos en materia de financiación, capacidad de computación y procesamiento de datos históricos para identificar puntos de inflexión de los sistemas, así como evaluar y facilitar la integración de la información en cadenas operativas que permitan su uso por parte de gestores, técnicos o responsables de la toma de decisiones.

5. AGRADECIMIENTOS

DRYAD-10.3030/101156076, TED2021-129814B-I00, PID2024-161881OB-C21, PID2024-161881OB-C22, PP.AVA23.INV202301.030 y PID2023-151124NB-I00.

6. REFERENCIAS

Baldocchi, D. (2014). Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—the state and future of the eddy covariance method. *Glob. Change Biol., 20*, pp. 3600-3609, https://doi.org/10.1111/gcb.12649

Bozorgi, M., Cristóbal, J., & Pàmies-Sans, M. (2024). Evaluating the Two-Source Energy Balance Model Using MODIS Data for Estimating Evapotranspiration Time Series on a Regional Scale. *Remote Sensing, 16*(23), 4587. https://doi.org/10.3390/rs16234587

Burchard-Levine, V., Nieto, H., Riaño, D., Kustas, W. P., Migliavacca, M., El-Madany, T. S., Nelson, J. A., Andreu, A., Carrara, A., Beringer, J., Baldocchi, D., & Martín, M. P. (2022). A remote sensing-based three-source energy balance model to improve global estimations of evapotranspiration in semi-arid tree-grass ecosystems. *Global Change Biology, 28*(4), 1493-1515, https://doi.org/10.1111/gcb.16002

Carpintero, E., Andreu, A., Gómez-Giráldez, P. J., Blázquez, Á., & González-Dugo, M. P. (2020). Remote-Sensing-Based Water Balance for Monitoring of Evapotranspiration and Water Stress of a Mediterranean Oak–Grass Savanna. *Water, 12*(5), 1418. https://doi.org/10.3390/w12051418

Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., Campos, I., Osann, A., González-Gómez, L., & Calera, A. (2020). Remote sensing–based soil water balance for irrigation water accounting at plot and water user association management scale. *Agricultural Water Management, 238*, 106236. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106236

González-Dugo, M. P., Chen, X., Andreu, A., Carpintero, E., Gómez-Giraldez, P. J., Carrara, A., y Su, Z. (2021). Long-term water stress and drought assessment of Mediterranean oak savanna vegetation using thermal remote sensing, Hydrol. *Earth Syst. Sci., 25*, 755–768, https://doi.org/10.5194/hess-25-755-2021

Guzinski, R., & Nieto, H. (2019). Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 and Sentinel-3 satellites for high-resolution evapotranspiration estimations. *Remote Sensing of Envi., 221*, 157-172. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.019

Rana, G., Katerji, N. (2000). Measurement and estimation of actual ET in the field under Mediterranean climate: a review. Vol 13, 2-3, pp. 125-153 https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8

Sánchez, J. M., Moya, A., Nieto, H., Sánchez-Virosta, Á., Galve, J. M., and González-Piqueras, J. (2025). Towards an ensemble of RS-based SEB models to constrain the uncertainty in daily ETc monitoring in nut orchards, EGU25-18779, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-18779

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.164

Análisis del efecto del cambio climático en la demanda hídrica futura de los cultivos en regadío en el Alto Guadiana mediante teledetección y proyecciones climáticas

Campoy, Jaime [1] **Sánchez, Juan Manuel** [1] **Beltrán, Antonio** [1] **Sánchez, David** [1] **Arellano, Irene** [1] **Molina-Medina, Antonio** [1] **González-Piqueras, José** [1] **Galve, Joan Miquel** [1] **Rodríguez, Esteban** [2] **Romero, Ramiro** [2] **Calera, Alfonso** [1]

[1] Grupo de Teledetección y SIG. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Universitario SN, 02071. Albacete (España).

[2] AEMET, C/ Leonardo Prieto Castro, 8, 28071 Madrid (España).

ORCID: Campoy 0000-0003-3356-5609 Sánchez 0000-0003-1027-9351 Beltrán 0009-0005-3666-9739 Molina-Medina 0000-0002-3706-2489 González-Piqueras 0000-0003-2226-5731 Galve 0000-0003-1066-7717 Rodríguez 0000-0002-9608-1751 Romero 0009-0007-0534-6712 Calera 0000-0003-4271-2439

Correspondencia: Jaime.Campoy@uclm.es JuanManuel.Sanchez@uclm.es Antonio.Beltran@uclm.es David.SanchezPerez@uclm.es Irene.Arellano@uclm.es AntonioJesus.Molina@uclm.es Jose.Gonzalez@uclm.es JoanMiquel.Galve@uclm.es erodriguezg@aemet.es rromerof@aemet.es Alfonso.Calera@uclm.es

RESUMEN

El Alto Guadiana presenta una elevada presión sobre los recursos hídricos debido a la expansión del regadío y la sobreexplotación de los acuíferos, situación que podría agravarse por los efectos del cambio climático. Este trabajo estima la demanda hídrica futura de los principales cultivos de regadío de la zona para los periodos 2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100, bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del IPCC. Para ello, se emplea el modelo de balance diario de agua en el suelo explorado por las raíces descrito en el manual de FAO 56 y asistido por teledetección, que integra las proyecciones climáticas regionalizadas por AEMET junto con coeficientes de cultivo derivados de las series temporales de imágenes de NDVI de satélite. Los resultados indican un incremento progresivo de la evapotranspiración de los cultivos y de las necesidades de agua de riego neto para los periodos futuros considerados. La metodología propuesta constituye una herramienta robusta para apoyar la planificación hidrológica y la gestión sostenible del regadío en un contexto de cambio climático.

Palabras clave: *Riego; Evapotranspiración del cultivo; Balance de Agua; NDVI; Satélite*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Análisis del efecto del cambio climático en la demanda hídrica futura de los cultivos en regadío en el Alto Guadiana mediante teledetección y proyecciones climáticas

Campoy, Jaime [1], Sánchez, Juan Manuel [1], Beltrán, Antonio [1], Sánchez, David [1], Arellano, Irene [1], Molina-Medina, Antonio [1], González-Piqueras, José [1], Galve, Joan Miquel [1], Rodríguez, Esteban [2], Romero, Ramiro [2], Calera, Alfonso [1]

[1] Grupo de Teledetección y SIG. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha.N. albacete (españa).

0000-0003-3356-5609, jaime.campoy@uclm.es ; 0000-0003-1027-9351, juanmanuel.sanchez@uclm.es. 0009-0005-3666-9739, antonio.beltran@uclm.es ; david.sanchezperez@uclm.es ; irene.arellano@uclm.es 0000-0002-3706-2489, antoniojesus.molina@uclm.es ; 0000-0003-2226-5731, jose.gonzalez@uclm.es 0000-0003-1066-7717, joanmiquel.galve@uclm.es ; 0000-0003-4271-2439, Alfonso.Calera@uclm.es.

[9] AEMET, 8 Madrid (España).

0000-0002-9608-1751, erodriguezg@aemet.es ; 0009-0007-0534-6712, rromerof@aemet.es.

Resumen: El Alto Guadiana presenta una elevada presión sobre los recursos hídricos debido a la expansión del regadío y la sobreexplotación de los acuíferos, situación que podría agravarse por los efectos del cambio climático. Este trabajo estima la demanda hídrica futura de los principales cultivos de regadío de la zona para los periodos 2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100, bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del IPCC. Para ello, se emplea el modelo de balance diario de agua en el suelo explorado por las raíces descrito en el manual de FAO 56 y asistido por teledetección, que integra las proyecciones climáticas regionalizadas por AEMET junto con coeficientes de cultivo derivados de las series temporales de imágenes de NDVI de satélite. Los resultados indican un incremento progresivo de la evapotranspiración de los cultivos y de las necesidades de agua de riego neto para los periodos futuros considerados. La metodología propuesta constituye una herramienta robusta para apoyar la planificación hidrológica y la gestión sostenible del regadío en un contexto de cambio climático.

Palabras clave: Riego; Evapotranspiración del cultivo; Balance de Agua; NDVI; Satélite

Analysis of the impact of climate change on the future water demand of irrigated crops in the Upper Guadiana using Remote Sensing and climate projections

***Abstract**: The Upper Guadiana region is under high pressure on water resources due to the expansion of irrigated agriculture and the overexploitation of the aquifers, a situation that could be further aggravated by the impacts of climate change. This study estimates the future water demand of the main irrigated crops in the area for the periods 2021-2050, 2041-2070 and 2071-2100 under the IPCC SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios. For this purpose, the daily soil water balance model described in the FAO 56 manual using a remote sensing-based approach is applied, integrating climate projections regionalized by AEMET together with crop coefficients derived from satellite NDVI time series. The results indicate a progressive increase in crop evapotranspiration and net irrigation water requirements for the future periods considered. The proposed methodology provides a robust tool to support hydrological planning and sustainable management of irrigated agriculture in a climate change context.*

***Keywords**: Irrigation; Crop evapotranspiration; Soil water balance; NDVI; Satellite*

1. INTRODUCCIÓN

La zona del Alto Guadiana constituye una de las áreas más complejas desde el punto de vista de la gestión de los recursos hídricos de la Península Ibérica. Se trata de un territorio de carácter semiárido en el que la agricultura de regadío ha experimentado un notable desarrollo durante las últimas décadas, convirtiéndose en un pilar fundamental de la economía regional. Este proceso ha ido acompañado de una fuerte dependencia de los recursos hídricos subterráneos, lo que ha dado lugar a situaciones prolongadas de sobreexplotación de

los acuíferos y a un acusado deterioro de los ecosistemas asociados, especialmente de los humedales de alto valor ambiental.

A esta problemática se suma el impacto del cambio climático, que introduce un factor adicional de incertidumbre en la disponibilidad futura de los recursos hídricos. Las proyecciones climáticas más recientes apuntan a un incremento progresivo de la temperatura y de la demanda evaporativa de la atmósfera, así como a cambios en los patrones de precipitación caracterizados por una mayor irregularidad temporal y espacial. Estas alteraciones conllevan un aumento significativo de las necesidades hídricas de los cultivos, incrementando la presión sobre unos recursos hídricos ya limitados.

En este escenario, el conocimiento de la futura demanda hídrica de los cultivos de regadío en el Alto Guadiana adquiere una relevancia estratégica. Esta información permitirá gestionar de manera más eficiente los recursos hídricos disponibles en la zona, facilitando el desarrollo de escenarios de adaptación al cambio climático basados en la mejora de la eficiencia en el uso del agua y cambios en los usos del suelo.

El objetivo principal de este trabajo es utilizar la descripción del ciclo de crecimiento desde las series temporales de imágenes de satélite para mejorar la estimación de la futura demanda hídrica de los principales cultivos en regadío de la zona del Alto Guadiana para diferentes periodos futuros (2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100), considerando los efectos del cambio climático. Para ello, se emplean las proyecciones de los 11 modelos climáticos globales regionalizados por AEMET basadas en los escenarios integrados SSP-RCP desarrollados en el marco del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC. En concreto, se analizan dos escenarios futuros: SSP2-4.5, que representa un escenario intermedio con políticas moderadas de mitigación y adaptación, y SSP5-8.5, que refleja un futuro con altas emisiones asociado al uso intensivo de combustibles fósiles.

La metodología aplicada para estimar la demanda hídrica de los cultivos es el modelo de balance diario de agua en el suelo explorado por las raíces descrito en el manual de FAO 56 (Allen *et al*., 1998) y asistido por teledetección. Este enfoque integra como datos de entrada los valores diarios de precipitación y evapotranspiración de referencia (ETo) derivados de los modelos climáticos, junto con un nuevo procedimiento que obtiene las curvas patrón que describen el ciclo de crecimiento de los cultivos a partir de series temporales de imágenes multiespectrales de satélite.

Los resultados obtenidos permitirán anticipar el impacto del cambio climático sobre el consumo de agua en los cultivos de regadío, proporcionado una herramienta robusta y operativa que respalde la planificación hidrológica y la adaptación del sector agrícola a escenarios futuros. Además, la información derivada de la metodología propuesta resulta de gran utilidad para el desarrollo de estrategias que garanticen un uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos a largo plazo en un contexto de cambio climático.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

El presente trabajo se centra en la zona del Alto Guadiana, localizada en el centro-sur de la Península Ibérica, ver Figura 1. La zona abarca las provincias de Ciudad Real, Albacete, Toledo y Cuenca, dentro de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana, y presenta un clima mediterráneo-continental con una precipitación media en torno a los 400 mm/año. En la Tabla 1 se presentan los cultivos principales de regadío que se han determinado en función de la superficie que ocupan en la zona de estudio.

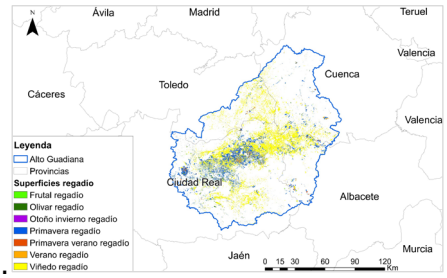


Figura 1. Mapa de cultivos regados en el Alto Guadiana.

Tabla 1. Cultivos principales de regadío, superficie dedicada a cada uno de ellos y su porcentaje correspondiente.

Cultivos principales	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Cereal primavera	61133	21.4
Ajo	9077	3.2
Adormidera guisante	4527	1.6
Otros cultivos primavera	4176	1.5
Cebolla	3523	1.2
Melón/sandía	7326	2.6
Otros cultivos verano	6190	2.2
Alfalfa	385	0.1
Doble cosecha	591	0.2
Viña vinificación	150591	52.7
Olivo	20311	7.1
Frutal cáscara	18063	6.3

2.2. Balance de agua asistido por teledetección

La estimación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) y las necesidades de agua de riego neto se realiza mediante el modelo de balance diario de agua en el suelo explorado por las raíces descrito en el manual de FAO 56 y asistido por teledetección. Este modelo calcula las variaciones diarias del contenido de agua en el suelo considerando las entradas (precipitación, riego, ascenso capilar) y salidas (ETc, percolación profunda, escorrentía) en el sistema. El modelo estima la ETc mediante la metodología denominada Coeficiente de Cultivo-Evapotranspiración de Referencia Kc-ETo, que se describe detalladamente en el manual FAO 56 (Allen *et al*., 1998). El modelo aplica el enfoque del coeficiente dual del cultivo, que determina por separado los efectos de la transpiración del cultivo y de la evaporación en el suelo. La metodología propuesta integra el coeficiente basal de cultivo (K_{cb}) derivado de la serie temporal de imágenes NDVI en el modelo diario de balance de agua en el suelo (Campoy *et al*., 2023).

2.3. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos requeridos en el balance de agua son la precipitación y la evapotranspiración de referencia (ETo) a escala diaria. Para el periodo observado, AEMET proporciona valores observacionales diarios de precipitación, temperatura máxima (Tmáx) y temperatura mínima (Tmín). Por otro lado, cada uno de los 11 modelos climáticos del sistema AR6 (ACCESS-CM2, CMCC-CM2-SR5, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3-Veg, IITM-ESM, KACE-1-0-G, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, NorESM2-MM, UKESM1-0-LL) aportan proyecciones diarias de precipitación, Tmáx y Tmín, tanto para el escenario histórico como para los escenarios futuros considerados (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Los valores diarios de ETo son calculados a partir de los valores de Tmáx y Tmín, y posteriormente son corregidos los sesgos mediante ajustes basados en los datos observacionales de ETo (Sánchez *et al*., 2025).

2.4. Patrones temporales para describir el crecimiento de los cultivos. Imágenes de satélite

Tradicionalmente la descripción del ciclo de crecimiento del cultivo ha descansado en el conocimiento de las fechas de siembra y cosecha de los diferentes cultivos (Gabr, 2023). Sobre la base de esta información de fechas de siembra y cosecha, el procedimiento usual para describir el crecimiento del cultivo suele ser el de dibujar una curva de evolución del coeficiente de cultivo, que sigue aquellas genéricas descritas en FAO 56 en muchos casos, lo que suele llevar a curvas teóricas que no acaban de reflejar las características reales del crecimiento de los cultivos, especialmente en cultivos como los leñosos.

Por ello, en este trabajo se propone describir el ciclo de crecimiento mediante series temporales de imágenes NDVI adquiridas por los satélites Sentinel 2 (S2A, S2B, S2C), que permiten caracterizar con precisión el patrón temporal del crecimiento de los cultivos. Los valores de NDVI utilizados se han obtenido a partir de imágenes correspondientes a los años 2022 y 2023, seleccionando únicamente aquellas imágenes libres de nubes, lo que permite representar de forma fiable el comportamiento reciente de los cultivos en la zona de estudio.

Las curvas patrón se obtienen para cada cultivo a partir del valor promedio del NDVI calculado sobre un conjunto representativo de parcelas regadas de la zona de estudio lo que permite caracterizar el comportamiento medio del cultivo, como se muestra en la Figura 2.

Los valores NDVI utilizados son valores normalizados, obtenidos al reescalar el valor $NDVI_{TOA}$ (*Top of the Atmosphere*) a los correspondientes a superficies consideradas invariantes (0.91 para vegetación densa como alfalfa y 0.15-0.20 suelo desnudo). La alta resolución espacial (10x10m) y la alta frecuencia (tiempo de revisita entre 2 y 5 días) de las imágenes NDVI, permiten describir con precisión el ciclo de crecimiento del cultivo. El valor de NDVI se interpola entre imágenes consecutivas para obtener valores diarios y se transforma en valor del coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) mediante una ecuación lineal robusta y ampliamente utilizada propuesta por Campos et al., (2010).

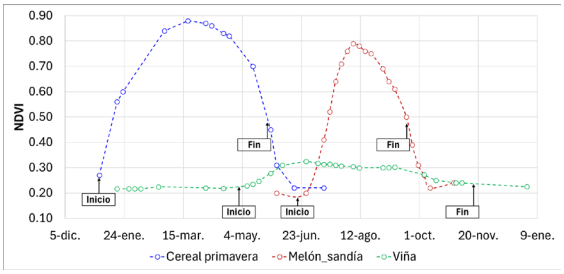


Figura 2. Curvas patrón del cereal de primavera, melón/sandía y viña de la zona de estudio, indicando el inicio y el final del ciclo de crecimiento de cada cultivo analizado.

2.5. Procedimiento de cálculo

El balance de agua utiliza como inputs los valores diarios de la precipitación y ETo para el periodo observado y para cada uno de los 11 modelos de proyecciones climáticas del sistema AR6 para el escenario histórico y para los dos escenarios futuros considerados (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). A estos inputs se unen las curvas patrón de los ciclos de crecimiento de los principales cultivos de regadío de la zona de estudio obtenidas a partir de series temporales de imágenes NDVI de satélite, que determinan la métrica temporal en la que el cultivo se desarrolla.

Las demandas de agua del cultivo (ETc) y el riego neto (mensual y anual) se estiman durante el ciclo de crecimiento del cultivo para cada uno de los 11 modelos en el escenario histórico, obteniendo los promedios correspondientes al período de control (1981-2010). Posteriormente, se realiza el mismo cálculo para los períodos futuros (2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100) en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. A continuación, se determina la señal de cambio, es decir, la variación porcentual de las proyecciones futuras en comparación con el período de control, para cada modelo, cultivo y escenario. Una vez obtenida la señal de cambio para cada cultivo y periodo, se calculan los valores absolutos de ETc y riego neto durante el ciclo de cultivo para los períodos futuros, aplicando la señal de cambio a las estimaciones realizadas con los datos observados del período 1981-2010. Finalmente, se estima el volumen total de agua de riego neto requerido para cada uno de los periodos futuros, considerando la distribución actual de la superficie de los cultivos de regadío en la zona de estudio (ver Tabla 1).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presenta la ETc y el riego neto estimado para el cereal de primavera, melón/sandía y viña de la zona de estudio, para cada periodo futuro y para los escenarios considerados.

La Figura 3 muestra el volumen total de agua de riego neto requerido (hm^3) en la zona, considerando las superficies de los principales cultivos indicadas en la Tabla 1, calculado para el periodo observado y para los periodos futuros en los escenarios analizados.

Los resultados obtenidos muestran un incremento en el consumo hídrico de los cultivos de regadío en la zona de estudio para los periodos futuros analizados, en comparación con el periodo de control establecido (1981-2010). Aunque todos los cultivos presentan incrementos en la demanda hídrica, la magnitud del cambio no es homogénea y varía en función del cultivo, del escenario climático y del horizonte temporal considerado.

De esta manera, se estima un incremento promedio de la ETc del 7%, 9-11% y 11-21% para los periodos futuros 2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100, respectivamente, y en función de cada uno de los escenarios futuros considerados (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Asimismo, se estima un aumento en las necesidades de agua de riego neto de los cultivos del 11-15%, 16-23% y 23-42% para los mismos periodos futuros y escenarios analizados.

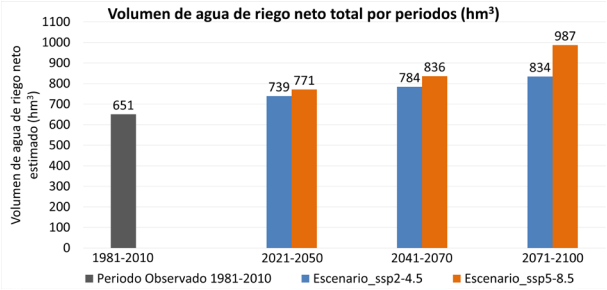


Figura 3. Volumen de agua de riego neto total requerido en la zona, en hm^3. La figura muestra los resultados calculados para el periodo observado y los periodos futuros con los escenarios considerados.

Tabla 2. ETc y riego neto (en mm) acumulados durante el ciclo de crecimiento calculados para cereal de primavera, melón/sandía y viña, para cada periodo futuro considerado y para los dos escenarios futuros. Se representa el valor promedio y desviación estándar (entre paréntesis) de los modelos utilizados.

Cultivo	Periodo	ETc (mm)		Riego neto (mm)	
		SSP 2-4.5	SSP 5-8.5	SSP 2-4.5	SSP 5-8.5
Cereal primavera	2021-2050	425 (7)	428 (9)	245 (9)	259 (16)
	2041-2070	435 (9)	446 (11)	259 (10)	284 (14)
	2071-2100	448 (14)	494 (19)	279 (17)	344 (25)
Melón sandía	2021-2050	527 (9)	534 (10)	481 (15)	491 (12)
	2041-2070	540 (12)	556 (11)	498 (17)	515 (14)
	2071-2100	553 (12)	598 (19)	515 (14)	562 (22)
Viña vinificación	2021-2050	382 (5)	381 (7)	175 (12)	182 (10)
	2041-2070	384 (6)	391 (7)	188 (12)	199 (12)
	2071-2100	389 (9)	408 (9)	201 (11)	238 (18)

Sin embargo, es necesario señalar que en este trabajo se parte de la hipótesis de que los patrones temporales del ciclo de crecimiento de los cultivos regados son cuasi-invariantes en el tiempo, es decir, se asumen estáticos en cuanto a la fenología del cultivo. No obstante, el propio cambio climático, las prácticas de manejo y la incorporación de nuevas variedades pueden influir significativamente en la fenología (Estrella et al., 2007), lo que podría tener un impacto relevante en la estimación de la demanda de agua de riego, lo que requiere futura investigación.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian que el cambio climático descrito por los modelos tendrá un impacto significativo sobre la demanda hídrica de los cultivos de regadío en el Alto Guadiana. Se prevé un incremento progresivo tanto de la evapotranspiración de los cultivos como de las necesidades de agua de riego neto para los periodos futuros considerados.

La integración de las proyecciones climáticas en el modelo de balance de agua asistido por teledetección constituye una metodología robusta y operativa que permite evaluar escenarios futuros de demanda hídrica de los cultivos en grandes aéreas.

La información obtenida resulta clave para apoyar la planificación hidrológica y el diseño de estrategias de adaptación orientadas a mejorar la eficiencia y sostenibilidad del regadío en un contexto de creciente escasez de recursos hídricos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto ECLIMAR (Evaluación de los Efectos del cambio CLIMático sobre las demandas de Agua en Regadíos) financiado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Fundación Biodiversidad). Los autores agradecen la colaboración de AEMET y la Oficina Española de Cambio Climático.

6. REFERENCIAS

Allen, R. G., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements. In Irrig. Drain. Pap. No. 56, FAO, Rome, Italy.

Campos, I., Neale, C. M. U., Calera, A., Balbontín, C., & González-Piqueras, J. (2010). Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (Vitis vinifera L.). *Agricultural Water Management, 98*(1), 45–54.

Campoy, J., Campos, I., Villodre, J., Bodas, V., Osann, A., & Calera, A. (2023). Remote Sensing-based crop yield model at field and within-field scales in wheat and barley crops. *European Journal of Agronomy, 143*, 126720.

Estrella, N., Sparks, T. H., & Menzel, A. (2007). Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology, 13*(8), 1737–1747.

Gabr, M. E. (2023). Impact of climatic changes on future irrigation water requirement in the Middle East and North Africa's region: a case study of upper Egypt. *Applied Water Science, 13*(7), 158.

Sánchez, J. M., Beltrán, A., Calera, A., Campoy, J., Galve, J. M., Rodríguez, E., & Romero, R. (2025). Proyecciones climáticas de la evapotranspiración de referencia en España, como principal factor de las demandas de agua en regadíos. XIII Congreso de La AEC. Cambio Climático y Sociedad: De La Ciencia Básica a Los Servicios Climáticos. San Lorenzo de El Escorial (Madrid), 22 al 24 Enero de 2025.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.194

Algoritmos para la estimación de la calidad del agua de la Albufera de Valencia con imágenes Sentinel-2

Caballero, Gabriel Rodrigo [1] **Sòria-Perpinyà, Xavier** [1] **Alvado, Bárbara** [1] **Ruíz-Verdú, Antonio** [1] **Soria, Juan Miguel** [2] **Vicente, Eduardo** [2] **Durán Lalaguna, Concha** [3] **Ortega Terol, Damián** [3] **Moreno, José** [1] **Delegido Gómez, Jesús** [1]

[1] Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universitat de València, España

[2] Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva (ICBiBE). Universitat de València.

[3] Confederación Hidrográfica del Júcar, Valencia

ORCID: Caballero 0000-0003-2268-2674 Sòria-Perpinyà 0000-0001-8080-5826 Alvado 0000-0002-7304-2688 Ruíz-Verdú 0000-0001-6832-3496 Soria 0000-0001-5249-8590 Vicente 0000-0002-8814-9912 Ortega Terol 0000-0001-8107-5693 Moreno 0000-0002-5283-3333 Delegido Gómez 0000-0002-2819-6979

Correspondencia: gabriel.caballero@uv.es javier.soria-perpina@uv.es barbara.alvado@uv.es antonio.ruiz@uv.es juan.soria@uv.es eduardo.vicente@uv.es mariaconcepcion.duran@chj.es damian.ortega@chj.es jose.moreno@uv.es jesus.delegido@uv.es

RESUMEN

La Albufera de Valencia presenta graves problemas de eutrofización desde los años 70. Debido a su alto interés, se han hecho multitud de trabajos científicos aplicando la teledetección al estudio de la calidad de sus aguas. Sin embargo, recientes cambios como el gran crecimiento de nuevas especies de fitoplancton o las fuertes inundaciones, requieren la búsqueda de nuevos modelos para el uso de la teledetección en este lago, pues han cambiado sus propiedades ópticas. En este trabajo, utilizando datos de campo obtenidos entre 2016 y 2025, se han calibrado diferentes índices espectrales para la estimación de distintas variables biofísicas de calidad de aguas usando Sentinel-2. Las variables en estudio han sido la concentración de clorofila-a, la ficocianina, los sólidos totales en suspensión, la profundidad del Disco de Secchi y el contenido en fósforo total. Los modelos muestran NRMSE variables entre 15 y 26% y permiten tanto la elaboración de mapas de las diferentes variables como la obtención de series temporales que nos pueden proporcionar un conocimiento más profundo del estado y los cambios de la Albufera.

Palabras clave: *Clorofila, ficocianina, sólidos en suspensión, Disco de Secchi, fósforo*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Algoritmos para la estimación de la calidad del agua de la Albufera de Valencia con imágenes Sentinel-2

Caballero, Gabriel Rodrigo [(1)], Sòria-Perpinyà, Xavier [(1)], Alvado, Bárbara [(1)], Ruíz-Verdú, Antonio [(1)], Soria, Juan Miguel [(2)], Vicente, Eduardo [(2)], Durán Lalaguna, Concha [(3)], Ortega Terol, Damián [(3)], Moreno, José [(1)], Delegido Gómez, Jesús [(1)]

[(1)] Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universitat de València, España.

0000-0003-2268-2674 gabriel.caballero@uv.es ; 0000-0001-8080-5826, javier.soria-perpina@uv.es

0000-0002-7304-2688, barbara.alvado@uv.es ; 0000-0001-6832-3496, antonio.ruiz@uv.es

0000-0002-5283-3333, jose.moreno@uv.es ; 0000-0002-2819-6979, jesus.delegido@uv.es

[(2)] Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva (ICBiBE). Universitat de València.

0000-0001-5249-8590, juan.soria@uv.es ; 0000-0002-8814-9912, eduardo.vicente@uv.es

[(3)] Confederación Hidrográfica del Júcar.

mariaconcepcion.duran@chj.es ; 0000-0001-8107-5693, damian.ortega@chj.es

Resumen: La Albufera de Valencia presenta graves problemas de eutrofización desde los años 70. Debido a su alto interés, se han hecho multitud de trabajos científicos aplicando la teledetección al estudio de la calidad de sus aguas. Sin embargo, recientes cambios como el gran crecimiento de nuevas especies de fitoplancton o las fuertes inundaciones, requieren la búsqueda de nuevos modelos para el uso de la teledetección en este lago, pues han cambiado sus propiedades ópticas. En este trabajo, utilizando datos de campo obtenidos entre 2016 y 2025, se han calibrado diferentes índices espectrales para la estimación de distintas variables biofísicas de calidad de aguas usando Sentinel-2. Las variables en estudio han sido la concentración de clorofila-a, la ficocianina, los sólidos totales en suspensión, la profundidad del Disco de Secchi y el contenido en fósforo total. Los modelos muestran NRMSE variables entre 15 y 26% y permiten tanto la elaboración de mapas de las diferentes variables como la obtención de series temporales que nos pueden proporcionar un conocimiento más profundo del estado y los cambios de la Albufera.

Palabras clave: Clorofila, ficocianina, sólidos en suspensión, Disco de Secchi, fósforo.

Algorithms for water quality assessment in the Albufera of Valencia using Sentinel-2 satellite imagery

***Abstract**: The Albufera of Valencia has faced severe eutrophication problems since the 1970s. Due to its high ecological and scientific interest, numerous studies have applied remote sensing to assess its water quality. However, recent changes—such as the proliferation of novel phytoplankton species and major flooding events—require the development of new remote sensing models for this lagoon, as its optical properties have shifted. In this study, using field data collected between 2016 and 2025, we calibrated various spectral indices to estimate key biophysical water quality variables with Sentinel-2 imagery. The variables analyzed include chlorophyll-a concentration, phycocyanin, total suspended solids, Secchi disk depth, and total phosphorus content. The resulting models exhibit NRMSE values ranging from 15% to 26% and enable both the production of spatial distribution maps for each variable and the generation of time series, which can provide deeper insight into the ecological status and ongoing changes in the Albufera.*

***Keywords**: Chlorophyll, phycocyanin, suspended solids, Secchi disk, phosphorus.*

1. INTRODUCCIÓN

La Albufera de Valencia, que presenta graves problemas de eutrofización, es el mayor lago de agua dulce español. Rodeado de arrozales y próximo a la ciudad de Valencia tiene un alto interés tanto para la agricultura, ecología, pesca y turismo como por ser una importante reserva de aves, por lo que ha sido ampliamente estudiado con técnicas de teledetección por diferentes autores (López-García y Caselles, 1990; Doña *et al*., 2014). Durante los

últimos años, gracias a la disponibilidad de imágenes del programa Copernicus, se han desarrollado modelos para la estimación de diferentes variables de calidad del agua en la Albufera, como la concentración de clorofila-a (Chl-a) que es un indicador de la cantidad de fitoplancton, la concentración de ficocianina (PC) presente en las cianobacterias que pueden aportar toxicidad al agua, los sólidos totales en suspensión (TSM), la transparencia a través de la profundidad del Disco de Secchi (SDD) y el contenido en fósforo total (PT) (Sòria-Perpinyà *et al*., 2019; 2020a; 2020b; 2021; Molner *et al*., 2023).

Sin embargo, recientes cambios producidos en el lago, como el crecimiento masivo de una nueva especie de fitoplancton en 2023 o las consecuencias de las inundaciones del 29 de octubre de 2024, han provocado la modificación de las condiciones del lago y por tanto de sus propiedades ópticas, lo que obliga a recalibrar o incluso buscar nuevos algoritmos incluyendo datos de campo más recientes.

El objetivo de este trabajo es presentar nuevos algoritmos para la estimación de la Chl-a, PC, TSM, SDD y PT en la Albufera de Valencia a partir de imágenes Sentinel-2 (S2) de nivel L2A, usando datos de campo obtenidos en muestreos realizados entre 2016 y 2025.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio y medidas in situ

La Albufera de Valencia (Fig. 1) es un sistema acuático regulado por las actividades humanas, principalmente el cultivo del arroz. Con una profundidad media de 1 m es un sistema hipertrófico con valores de Chl-a que pueden llegar a superar los 350 μg/L y valores de SDD que varían entre 0,15 y 0,4 m.

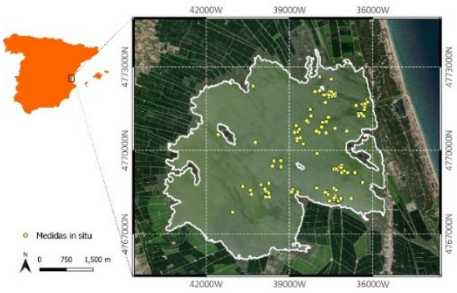


Figura 1. Localización y puntos de muestreo en la Albufera de Valencia. *CRS: EPSG:3857 - WGS 84 / Pseudo-Mercator.*

En este estudio utilizaremos datos de campo obtenidos en diferentes muestreos realizados entre 2016 y 2025, coincidentes con imágenes de S2 sin nubes en la zona Albufera. En cada campaña se realizaron medidas de radiometría y SDD en varios de los puntos mostrados en la Fig.1 y se tomaron muestras de agua que fueron procesadas en el laboratorio para la obtención de Chl-a, PC, TSM y PT según la metodología descrita en (Sòria-Perpinyà *et al*., 2021).

2.2. Metodología

De las imágenes S2 nivel L2A (con corrección atmosférica) coincidentes con los datos de campo se han extraído los espectros de reflectividad, promediados en una ventana de 3x3 píxeles de 10 m alrededor de las coordenadas del punto de muestreo. La inmensa mayoría de los datos de campo coinciden en fecha con la toma de imágenes de satélite, pues esto se tiene en cuenta en la planificación de los muestreos, junto a las condiciones meteorológicas adecuadas (evitando nubosidad y fuertes vientos). Con la herramienta *Automated Radiative Transfer Models Operator* (ARTMO) de libre acceso disponible en https://artmotoolbox.com/ se han calibrado diferentes índices espectrales usando validación cruzada con 4 subconjuntos de datos para evaluar el rendimiento de cada modelo. Los índices que se han probado son el Cociente Simple, el Índice de Diferencia Normalizado, el índice tribanda de Dall´Olmo (TBDO) (Dall'Olmo *et al*., 2003), el Maximum Chlorophyll Index (MCI) y un índice de tres bandas obtenido al multiplicar un cociente simple por otra banda. Para seleccionar el mejor índice con la combinación óptima de bandas se ha tenido en cuenta el coeficiente de determinación (R^2), el error absoluto medio (MAE), el error absoluto medio porcentual (MAP), el error cuadrático medio (RMSE) y el error cuadrático medio normalizado (NRMSE).

3. RESULTADOS

Para la estimación de la Chl-a fue suficiente el recalibrado del índice TBDO. Para ello se utilizaron 262 datos. La Figura 2 muestra la relación entre los datos de campo y el índice, por lo que la Chl-a se puede obtener con la ecuación:

$$\text{Chl-a } (\mu g/L) = 247{,}54\ \text{TBDO} + 10{,}643 \quad (1)$$

Donde

$$\text{TBDO} = R_{740}\left(\frac{1}{R_{665}} - \frac{1}{R_{705}}\right) \quad (2)$$

Siendo R_i la reflectividad en la banda centrada en la longitud de onda i (en nm). Este modelo permite estimar la Chl-a en la Albufera con un RMSE de 42,4 μg/L y un NRMSE del 26%.

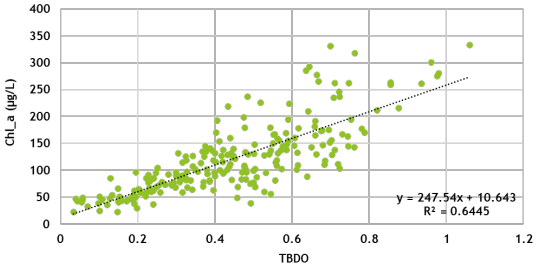


Figura 2. Valores de campo de Chl-a en función del índice tribanda obtenido con S2.

En el caso de la ficocianina no fue suficiente el reajuste y se calibró un nuevo algoritmo, para lo cual se usaron 127 datos. La Figura 3 muestra el ajuste con mejores estadísticos, obtenido con el índice MCI (Índice Máximo de Clorofila) y que se puede calcular como:

$$PC(\mu g/L) = -16840\ MCI - 8{,}5045 \quad (3)$$

Donde

$$MCI = R_{665} - 1{,}3\ (R_{490} + (R_{705} - R_{490})\ 0{,}46) \quad (4)$$

La validación registró unos errores asociados al algoritmo de 160 µg/L de RMSE y un 17% de NRMSE.

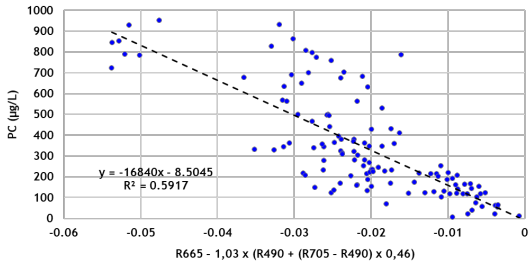


Figura 3. Valores de campo de ficocianina en función del índice tribanda calculado con S2.

Para los TSM también fue necesario desarrollar un nuevo algoritmo, para lo que se disponía de un total de 144 datos. La Figura 4 muestra el calibrado del índice, que en este caso es una combinación de tres bandas, con lo que la ecuación obtenida es:

$$TSM(mg/L) = 396{,}37\ R_{783}\left(\frac{R_{705}}{R_{665}}\right) + 30{,}651 \qquad (5)$$

El cálculo de los estadísticos de validación obtuvo un RMSE de 19 mg/L y un NRMSE del 15%.

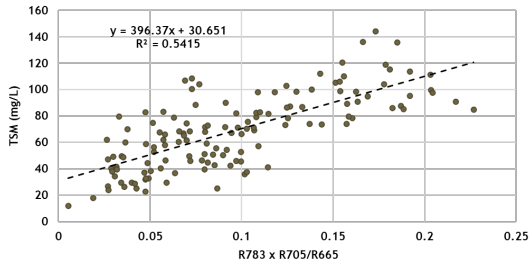


Figura 4. Valores de campo de TSM en función del índice obtenido con S2.

La estimación de la SDD también requirió de la obtención de un nuevo modelo. Para ello, se han utilizado un total de 238 datos. El nuevo modelo se obtuvo con el índice MCI, cuyo ajuste se muestra en la Figura 5 y que permite calcular SDD con las ecuaciones:

$$SDD\ (m) = -3{,}2279\ MCI + 0{,}3971 \qquad (6)$$

donde

$$MCI = R_{705} - 1{,}3\ (R_{665} + (R_{560} - R_{665})\ 0{,}5) \qquad (7)$$

Los resultados de la validación del modelo fueron un 0,05 m de RMSE y un 16% de NRMSE.

Respecto al algoritmo de estimación del PT, y teniendo en cuenta que el fósforo no cambia las propiedades ópticas del agua, se ha trabajado en obtener una estimación indirecta a través de la correlación entre PT y Chl-a. Aunque hay un desfase entre la entrada de nutrientes y el crecimiento algal, Quinlan *et al*. (2021) en su estudio con datos de 3.874 lagos distribuidos en 47 países, encontraron una relación lineal positiva entre TP y Chl-a en concentraciones intermedias de TP, es decir, el rango entre 4 y 230 µg/L, justo en el que se encuentran la mayoría de las muestras de que disponemos.

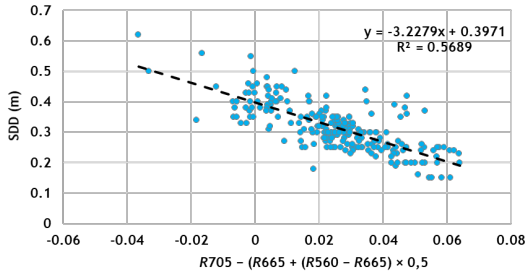


Figura 5. Valores *in situ* de SDD en función del índice MCI.

Para obtener el PT a partir de la Chl-a se correlacionaron los 92 datos de campo disponibles con ambas variables (Figura 6), obteniéndose una relación muy significativa, con un R^2 de 0,7.

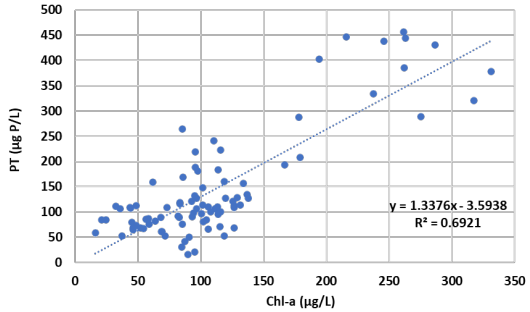


Figura 6. Diagrama de dispersión entre los datos *in situ* de PT y los de Chl-a.

Por tanto, la fórmula para la obtención del PT a partir de la Chl-a es la siguiente:

$$PT\ (\mu g/L) = 1{,}3376\ Chl\text{-}a_{estimada} - 3{,}5983 \qquad (8)$$

Donde $Chl\text{-}a_{estimada}$ se calcula con S2 usando la ecuación 1, obteniéndose con este método un RMSE de 83 µg/L y un NRMSE del 19% para la estimación del PT.

La aplicación de las anteriores ecuaciones permite elaborar mapas de las distintas variables indicativas de la calidad del agua de la Albufera de Valencia, mostrando su distribución espacial. Esto es especialmente útil en el caso de la Albufera debido a que tiene diferentes aportes de agua por varios puntos procedentes de distintos sitios y calidades diferentes. Además, la posibilidad del trabajo en la nube, también facilita la elaboración de series temporales, por ejemplo con Google Earth Engine o con la plataforma de la ESA, Copernicus Browser (https://browser.dataspace.copernicus.eu/).

Como ejemplo, en la Figura 7 se muestra la variación temporal de la Chl-a y del PT, mostrando la relación directa entre ambas variables y la desviación estándar (sombreado) de cada una. Esto se ha realizado en Copernicus Browser, definiendo previamente una región de interés que solo contenga píxeles de agua en la Albufera, eliminando píxeles próximos a la costa e islas. En cada fecha con imagen sin nubes se ha calculado el valor medio y la desviación estándar de cada variable dentro de esa región de interés.

Hay que advertir que en la variación espacial y las series temporales el PT seguirá la misma variación que la Chl-a (Fig. 7). Y, aunque en circunstancias concretas, como

la entrada de materia alóctona que aporta PT por arrastre, el cálculo de PT sea probablemente inferior al real, las estimaciones realizadas sí que nos servirán para obtener, por el momento, valores más próximos a los de campo y así poder observar posibles anomalías a lo largo del tiempo.

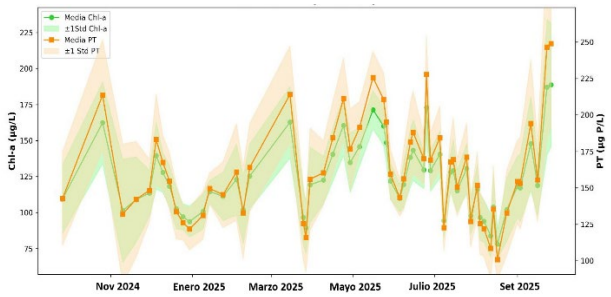


Figura 7. Evolución temporal en los dos últimos años de la Chl-a y PT en el lago de la Albufera.

Otro ejemplo que puede servir para mostrar la evolución de una variable biofísica y la gran variabilidad espacial, se muestra en la Figura 8, donde se ha representado la media y desviación estándar de la transparencia a través del SDD, calculada con la ecuación 6, en la zona de interés dentro de la Albufera. Esta gráfica muestra no solo la heterogeneidad del lago que da valores muy altos de desviación estándar, sino que también se aprecia una cierta variación estacional en la transparencia, con valores más altos hacia el final del verano casi todos los años.

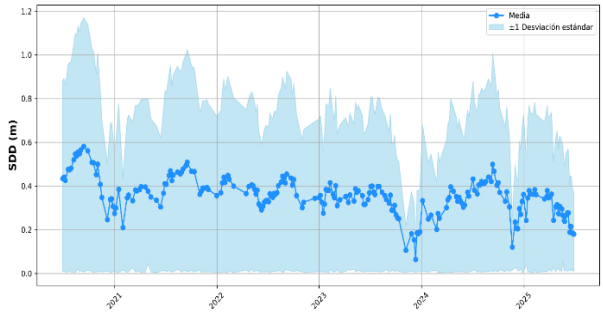


Figura 8. Evolución temporal en los últimos cinco años de la transparencia (SDD) en el lago de la Albufera.

4. CONCLUSIONES

A partir de una extensa base de datos de campo que abarca desde 2016 a 2025, se han calibrado índices espectrales para la estimación de la Chl-a, PC, TSM, SDD y PT en la Albufera de Valencia usando S2 nivel L2A. Las mejores relaciones se han obtenido con el tribanda de Dall´Olmo para la Chl-a, MCI con las bandas roja, azul y Red-Edge para la PC, una combinación de dos bandas del Red-Edge y la del rojo para los TSM, y un MCI con rojo, verde y Red-Edge para la SDD. Además, se ha comprobado la relación entre la Chl-a y el fósforo que permite obtener una estimación indirecta de PT con imágenes S2. Estos métodos permiten la elaboración de mapas y series temporales usando el trabajo en la nube en Copernicus Browser, obteniendo las variables en estudio con errores que van desde un 15% de NRMSE para TSM hasta un NRMSE del 26% para el caso de la Chl-a.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Convenio de colaboración entre CHJ y UV 2024-2026 “SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUAS EN EMBALSES, LAGOS Y OTRAS MASAS DE AGUA DE LA CUENCA A PARTIR DE DATOS DE SENSORES REMOTOS (TELEDEMB)”

6. REFERENCIAS

Dall'Olmo, G., Gitelson, A. A., & Rundquist, D. C. (2003). Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. Geophysical Research Letters, 30(18).

Doña, C., Sanchez, J. M., Caselles, V., Domínguez, J. A., & Camacho, A. (2014). Empirical relationships for monitoring water quality of lakes and reservoirs through multispectral images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *7*(5), 1632-1641.

López García, M. J., & Caselles, V. (1990). A multi-temporal study of chlorophyll-a concentration in the Albufera lagoon of Valencia, Spain, using Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, *11*(2), 301-311.

Molner, J. V., Soria, J. M., Pérez-González, R., & Sòria-Perpinyà, X. (2023). Measurement of turbidity and total suspended matter in the Albufera of Valencia lagoon (Spain) using Sentinel-2 images. Journal of Marine Science and Engineering, 11(10), 1894.

Quinlan, R., Filazzola, A., Mahdiyan, O., Shuvo, A., Blagrave, K., Ewins, C., ... & Sharma, S. (2021). Relationships of total phosphorus and chlorophyll in lakes worldwide. *Limnology and Oceanography*, 66(2), 392-404.

Sòria-Perpinyà, X., Vicente, E., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Ruíz-Verdú, A., Delegido, J., ... & Moreno, J. (2020a). Remote sensing of cyanobacterial blooms in a hypertrophic lagoon (Albufera of València, Eastern Iberian Peninsula) using multitemporal Sentinel-2 images. *Science of the Total Environment*, *698*, 134305.

Sòria-Perpinyà, X., Urrego, E. P., Pereira-Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., Soria, J. M., Delegido, J., ... & Moreno, J. (2020b). Monitoring water transparency of a hypertrophic lake (the Albufera of València) using multitemporal Sentinel-2 satellite images. *Limnetica*, *39*(1), 373-386.

Sòria-Perpinyà, X., Vicente, E., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Tenjo, C., Ruíz-Verdú, A., ... & Moreno, J. (2021). Validation of water quality monitoring algorithms for sentinel-2 and sentinel-3 in mediterranean inland waters with in situ reflectance data. *Water*, *13*(5), 686.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.207

Implementación de modelos biogeoquímicos con Sentinel–2 para la monitorización sistemática de embalses mediterráneos de aguas claras mediante Copernicus Browser

Caballero Cañas, Gabriel Rodrigo [1] **Sòria-Perpinyà, Xavier** [1] **Alvado Arranz, Bárbara** [1] **Ruiz-Verdú, Antonio** [1] **Vicente, Eduardo** [2] **Durán Lalaguna, Concha** [3] **Ortega Terol, Damián** [3] **Delegido, Jesús** [1]

[1] Laboratorio de procesado de imágenes (IPL), Universidad de Valencia

[2] Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva (ICBiBE), Universidad de Valencia

[3] Confederación hidrográfica del Júcar (CHJ)

ORCID: Caballero 0000-0003-2268-2674 Sòria-Perpinyà 0000-0001-8080-5826 Alvado Arranz 0000-0002-7304-2688 Ruiz-Verdú 0000-0001-6832-3496 Vicente 0000-0002-8814-9912 Ortega Terol 0000-0001-8107-5693 Delegido 0000-0002-2819-6979

Correspondencia: gabriel.caballero@uv.es javier.soria-perpina@uv.es barbara.alvado@uv.es antonio.ruiz@uv.es eduardo.vicente@uv.es mariaconcepcion.duran@chj.es damian.ortega@chj.es jesus.delegido@uv.es

RESUMEN

La monitorización sistemática de las masas de agua continentales constituye un elemento clave para la gestión sostenible de los recursos hídricos y el cumplimiento de la Directiva Marco del Agua. En este trabajo se presenta el proyecto TELEDEMB, centrado en la calibración y operacionalización de modelos biogeoquímicos basados en imágenes Sentinel-2 Nivel 2A para la estimación de clorofila–a (Chl–a), sólidos totales en suspensión (TSM), profundidad del disco de Secchi (SDD) y ficocianina (PC) en embalses mediterráneos de aguas claras pertenecientes a la cuenca hidrográfica del Júcar. Los modelos empíricos fueron ajustados mediante datos in situ y reflectancias atmosféricamente corregidas. La principal contribución del estudio radica en la implementación de los modelos en JavaScript para su ejecución directa en Copernicus Browser, transformando desarrollos científicos en herramientas operativas accesibles para gestores ambientales. Este enfoque permite la generación de mapas temáticos y series temporales sin necesidad de flujos de procesado avanzados, fortaleciendo la toma de decisiones basada en datos de observación de la Tierra.

Palabras clave: *Calidad Agua, Clorofila-a, Modelos bio-ópticos, Copernicus Browser, operacionalización.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 21 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Implementación de modelos biogeoquímicos con Sentinel–2 para la monitorización sistemática de embalses mediterráneos de aguas claras mediante Copernicus Browser

Caballero Cañas, Gabriel Rodrigo [(1)], Sòria-Perpinyà, Xavier [(1)], Alvado Arranz, Bárbara [(1)], Ruiz-Verdú, Antonio [(1)], Vicente, Eduardo [(2)], Durán Lalaguna, Concha [(3)], Ortega Terol, Damián [(3)], Delegido, Jesús [(1)], Moreno, José [(1)]

[(1)] Laboratorio de procesado de imágenes (IPL), Universidad de Valencia.
0000-0003-2268-2674, gabriel.caballero@uv.es ; 0000-0001-8080-5826, javier.soria-perpina@uv.es
0000-0002-7304-2688, barbara.alvado@uv.es ; 0000-0001-6832-3496, antonio.ruiz@uv.es
0000-0002-2819-6979, jesus.delegido@uv.es ; 0000-0002-5283-3333, jose.moreno@uv.es

[(2)] Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva (ICBiBE), Universidad de Valencia.
0000-0002-8814-9912, eduardo.vicente@uv.es

[(3)] Confederación hidrográfica del Júcar (CHJ).
mariaconcepcion.duran@chj.es ; 0000-0001-8107-5693, damian.ortega@chj.es

Resumen: La monitorización sistemática de las masas de agua continentales constituye un elemento clave para la gestión sostenible de los recursos hídricos y el cumplimiento de la Directiva Marco del Agua. En este trabajo se presenta el proyecto TELEDEMB, centrado en la calibración y operacionalización de modelos biogeoquímicos basados en imágenes Sentinel-2 Nivel 2A para la estimación de clorofila–a (Chl–a), sólidos totales en suspensión (TSM), profundidad del disco de Secchi (SDD) y ficocianina (PC) en embalses mediterráneos de aguas claras pertenecientes a la cuenca hidrográfica del Júcar. Los modelos empíricos fueron ajustados mediante datos in situ y reflectancias atmosféricamente corregidas. La principal contribución del estudio radica en la implementación de los modelos en JavaScript para su ejecución directa en Copernicus Browser, transformando desarrollos científicos en herramientas operativas accesibles para gestores ambientales. Este enfoque permite la generación de mapas temáticos y series temporales sin necesidad de flujos de procesado avanzados, fortaleciendo la toma de decisiones basada en datos de observación de la Tierra.

Palabras clave: Calidad del agua, Clorofila-a, Modelos bio-ópticos, Copernicus Browser, operacionalización.

Implementation of biogeochemical models with Sentinel-2 for the systematic monitoring of Mediterranean clearwater reservoirs through Copernicus Browser

***Abstract**: Sustainable monitoring of inland water bodies is essential for environmental management and compliance with the European Water Framework Directive. This work presents the TELEDEMB project, focused on the calibration and operational implementation of biogeochemical models using Sentinel-2 Level 2A imagery for the estimation of chlorophyll–a (Chl–a), total suspended matter (TSM), Secchi disk depth (SDD), and phycocyanin (PC) in clear Mediterranean reservoirs of the Júcar river basin in Spain. Empirical models were calibrated using in situ measurements and atmospherically corrected surface reflectance. Beyond scientific model development, the main contribution of this work lies in the operational implementation of the algorithms in JavaScript, enabling direct execution within the Copernicus Browser. This approach transforms scientific equations into accessible environmental monitoring tools, allowing stakeholders and environmental managers to generate spatial maps and time series without advanced processing workflows. Results demonstrate robust model performance and highlight the importance of bridging scientific research and operational Earth Observation services.*

***Keywords**: Water Quality, Chlorophyll-a, Bio-optical Modelling, Copernicus Browser, Operational Monitoring.*

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad hídrica se ha consolidado como uno de los desafíos más críticos del siglo XXI. En un escenario de cambio climático antropogénico, las masas de agua continentales enfrentan presiones sin precedentes debido a la eutrofización, la escasez de recursos y la alteración de los ciclos biogeoquímicos (Palmer *et al*., 2015). Los embalses de la cuenca del Júcar, vitales para el riego agrícola y el consumo humano, requieren una vigilancia continua que la limnología tradicional, basada en muestreos puntuales in situ, no puede satisfacer debido a sus limitaciones en resolución espacial y temporal. En este contexto, la misión Sentinel–2 (S2) de la Agencia Espacial Europea (ESA), integrada en el programa Copernicus, ha revolucionado la teledetección hidrológica. Gracias al sensor Multi-Spectral Instrument (MSI), esta constelación ofrece una combinación única de alta resolución espacial (10, 20 y 60 metros), una resolución radiométrica de 12 bits y una frecuencia de revisita menor de 5 días sobre Europa (Drusch *et al*., 2012). Estas características permiten capturar variaciones en la reflectancia de aguas claras (oligotróficas y mesotróficas), cuya firma espectral está dominada por la absorción del agua y por los constituyentes ópticamente activos (Morel y Prieur, 1997; Odermatt *et al*., 2012). Fluctuaciones sostenidas en la concentración de clorofila–a (Chl–a), la profundidad del disco de Secchi (SDD), la materia total suspendida (TSM) o la ficocianina (PC) constituyen indicadores determinantes de la evolución del estado trófico en ecosistemas lénticos. No obstante, el procesamiento masivo de estos datos a nivel de usuario final suele verse limitado por la alta demanda de recursos computacionales y la complejidad técnica que implica la gestión de grandes volúmenes de datos. Con la finalidad de abordar esta problemática, el proyecto TELEDEMB propone un flujo de trabajo que trasciende la investigación teórica para enfocarse en la implementación operativa de modelos de monitoreo de variables de calidad del agua. Los objetivos principales de este estudio son:

(i) Desarrollar modelos biogeoquímicos regionales calibrados específicamente para la respuesta espectral de los embalses mediterráneos, optimizando algoritmos empíricos y semianalíticos para datos S2 de nivel 2A (S2–L2A).

(ii) Facilitar la transferencia de conocimiento mediante el uso de Custom Scripts (Evalscripts) integrados en Copernicus Browser.

Esta transición hacia una "arquitectura de soluciones EO" permite que los algoritmos de estimación de Chl-a, SDD, TSM y PC se ejecuten en tiempo real sobre la infraestructura en la nube de Copernicus, democratizando el acceso a la información geoespacial. El usuario final (gestores de cuencas o técnicos ambientales) puede visualizar cartografía de calidad de agua y analizar series temporales sin necesidad de software de escritorio complejo ni preprocesamiento avanzado. Este trabajo demuestra que la integración de ciencia rigurosa y herramientas de visualización operativas es la clave para una gestión hídrica resiliente.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en un conjunto de embalses de aguas claras de la cuenca hidrográfica del Júcar: Alarcón, Benagéber, Contreras, María Cristina, Regajo, Sitjar y Tous. La Figura 1 muestra la distribución geográfica de las masas de agua analizadas.

2.2. Datos satelitales y datos in situ

La base de datos de entrenamiento se consolidó a partir de 39 campañas de campo realizadas de forma sistemática entre 2016 y 2024. Con el fin de capturar la variabilidad espacial intrínseca de cada cuerpo de agua, se establecieron entre 3 y 5 puntos de muestreo por embalse. Se obtuvieron en total 124 medidas *in situ* sincronizadas con las pasadas del satélite S2. Los datos in situ incluyeron Chl–a, TSM, SDD y PC. Se utilizaron imágenes S2–L2A (reflectancia en superficie), aplicando enmascarado de nubes mediante la banda QA60 y la capa de clasificación de escena (SCL) disponible en los datos de S2.

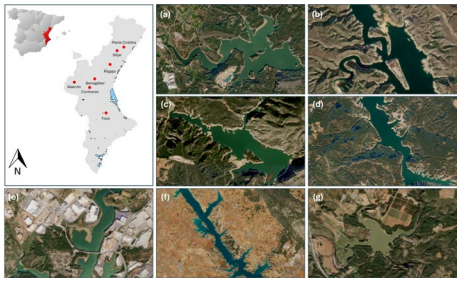


Figura 1. Localización y composición S2-RGB de los embalses de aguas claras analizados en la Comunidad Valenciana. a) Sitjar; b) Tous; c) Benagéber; d) Contreras, e) María Cristina; f) Alarcón; g) Regajo

2.3. Desarrollo de modelos biofísicos

A partir de las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo, se extrajo la reflectancia en superficie de imágenes S2 coincidentes en una ventana temporal de 3 días. Con el objetivo de derivar modelos empíricos robustos, se evaluaron cuatro índices espectrales y combinaciones de bandas en el espectro visible e infrarrojo cercano (Ecuaciones 1 a 4). La optimización de los coeficientes se realizó mediante análisis de regresión lineal simple y exponencial, priorizando aquellas combinaciones con mayor sensibilidad a las variaciones de los constituyentes ópticamente activos en aguas claras.

$$\frac{R_i}{R_j} \tag{1}$$

$$\left(\frac{R_i - R_j}{R_i + R_j}\right) \tag{2}$$

$$R_i\left(\frac{1}{R_j} - \frac{1}{R_k}\right) \tag{3}$$

$$R_i - \alpha \cdot \left[R_j - \left(R_k - R_j\right) \cdot \beta\right] \tag{4}$$

Donde R representa la reflectancia en la banda correspondiente (i, j, k) mientras que α y β son coeficientes de ajuste que se optimizaron minimizando el error cuadrático medio entre los datos de campo y los valores estimados por los modelos de calidad de agua.

2.4. Implementación en Copernicus Browser

Los modelos fueron traducidos a JavaScript compatible con Copernicus Browser, permitiendo su ejecución directa sobre escenas S2–L2A. Esta implementación elimina la necesidad de procesamiento previo en software especializado, facilitando la generación de productos de valor agregado generados a partir de datos de S2–L2A. La integración de los modelos de monitorización de variables de calidad del agua en la Copernicus Browser permite:

• **Democratización del acceso**: Ejecución de la herramienta operativa por perfiles no técnicos, eliminando las barreras de entrada asociadas al preprocesamiento complejo de datos satelitales.

• **Flujo de trabajo optimizado:** Aplicación directa de los modelos biofísicos sobre productos S2–L2A sin necesidad de aplicar otros correctores atmosféricos.

• **Monitoreo multivariable:** Visualización en tiempo real de cartografía temática para variables clave: Chl–a, SDD, TSM y PC.

• **Interactividad espacial:** Generación de estadísticas descriptivas para áreas de interés personalizadas.

• **Dinámica temporal:** Análisis de series históricas para la evaluación de tendencias y estacionalidad en la calidad del agua.

• **Interoperabilidad de datos:** Exportación de productos originales y mapas derivados en formato estándar GeoTIFF, facilitando su integración en Sistemas de Información Geográfica.

3. RESULTADOS

3.1. Modelos de estimación de calidad del agua

Los modelos de estimación de variables de calidad del agua se obtuvieron mediante el análisis de la concordancia entre los valores observados in situ y los datos de reflectancia de S2–L2A.

Transparencia del agua (SDD)

La profundidad del disco de Secchi se modeló mediante una función exponencial decreciente:

$$\mathrm{SDD(m)} = 8{,}62\ e^{-44{,}25\ \mathrm{MCI_{SDD}}} \quad (5)$$

Donde $\mathrm{MCI_{SDD}}$ se define como:

$$\mathrm{MCI_{SDD}} = R_{560}\text{ -}1{,}039\ [R_{665} + (\ R_{490} - R_{665})\ 0{,}612] \quad (6)$$

Sólidos en suspensión (TSM)

Para TSM se obtuvo una respuesta lineal entre datos de campo y el índice espectral MCI de forma:

$$\mathrm{TSM(mg.L^{-1})} = 158{,}79\ \mathrm{MCI_{TSM}} + 1{,}56 \quad (7)$$

donde

$$\mathrm{MCI_{TSM}} = R_{560}\text{ -}1{,}015\ [R_{665} + (\ R_{443} - R_{490})\ 0{,}1502] \quad (8)$$

Ficocianina (PC)

A diferencia de las variables anteriores, el modelo de estimación de ficocianina se basa en un índice de diferencia normalizada:

$$\mathrm{PC\ (\mu g.L^{-1})} = 34{,}08\left(\frac{R_{560} - R_{490}}{R_{560} + R_{490}}\right) + 3{,}45 \quad (9)$$

Estimación de la Clorofila-a (Chl-a)

La estimación de Chl-a se abordó mediante una segmentación de los cuerpos de agua en función de su carga de material particulado inorgánico en suspensión (SPIM).

Modelización en embalses con alto SPIM

Para los embalses de Alarcón, María Cristina y Sitjar (AMS), caracterizados por concentraciones de SPIM > 2 $\mathrm{mg.L^{-1}}$ y menor contenido pigmentario, el mejor ajuste se obtuvo mediante un índice tribanda definido como:

$$\mathrm{Chl\text{-}a_{AMS}\ (\mu g.L^{-1})} = -\ 2{,}93\ \mathrm{TB} + 0{,}75 \quad (10)$$

$$\text{donde} \quad \mathrm{TB} = R_{665}\left(\frac{1}{R_{560}} - \frac{1}{R_{443}}\right) \quad (11)$$

Modelización en embalses con bajo SPIM

En los embalses de Benagéber, Contreras y Tous (BCT), donde predomina una mayor concentración de Chl-a y un SPIM < 2 $\mathrm{mg.L^{-1}}$, se obtuvo un ajuste exponencial basado en el índice MCI definido como:

$$\mathrm{Chl\text{-}a_{BCT}\ (\mu g.L^{-1})} = 1{,}94\ e^{6{,}8886\ \mathrm{MCI_{Chl\text{-}a}}} \quad (12)$$

donde

$$\mathrm{MCI_{Chl\text{-}a}} = R_{665}\text{ -}2{,}097\ [R_{560} + (\ R_{490} - R_{560})\ 6{,}33] \quad (13)$$

3.2. Evaluación estadística de los modelos biogeoquímicos

Para evaluar la precisión y robustez de los modelos de calidad del agua, se calcularon diversos estadísticos de bondad de ajuste: el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) y su variante normalizada ($NRMSE$), cuyos resultados para la fase de entrenamiento de los modelos se sintetizan en la Tabla 1. Cabe destacar que el índice MCI, definido previamente (Ec. 4), actúa como el predictor principal para la mayoría de las variables. Las variables operan sobre la reflectancia en superficie (R_λ) en las longitudes de onda de 443 nm (B1), 490 nm (B2), 560 nm (B3) y 665 nm (B4), de S2–MSI.

Tabla 1. Estadísticos de validación para los parámetros biogeoquímicos analizados. Las unidades corresponden a mg/L para TSM y µg/L para PC y Chl-a, y metros (m) para SDD.

Algoritmo	n	R^2	RMSE	NRMSE (%)
$\mathrm{Chl\text{-}a_{AMS}}$	19	0,77	0,33	14
$\mathrm{Chl\text{-}a_{BCT}}$	37	0,50	1,18	22
SDD	74	0,70	1,46	14
TSM	54	0,79	0,93	8
PC	49	0,52	2,30	22

3.3. Interfaz operativa

Para mostrar el potencial completo de la herramienta operativa, la Figura 2 presenta una captura de pantalla del entorno Copernicus Browser. Esta visualización incluye un mapa de SDD para el embalse de Tous, superpuesto con la interfaz de programación donde se ejecuta el script en JavaScript.

3.4. Mapas temáticos y series temporales

Como caso de estudio, la Figura 3 muestra la distribución espacial de la concentración de Chl-a en los embalses de Tous, Contreras y Benagéber. Estos mapas temáticos fueron generados mediante Copernicus Browser, a partir de una escena de S2 adquirida el 19 de enero de 2025. Los mapas evidencian la heterogeneidad espacial intra-embalse y permiten validar la operatividad del sistema para la monitorización, en tiempo casi real, de la calidad del agua de los embalses del Júcar. La Figura 4 muestra la evolución temporal de las concentraciones de Chl-a y TSM en el embalse de Contreras durante un periodo de cinco años (2020–2025). Este análisis dinámico permite identificar patrones de estacionalidad con una resolución temporal sin precedentes para la gestión hidrológica regional.

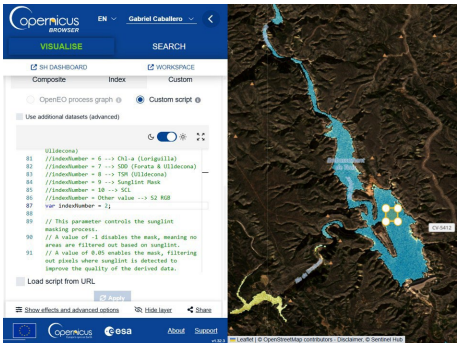


Figura 2. Interfaz operativa de Copernicus Browser. A la derecha, mapa de SDD para Tous derivado de una escena S2–L2A del 14 de enero de 2025; a la izquierda, entorno de desarrollo en JavaScript.

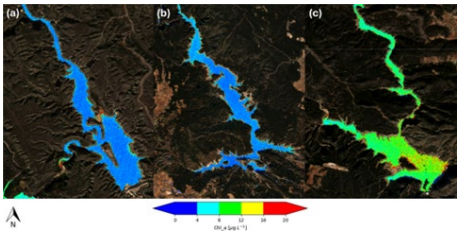


Figura 3. Mapa de concentración de Chl-a generado mediante Copernicus Browser (enero 2025). a) Tous; b) Contreras; c) Benagéber

4. DISCUSIÓN

Los resultados confirman la capacidad de S2 para la monitorización de embalses mediterráneos de aguas claras. La configuración espectral del sensor permite detectar variaciones en variables biogeoquímicas asociadas a la calidad del agua. Sin embargo, la principal aportación del estudio no reside únicamente en el ajuste estadístico, sino en la operacionalización de los modelos. La implementación en Copernicus Browser permite que gestores de la Confederación Hidrográfica del Júcar puedan generar productos de calidad del agua sin requerir procesamiento especializado. Este enfoque facilita la transición desde campañas puntuales hacia una monitorización continua, apoyando la toma de decisiones en gestión hídrica, detección temprana de eutrofización y evaluación de eventos extremos.

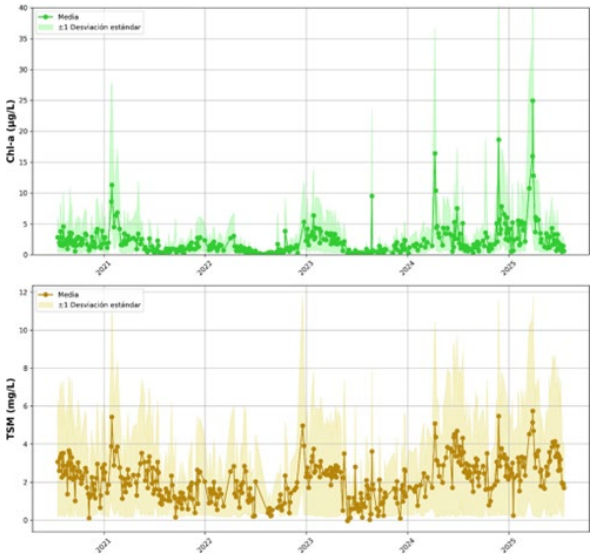


Figura 4. Serie temporal de clorofila-a en el embalse de Benagéber obtenida mediante Sentinel-2 L2A.

5. CONCLUSIONES

Los datos de reflectancia de S2–L2A permiten estimar variables biogeoquímicas de calidad del agua en embalses mediterráneos de aguas claras. Esto representa una ventaja operativa, ya que no se requiere procesar las escenas S2 de nivel L1 con otros correctores atmosféricos específicamente diseñados para aguas.

La implementación en Copernicus Browser transforma ecuaciones científicas en herramientas operativas accesibles, fortaleciendo la monitorización sistemática de masas de agua en la Comunidad Valenciana.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Convenio de colaboración entre CHJ y UV 2024-2026 “SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUAS EN EMBALSES, LAGOS Y OTRAS MASAS DE AGUA DE LA CUENCA A PARTIR DE DATOS DE SENSORES REMOTOS (TELEDEMB)”

7. REFERENCIAS

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote sensing of Environment,* 120, 25-36.

Morel, A., & Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color 1. *Limnology and oceanography,* 22(4), 709-722.

Odermatt, D., Gitelson, A., Brando, V. E., & Schaepman, M. (2012). Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote sensing of environment,* 118, 116-126.

Palmer, S. C., Kutser, T., & Hunter, P. D. (2015). Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. *Remote sensing of Environment,* 157, 1-8.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.269

Del grado de saturación del suelo al caudal: integración de EU-SoilHydroGrids y ERA5-Land en modelos hidrológicos

García Ramajo, Jorge Juan [1] **Jiménez Romanillos, José** [2] **Martínez García, Francisco Manuel** [1] **Fragoso Campón, Laura** [1]

[1] Universidad de Extremadura, España

[2] Junta de Extremadura

ORCID: García Ramajo 0009-0000-7296-3082 Jiménez Romanillos 0009-0009-0612-4390 Martínez García 0000-0002-0862-9933 Fragoso Campón 0000-0003-0397-6247

Correspondencia: jjgarciar@unex.es jose.jimenez@juntaex.es fmmgarcia@unex.es laurafragoso@unex.es

RESUMEN

Las inundaciones constituyen uno de los desastres naturales más frecuentes y con mayor impacto socioeconómico, relacionadas no solo con eventos extremos de precipitación, sino también con las características hidrológicas del territorio. Este estudio se centra en la cuenca del río Gévora, en el entorno de Badajoz, que en los últimos años ha experimentado varios episodios de inundación que han requerido la activación de medidas de emergencia. Estos eventos ponen de manifiesto la elevada vulnerabilidad de la zona frente a fenómenos hidrológicos extremos y la necesidad de mejorar los sistemas de monitorización, modelización y predicción de avenidas. En este contexto, se evalúa la utilidad de integrar información meteorológica de alta resolución procedente de ERA5-Land con propiedades hidráulicas del suelo derivadas de la base de datos EU-SoilHydroGrids para su aplicación en la modelización hidrológica mediante aprendizaje automático basado en Random Forest. Los resultados muestran que el modelo que combina ambas fuentes de información presenta el mejor rendimiento, reproduciendo adecuadamente la dinámica temporal del caudal y la magnitud de los picos de avenida, incluso durante eventos extremos. El análisis de la importancia de los predictores destaca el papel del grado de saturación del suelo, especialmente en relación con la capacidad de campo poniendo de relieve el papel determinante del estado de saturación del suelo en la generación de escorrentía.

Palabras clave: *inundaciones; propiedades hidráulicas del suelo; predicción de caudales*

Fecha de recepción: 19 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Del grado de saturación del suelo al caudal: integración de EU-SoilHydroGrids y ERA5-Land en modelos hidrológicos

García Ramajo, Jorge Juan [(1)], Jiménez Romanillos, José [(2)], Martínez García, Francisco Manuel [(1)], Fragoso Campón, Laura [(1)]

[(1)] Universidad de Extremadura, España.

0009-0000-7296-3082, jjgarciar@unex.es ; 0000-0002-0862-9933, fmmgarcia@unex.es

0000-0003-0397-6247, laurafragoso@unex.es.

[(2)] Junta de Extremadura

0009-0009-0612-4390, jose.jimenez@juntaex.es.

Resumen: Las inundaciones constituyen uno de los desastres naturales más frecuentes y con mayor impacto socioeconómico, relacionadas no solo con eventos extremos de precipitación, sino también con las características hidrológicas del territorio. Este estudio se centra en la cuenca del río Gévora, en el entorno de Badajoz, que en los últimos años ha experimentado varios episodios de inundación que han requerido la activación de medidas de emergencia. Estos eventos ponen de manifiesto la elevada vulnerabilidad de la zona frente a fenómenos hidrológicos extremos y la necesidad de mejorar los sistemas de monitorización, modelización y predicción de avenidas. En este contexto, se evalúa la utilidad de integrar información meteorológica de alta resolución procedente de ERA5-Land con propiedades hidráulicas del suelo derivadas de la base de datos EU-SoilHydroGrids para su aplicación en la modelización hidrológica mediante aprendizaje automático basado en Random Forest. Los resultados muestran que el modelo que combina ambas fuentes de información presenta el mejor rendimiento, reproduciendo adecuadamente la dinámica temporal del caudal y la magnitud de los picos de avenida, incluso durante eventos extremos. El análisis de la importancia de los predictores destaca el papel del grado de saturación del suelo, especialmente en relación con la capacidad de campo poniendo de relieve el papel determinante del estado de saturación del suelo en la generación de escorrentía.

Palabras clave: inundaciones; propiedades hidráulicas del suelo; predicción de caudales.

From Soil Saturation to Streamflow: Integration EU-SoilHydroGrids and ERA5-Land in Hydrological Models

***Abstract**: Floods are among the most frequent natural disasters and have some of the greatest socioeconomic impacts. They are associated not only with extreme precipitation events but also with the hydrological characteristics of a territory. This study focuses on the Gévora River basin, in the Badajoz area, which in recent years has experienced several flood episodes that have required the activation of emergency measures. These events highlight the high vulnerability of the area to extreme hydrological phenomena and the need to improve flood monitoring, modelling, and forecasting systems. In this context, the study evaluates the usefulness of integrating high-resolution meteorological information from ERA5-Land with soil hydraulic properties derived from the EU-SoilHydroGrids database for application in hydrological modelling using a Random Forest machine learning approach. The results show that the model combining both sources of information provides the best performance, accurately reproducing streamflow dynamics and flood peak magnitudes, even during extreme events. Predictor importance analysis highlights the role of soil saturation, particularly in relation to field capacity, underscoring the decisive role of soil saturation status in runoff generation.*

***Keywords**: Flood modelling; soil hydraulic properties; streamflow prediction.*

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son unos de los desastres naturales más frecuentes y con gran impacto socioeconómico, normalmente consecuencia de eventos extremos de precipitación. La respuesta hidrológica de un territorio depende de varios factores que pueden ser monitorizados mediante técnicas de teledetección, consolidándose como fuente fundamental de información básica para el análisis y la modelización hidrológica. Estudios recientes confirman que el enfoque

de aprendizaje automático mejora la estimación de caudales respecto a los modelos conceptuales tradicionales (Mimeau *et al*., 2024), pero es fundamental construir una base de datos completa de predictores que abarquen todas las variables que controlan la respuesta hidrológica.

El Copernicus Climate Change Service (C3S), como componente del programa europeo de observación de la Tierra Copernicus, proporciona el conjunto de datos de reanálisis climático ERA5-Land, que ofrece variables meteorológicas con alta resolución espacial y temporal. Por otro lado, la base de datos EU-SoilHydroGrids (EU-SHG) (Tóth *et al*., 2017), facilitada por el European Soil Data Centre (ESDAC) (Panagos *et al*., 2022) y desarrollada por el Joint Research Centre (JRC) de la Comisión Europea, suministra información edáfica armonizada a escala continental, con especial énfasis en propiedades hidráulicas del suelo.

El presente trabajo pretende fusionar los datos de la EU-SHG y ERA5-Land, para obtener nuevos predictores relacionados con el antecedente de humedad del suelo, y evaluar la eficacia de incorporar estos parámetros en la modelización hidrológica mediante aprendizaje automático.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Area de estudio

El caso de estudio corresponde a la cuenca del río Gévora (Badajoz), tomando como punto de cierre la estación de aforo en río de Valdebótoa (CR 2-45). Los caudales registrados se han obtenido del SAIH de Confederación Hidrográfica del Guadiana y se ha procesado la serie temporal horaria desde 2018 a 2025. Para generar los predictores, se ha simulado la cuenca agregada en la estación de aforo, calculando las estadísticas zonales de: valor medio, desviación estándar y los cuantiles 5, 10, 25, 50, 75, 90 y 95.

2.2. Conjunto ERA5-Land

Los datos ERA5-Land suministra datos horarios con una resolución espacial de malla de 9 km (0.1° x 0.1°). Dentro de los productos disponibles, para la caracterización hidrológica del territorio, se han utilizado los conjuntos de variables de temperatura, de radiación-presión e hidrológicas (Tabla 1). Además, se han generado variables acumuladas de precipitación y evaporación, a 24h, 72h y 120h anteriores.

Tabla 1. Relación de variables utilizadas del ERA5-Land

Variable ERA5-Land	Notación
2 metre dewpoint temperatura	2d
2 metre temperatura	2t
Skin temperatura	skt
Soil temperature levels*	stl
Surface net short-wave (solar) radiation	ssr
Surface net long-wave (thermal)	Str
Surface pressure	sp
Snowmelt	smlt
Volumetric soil water levels*	swvl
Skin reservoir content	Src
Evaporation	e
Potential evaporation	pev
Surface runoff	sro
Sub-surface runoff	ssro
Total precipitation	tp

*Las variables "Levels" son datos multicapa ofreciendo un valor para cada en los siguientes estratos. Capa 1º: 0-7; 2º: 7-28; 3º: 28-100; 4º: 100-289 cm.

2.3. Conjunto EU-SoilHydroGrids (EU-SHG)

De todos los conjuntos de datos disponibles en EU-SHG, se han seleccionado, el contenido de agua de saturación (THS) y la capacidad de campo (FC), ya que ambos parámetros son fundamentales para caracterizar la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo y la generación de escorrentía. La información se facilita a una resolución espacial de 250 m, para las que se suministran valores en siete profundidades: 0, 5, 15, 30, 60, 100 y 200 cm.

2.4. Armonización de las bases de datos

La información de las SWV, y EU-SHG se refirieren a estratos de distintos espesores por lo que ha sido necesario llevar a cabo una armonización de ambas bases de datos (Fig. 1). Se ha efectuado una normalización por estratos de las 5 primeras capas del grupo EU-SHG (SH_{ij}), respecto a las SWVL de ERA5-Land ($SWVL_i$), generado las nuevas capas armonizadas SHL_{ji} (*soil hydro layer*) según la media ponderada de los valores medidos en cada estrato.

Además, se han agregado los principales estratos en función de la profundidad, generando dos nuevas capas: $SWVL_{12}$ y $SWVL_{123}$; junto con SHL_{12} y SHL_{123}, respectivamente, calculando de nuevo el promedio ponderado por el espesor.

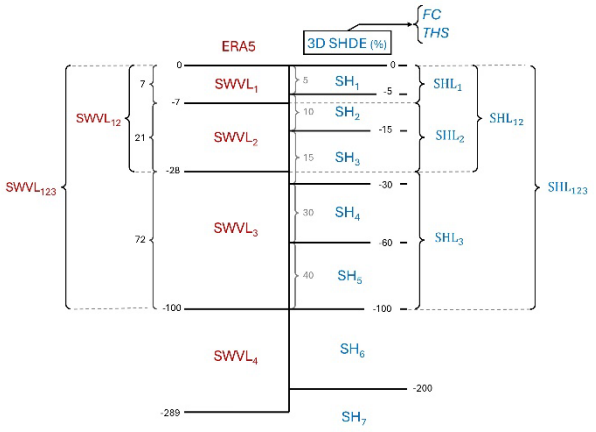


Figura 1. Esquema de profundidad de capas de suelo de los grupos SWVL (ERA5) y EU-SHG (cotas en cm).

Una vez generadas todas las capas armonizadas se han obtenido los nuevos predictores relativos a la humedad del suelo, denominados SM_{ji} (*soil moisture*) obteniendo la diferencia entre el valor registrado en las capas $SWVL_i$ y el valor de referencia de SHL_{ji}, valores positivos indican exceso de humedad respecto el valor de referencia y los valores negativos déficit.

$$SM_{ji} = SWVL_i - SHL_{ji}$$

donde *i* se refiere al estrato:1, 2, 3, 12, 123 y *j* se refiere al parámetro FC o THS.

2.5. Algoritmo de aprendizaje automático

Para el entrenamiento de los modelos se utilizó Random Forest (RF) de la librería *Scikit-learn* (Pedregosa *et al*., 2011). RF permite interpretar fácilmente la importancia de los predictores y previamente ha sido validado para la estimación de caudales horarios (Cisterna-García *et al*., 2025). La serie temporal se dividió en un conjunto de entrenamiento (80 %) y otro de test (20 %), sobre el cual se ha evaluado la eficiencia de la simulación. Para que el modelo pueda capturar el retardo en la respuesta hidrológica de la cuenca, para cada dato de medición de Q, se calculan los datos con lags horarios hasta 24h antes de la medición de Q en la estación de aforo.

2.6. Modelos

Se han planteado distintas combinaciones de los grupos de predictores (Tabla 2) para alizar la eficacia de incorporar estos parámetros en la modelización hidrológica.

Tabla 2. Modelos, grupo de predictores y número (n) de predictores en cada modelo.

Modelo	ERA5-L	SWVL	EU-SHG	n
QRF_M1	X			3975
QRF_M2	X	X		5325
QRF_M3	X	X	X	7525
QRF_M4	X		X	6225

2.7. Medida de la Eficiencia

La eficiencia de los modelos se ha evaluado mediante un conjunto de indicadores estadísticos ampliamente utilizados en la modelación hidrológica (Moriasi *et al*., 2015). En particular, se han utilizado las métricas KGE (*Kling-Gupta Efficiency*) y NSE (N*ash–Sutcliffe Efficiency*), MAE (*Error Absoluto Medio*) y RMSE (*Raíz del Error Cuadrático Medio)*, R2 y Pbias (sesgo porcentual).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Eficiencia de los modelos

La Tabla 3 muestra los valores de eficiencia obtenidos para cada modelo evaluado.

Tabla 3. Evaluación de la eficiencia de los caudales simulados

Modelo	NSE	KGE	RMSE	MAE	PBIAS
QRF_M1	0.960	0.908	2.048	0.303	0.10
QRF_M2	0.969	0.938	1.800	0.231	-0.10
QRF_M3	**0.970**	**0.943**	**1.781**	**0.227**	**-0.10**
QRF_M4	0.967	0.939	1.860	0.238	0.00

En general, todos los modelos presentan una eficiencia muy alta, con valores elevados de NSE y KGE, así como bajos errores (RMSE y MAE) y sesgos porcentuales cercanos a cero. Entre ellos, el modelo QRF_M3 es el que mejor rendimiento global tiene, seguido muy de cerca por QRF_M2 y QRF_M4, que también muestran un ajuste excelente. Por su parte, QRF_M1, presenta valores ligeramente inferiores en comparación con los demás modelos.

De acuerdo con los criterios de evaluación propuestos por Moriasi *et al*. (2015), la eficiencia de los modelos es excelente, destacando el modelo QRF_M3 como el de mejor rendimiento global, alcanzando eficiencias ligeramente superiores a los obtenidos en Cisterna-García *et al*. (2025) que obtuvieron valores del NSE de 0.921 y superiores a los resultados obtenidos en Mimeau *et al*. (2024) que obtuvieron KGE de 0.76 (ambos trabajos simulaban caudales horarios con RF)

La Figura 2 muestra la serie temporal completa (Fig. 2a) y el detalle del evento de diciembre del 2022 (Fig. 2c) correspondiente al paso de la borrasca Efraín. Las métricas de eficiencia y la capacidad de simular los picos de avenidas (Fig. 2b) son superiores a otros trabajos similares como Schoppa *et al*. (2020), si bien en este caso la escala temporal era diaria.

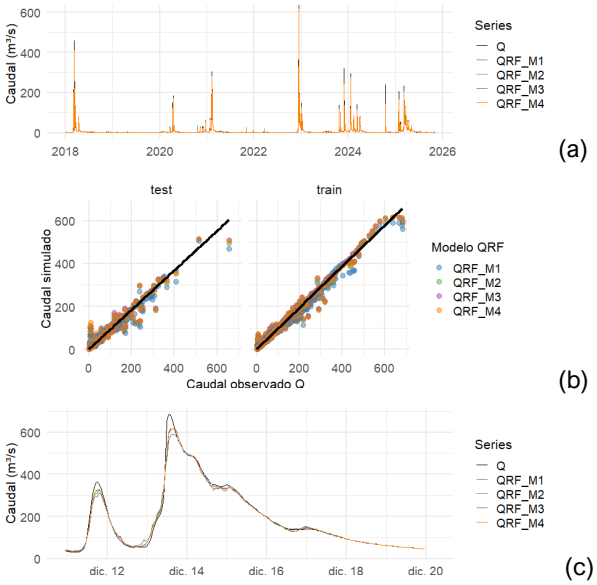


Figura 2. Hidrograma de caudal observado (Q) y caudales simulados (QRF_i) (a) serie temporal 2018 a 2025; (b) diagrama de dispersión (c) evento de diciembre del 2022

3.2. Importancia de los predictores

La Figura 3 muestra la importancia de los predictores utilizados en cada modelo, agrupados por categorías. La simulación RF1, solo cuenta con predictores del grupo ERA5 por lo que es la única fuente de información predictiva. En el caso del RF2, en el que se incluyen además los predictores derivados del grado de saturación, se observa como los predictores del grupo SWVL presentan una importancia (0.74) muy superior al resto de los predictores del ERA5, que pasa a tener un grado de contribución secundario (0.26). El modelo RF3, los nuevos predictores SHG, adquieren en conjunto mayor representatividad alcanzado 0.47 frente a 0.32 de las SWV, destacando que son los predictores del grupo EU-SHG.FC los más importantes (0.28). En el último de

los modelos, los predictores, de los grupos EU-SHG, especialmente EU-SHG.FC (0.41) y EU-SHG.THS (0.31), predominan sobre el los del ERA5 (0.28).

Los resultados muestran que los grupos vinculados a las condiciones hidrológicas del suelo y a su estado relativo de saturación (especialmente los asociados a EU-SHG y SWVL, según el modelo) concentran una parte sustancial de la importancia predictiva. En particular, los predictores asociados al exceso o déficit del grado de saturación del suelo respecto a la capacidad de campo (FC) son, en conjunto, los de mayor relevancia. Entre estos, las variables de las capas superficiales del terreno hasta los 21 cm de profundidad (smfc2 y smfc12) destacan por su contribución, no solo en el modelo EU-SHG (RF4) sino también en el modelo combinado con variables SWVL (RF3) donde presentan una importancia aún mayor. Este resultado es coherente con la base física del proceso hidrológico, donde el grado de saturación controla la generación de escorrentía.

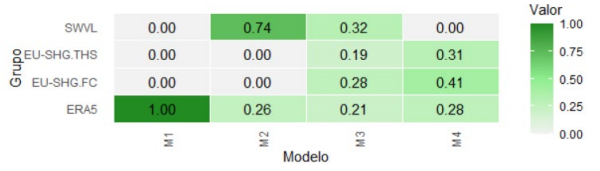


Figura 3. Importancia relativa de los predictores agrupadas en cada categoría.

4. CONCLUSIONES

La integración de variables meteorológicas de ERA5-Land y propiedades hidráulicas del suelo procedentes de EU-SoilHydroGrids permite mejorar la estimación hidrológica mediante modelos de aprendizaje automático, como Random Forest. Todos los modelos evaluados muestran un rendimiento excelente, resultando que el modelo que fusiona ambas bases de datos es el de mejor comportamiento global, con capacidad para reproducir adecuadamente la dinámica del caudal y los picos de avenida.

El análisis de importancia de predictores evidencia que las variables relacionadas la humedad y el grado de saturación del suelo, especialmente respecto de la capacidad de campo (FC), son los principales factores explicativos del modelo, en concordancia con el papel físico del estado de saturación en la generación de escorrentía.

En conjunto, el estudio demuestra que la incorporación explícita de propiedades hidráulicas del suelo como predictores mejora la representación de las condiciones de humedad y mejora la capacidad de la simulación hidrológica basada en aprendizaje automático con Random Forest.

5. AGRADECIMIENTOS

Cofinanciado por la Unión Europea a través del Programa Interreg VI-A España-Portugal (POCTEP) 2021-2027.
"Redes de alertas tempranas, para la teledetección de riesgos derivados del cambio climático, por satélites de observación de la tierra para respuesta de protección civil (RAT_EOS_PC)".

6. REFERENCIAS

Cisterna-García, A., González-Vidal, A., Martínez-Ibarra, A., Ye, Y., Guillén-Teruel, A., Bernal-Escobedo, L., & Skarmeta, A. F. (2025). Artificial intelligence for streamflow prediction in river basins: A use case in Mar Menor. Scientific Reports, 15, 19481. https://doi.org/10.1038/s41598-025-04524-0

Mimeau, L., Künne, A., Branger, F., Kralisch, S., Devers, A., & Vidal, J.-P. (2024). Flow intermittence prediction using a hybrid hydrological modelling approach: Influence of observed intermittence data on the training of a random forest model. *Hydrology and Earth System Sciences, 28*, 851–871. https://doi.org/10.5194/hess-28-851-2024

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. Transactions of the ASABE, 58(6), 1763-1785. https://doi.org/10.13031/trans.58.10715

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data, 13*(9), 4349-4383. https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021

Panagos, P., Van Liedekerke, M., Borrelli, P., Köninger, J., Ballabio, C., Orgiazzi, A., Lugato, E., Liakos, L., Hervás, J., Jones, A., & Montanarella, L. (2022). *European Soil Data Centre 2.0: Soil data and knowledge in support of EU policies. European Journal of Soil Science, 73*(6), e13315. https://doi.org/10.1111/ejss.13315

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M. y Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, *12*, 2825–2830

Schoppa, L., Disse, M., & Bachmair, S. (2020). Evaluating the performance of random forest for large-scale flood discharge simulation. *Journal of Hydrology, 590*, 125531. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125531

Tóth, B., Weynants, M., Pásztor, L., & Hengl, T. (2017). 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. *Hydrological Processes, 31*(14), 2497–2666. https://doi.org/10.1002/hyp.11203

Tripathy, K. P., & Mishra, A. K. (2024). Deep learning in hydrology and water resources disciplines: Concepts, methods, applications, and research directions. *Journal of Hydrology, 628*, 130458. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130458


1000

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.273

Desarrollo de una aplicación en Google Earth Engine para la monitorización de masas de agua mediante teledetección

Alvarado Fernández, Miguel Ramón [1] **Quirós, Elia** [2] **Fragoso-Campón, Laura** [2]

[1] TRAGSATEC

[2] Universidad de Extremadura, España

ORCID: Quirós 0000-0002-8429-045X Fragoso-Campón 0000-0003-0397-6247

Correspondencia: malvarad@tragsa.es equiros@unex.es laurafragoso@unex.es

RESUMEN

La monitorización de las masas de agua superficiales es clave para la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en el contexto del cambio climático. Sin embargo, el procesamiento de grandes volúmenes de imágenes satelitales supone una barrera técnica y computacional que limita su aplicación operativa. Este trabajo presenta una aplicación web interactiva desarrollada en Google Earth Engine (GEE) para la monitorización sistemática y el análisis cuantitativo de superficies de agua. La herramienta automatiza el flujo de trabajo completo, desde la selección y filtrado de imágenes Sentinel-2 hasta la clasificación y estimación de superficies inundadas. Su principal aportación radica en la integración de un motor de análisis robusto que combina el cálculo de índices espectrales ampliamente validados (NDWI, MNDWI y AWEI) con la comparación de múltiples algoritmos de umbralización automática (Otsu, Valle, Error Mínimo y Máxima Entropía). La aplicación reduce significativamente la complejidad del análisis, facilitando y ampliando el acceso a la monitorización de recursos hídricos a gran escala. La validación de los resultados generados por la aplicación se ha realizado tomando como referencia la serie temporal del Embalse de Villar del Rey gestionado por la Confederación Hidrográfica del Guadiana.

Palabras clave: *Monitorización de aguas superficiales; Índices de agua; Métodos de umbralización automática; Teledetección; Sentinel-2*

Fecha de recepción: 19 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Desarrollo de una aplicación en Google Earth Engine para la monitorización de masas de agua mediante teledetección

Alvarado Fernández, Miguel Ramón [(1)], Quirós, Elia [(2)], Fragoso-Campón, Laura [(2)]
[(1)] TRAGSATEC.
malvarad@tragsa.es.
[(2)] Universidad de Extremadura, España.
0000-0002-8429-045X, equiros@unex.es ; 0000-0003-0397-6247, laurafragoso@unex.es

Resumen: La monitorización de las masas de agua superficiales es clave para la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en el contexto del cambio climático. Sin embargo, el procesamiento de grandes volúmenes de imágenes satelitales supone una barrera técnica y computacional que limita su aplicación operativa. Este trabajo presenta una aplicación web interactiva desarrollada en Google Earth Engine (GEE) para la monitorización sistemática y el análisis cuantitativo de superficies de agua. La herramienta automatiza el flujo de trabajo completo, desde la selección y filtrado de imágenes Sentinel-2 hasta la clasificación y estimación de superficies inundadas. Su principal aportación radica en la integración de un motor de análisis robusto que combina el cálculo de índices espectrales ampliamente validados (NDWI, MNDWI y AWEI) con la comparación de múltiples algoritmos de umbralización automática (Otsu, Valle, Error Mínimo y Máxima Entropía). La aplicación reduce significativamente la complejidad del análisis, facilitando y ampliando el acceso a la monitorización de recursos hídricos a gran escala. La validación de los resultados generados por la aplicación se ha realizado tomando como referencia la serie temporal del Embalse de Villar del Rey gestionado por la Confederación Hidrográfica del Guadiana.

Palabras clave: Monitorización de aguas superficiales; Índices de agua; Métodos de umbralización automática; Teledetección; Sentinel-2

Development of a Google Earth Engine application for water body monitoring using remote sensing.

Abstract:. *Monitoring surface water bodies is essential for the sustainable management of water resources, particularly in the context of climate change. However, processing large volumes of satellite imagery represents a significant technical and computational barrier that limits operational implementation. This study presents an interactive web application developed on Google Earth Engine (GEE) for the systematic monitoring and quantitative analysis of surface water extent. The tool automates the entire workflow, from Sentinel-2 image selection and filtering to classification and estimation of inundated areas. Its main contribution lies in the integration of a robust analytical engine that combines the computation of widely validated spectral indices (NDWI, MNDWI, and AWEI) with the comparison of multiple automatic thresholding algorithms (Otsu, Valley, Minimum Error, and Maximum Entropy). The application significantly reduces analytical complexity, facilitating and broadening access to large-scale water resource monitoring. The results were validated using the time series of the Villar del Rey Reservoir, managed by the Guadiana River Basin Authority..*

Keywords: *Surface water monitoring; Water indices; automatic thresholding methods; Remote Sensing; Sentinel-2*

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso estratégico esencial para la vida, el desarrollo socioeconómico y el equilibrio de los ecosistemas. En regiones semiáridas como la cuenca mediterránea, la gestión de los recursos hídricos superficiales supone un reto prioritario, por lo que la monitorización continua de las masas de agua, especialmente embalses, es clave para una gestión sostenible. Actualmente, su delimitación y seguimiento se realiza mediante sensores remotos, destacando los índices espectrales, que identifican el agua a partir de sus propiedades de reflectancia en distintas longitudes de onda (Gao, 2015; Pekel *et al*., 2016).

No obstante, el procesamiento de grandes volúmenes de imágenes satelitales para análisis temporales ha sido tradicionalmente una limitación técnica y computacional. La computación en la nube, especialmente Google Earth Engine (GEE), ha transformado este escenario al permitir análisis espaciales y temporales a gran escala (Gorelick *et al*., 2017).

El principal objetivo del trabajo es desarrollar y validar una aplicación web interactiva y fácilmente escalable en la plataforma GEE para aplicarla a la monitorización sistemática y automatizada de la superficie de masas de agua. La validación de los resultados generados por la aplicación se ha realizado tomando como referencia la serie temporal del Embalse de Villar del Rey gestionado por la Confederación Hidrográfica del Guadiana.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Arquitectura y fuente de datos

La aplicación funciona bajo un modelo *Software as a Service* (SaaS) sobre la plataforma GEE. La herramienta procesa la colección COPERNICUS S2 SR HARMONIZED (Sentinel-2 L2A), normalizando la resolución espacial a 10 metros y permitiendo una monitorización con frecuencia de revisita aproximada de 5 días, sin requerir almacenamiento local. La Figura 1 muestra el esquema de la arquitectura lógica y el flujo de datos de la aplicación.

2.1.1. Flujo de trabajo automatizado

El núcleo de la aplicación ejecuta una secuencia de análisis lineal que automatiza las fases de teledetección tradicional en tiempo real.

2.1.2. Parametrización y filtrado

Para asegurar series temporales homogéneas, la aplicación filtra las imágenes dentro del Área de Interés (AOI) usando la banda de clasificación de escena (SCL) de Sentinel-2. Primero descarta escenas con demasiada nubosidad en el AOI y, de forma opcional, aplica un enmascaramiento dinámico por píxel para eliminar nubes, cirros y sombras, reduciendo falsos positivos.

Con ese fin se ha implementado además un filtro opcional de cobertura espacial completa (100% del AOI), así como una función de unicidad temporal que elimina duplicidades por solape orbital, generando un mosaico único por fecha.

2.1.3. Procesamiento y clasificación por escena

Cada imagen válida se procesa en tres pasos: recorte exacto al AOI para limitar los cálculos a la zona de estudio; cálculo de índices espectrales y posible combinación booleana (AND/OR) entre ellos; umbralización automática mediante métodos no supervisados (Otsu, Valle, Mínimo Error y Máxima Entropía) para separar agua y no-agua de forma objetiva en cada fecha.

2.1.4. Estrategia de análisis temporal

La clasificación puede realizarse con tres enfoques: umbral fijo, umbral dinámico o umbral consolidado, según el criterio de análisis temporal deseado.

2.1.5. Cuantificación de superficie

El área se calcula directamente en formato ráster, evitando la vectorización para mantener la precisión del sensor. Se cuentan los píxeles clasificados como agua dentro del AOI y, con resolución de 10 m, se convierten a hectáreas usando el factor 0,01 (1 píxel = 100 m²), evitando errores geométricos de generalización.

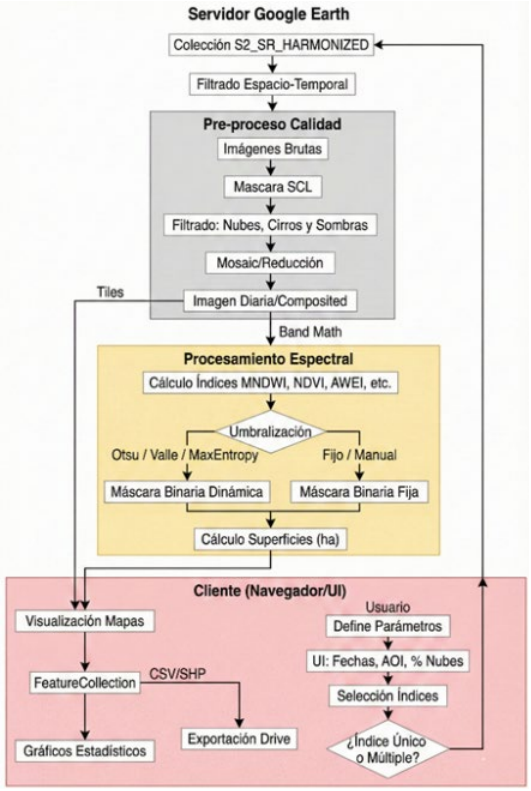


Figura1. Esquema de la arquitectura lógica y flujo de datos de la aplicación desarrollada en Google Earth Engine.

2.2. Generación de productos y capacidades operacionales

La fase final integra los datos procesados en productos claros y exportables: visualización geoespacial de las imágenes resultantes y análisis estadístico mediante tablas y gráficos interactivos que permiten comparar tendencias entre índices o métodos de umbralización. Finalmente, los resultados pueden exportarse y utilizarse en otros entornos o sistemas.

2.3. Caso de estudio y evaluación de la exactitud

La validación de los resultados de la aplicación se realizó utilizando como referencia la serie temporal del Embalse de Villar del Rey, gestionado por la Confederación Hidrográfica del Guadiana (E2-24). El Sistema Integrado de Redes Automáticas (SIRA) registra de forma continua el nivel del embalse, a partir del cual se calculan el volumen almacenado y la superficie inundada mediante la curva cota–superficie definida en las normas de explotación de la presa.

Para cuantificar la superficie del embalse, se han usado un conjunto representativo de índices espectrales y técnicas de teledetección, abarcando desde estándares consolidados, como el NDWI y el MNDWI, incluyendo una modificación de este último para entornos de alta reflectividad, hasta algoritmos específicos para escenarios complejos. Entre estos últimos, se ha implementado el AWEI (Feyisa *et al*., 2014) para la supresión de sombras, así como el LSWI (Xiao *et al*., 2004) y el SWI (Jiang *et al*., 2020) para evaluar las

condiciones de turbidez y vegetación. Adicionalmente, se ha incluido el clasificador lógico WIW, y el análisis directo de las bandas individuales B2, B8 y B11, con el objetivo de aislar la respuesta radiométrica pura del agua.

La segmentación automática de la superficie inundada se realizó mediante el método de Otsu, un algoritmo no supervisado que determina el umbral óptimo de separación en histogramas bimodales, eliminando la subjetividad del operador frente a la variabilidad radiométrica de las bandas (Fisher *et al*., 2016, Du *et al*., 2016).

Además, el estudio aplicó una estrategia de fusión lógica multivariable mediante operadores booleanos AND/OR que combinan índices y bandas. Esta aproximación permite analizar los límites del rendimiento: la lógica inclusiva (OR) aumenta la sensibilidad y reduce errores de omisión, mientras que la lógica restrictiva (AND) mejora la especificidad y minimiza falsos positivos en entornos mixtos, siguiendo enfoques de fusión a nivel de decisión ampliamente validados en la literatura (Fisher *et al*., 2016; Mueller *et al*., 2016).

Para evaluar el ajuste entre ambas series se han calculado métricas de eficiencia ampliamente empleadas en la validación de modelos ambientales: el error absoluto medio (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2).

Con el fin de obtener el rendimiento global de cada modelo, se ha realizado una evaluación multicriterio, habitual en la validación comparativa de modelos hidrológicos (Moriasi *et al*., 2015), definiendo un índice compuesto (Score) basado en la ponderación de dichas métricas (RMSE = 0,5; MAE = 0,3; R^2 = 0,2).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Productos generados en la app

La Figura 2, muestra a modo de ejemplo, el visor de mapas con el cálculo del índice MNDWI sobre un AOI del embalse de Villar del Rey, con activación del Inspector de píxeles dinámico y resultado de la masa de agua delimitada en la combinación booleana OR de los índices espectrales MNDWI y AWEI SH.

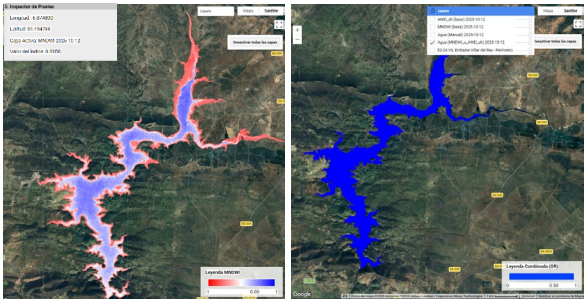


Figura 2. Interfaz de la app. (a)Visor de mapas con el cálculo del índice MNDWI sobre un AOI del embalse de Villar del Rey (b) resultado de la masa de agua delimitada en la combinación booleana OR de los índices espectrales MNDWI y AWEI SH

3.2. Evaluación de la exactitud

La Figura 3 muestra las series temporales obtenidas en cada caso.

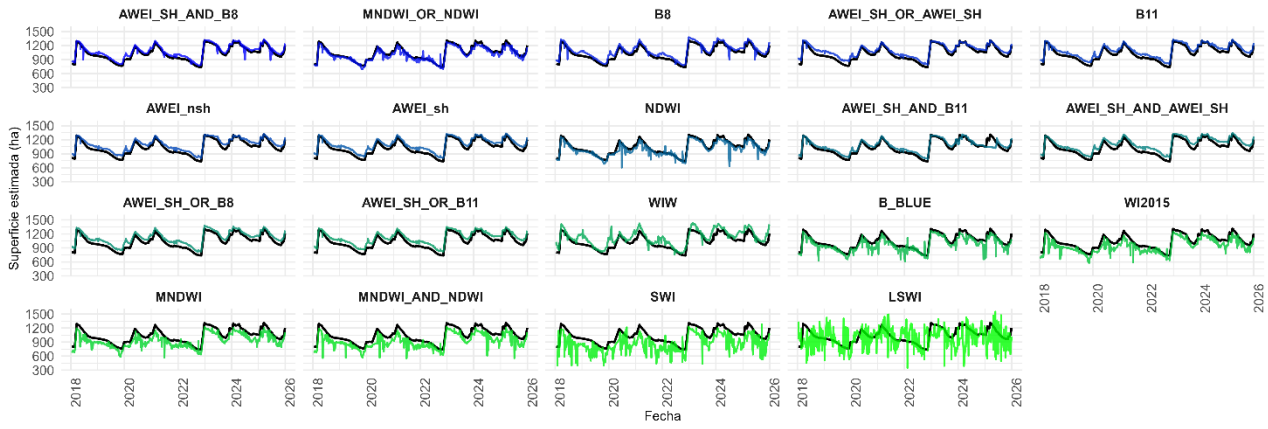


Figura 3. Series temporales obtenidas para cada uno de los modelos analizados.

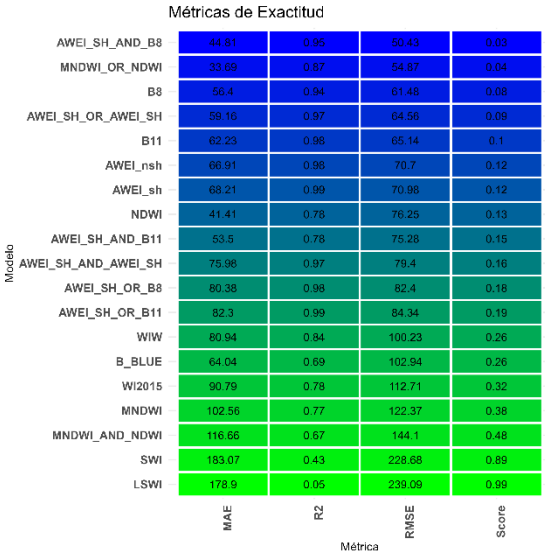
La Figura 4a muestra los resultados de la eficiencia ordenados según el Score obtenido (el valor del Score indica que a valores más bajos mejor ajuste con la serie de referencia). Las simulaciones de los índices AWEI_SH_AND_B8, MNDWI_OR_NDWI; B8, AWEI_SH_OR_AWEI_SH, B11 y AWEI_nsh, se sitúan entre las seis mejores según el valor del Score.

La Figura 4b muestra los diagramas de dispersión, entre la superficie estimada y la superficie de referencia, y se observa que las seis mejores simulaciones presentan un comportamiento consistente y lineal, con puntos cercanos a la recta 1:1, lo que confirma una buena capacidad predictiva general. Existe ligera dispersión creciente en valores altos de superficie, lo que podría indicar mayor incertidumbre en áreas extensas. Además, no se observan sesgos sistemáticos severos de sobreestimación o subestimación.

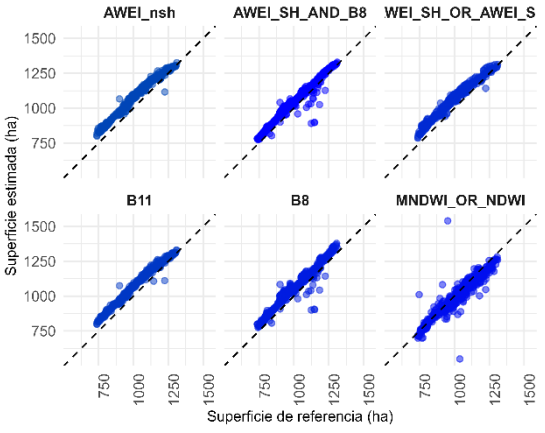
3.3. Acceso a la aplicación

La aplicación está disponible en la siguiente URL:

https://ee-tragsatecdigi.projects.earthengine.app/view/monitorizacin-de-masas-de-agua



(a)



(b)

Figura 4. Métricas de la exactitud (a) resultados de eficiencia y (b) dispersión de los 6 mejores modelos según Score.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado con éxito una aplicación funcional en Google Earth Engine que automatiza y simplifica un flujo de trabajo complejo de teledetección. La herramienta encapsula en una interfaz intuitiva la adquisición de datos, el pre-procesamiento avanzado y la clasificación, demostrando la viabilidad de GEE para crear soluciones operativas accesibles. La integración y comparativa de múltiples índices y bandas espectrales añadido a las combinaciones booleanas de los mismos, permite evaluar simultáneamente diferentes resultados para un mismo escenario en un rango temporal variable de una forma ágil, superando así el principal obstáculo de esta técnica de análisis científico, facilitando su empleo por usuarios no expertos y ampliando su proyección ensanchando su base de potenciales usuarios.

5. AGRACEDIMIENTOS

Los autores agradecen a la Confederación Hidrográfica del Guadiana la disponibilidad de los datos de la curva cota-superficie y la serie temporal del embalse de Villar del Rey, registrados por el sistema SIRA Guadiana, fundamentales para la validación de los resultados.

6. REFERENCIAS

Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*, *8*(4), 354. https://doi.org/10.3390/rs8040354

Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment, 140,* 23–35. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2013.08.029

Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment, 175*, 167-182. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055

Gao, H. (2015). Satellite remote sensing of large lakes and reservoirs: From elevation to storage. Wiley Interdisciplinary Reviews: *Water, 2*(2), 147–157. https://doi.org/10.1002/wat2.1065

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment, 202,* 18-27.

Jiang, W., Ni, Y., Pang, Z., Li, X., Ju, H., He, G., Lv, J., Yang, K., Fu, J., & Qin, X. (2021). An Effective Water Body Extraction Method with New Water Index for Sentinel-2 Imagery. *Water, 13*(12), 1647. https://doi.org/10.3390/w13121647

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE, 58*(6), 1763-1785. https://doi.org/10.13031/trans.58.10715

Mueller, N., Lewis, A., Roberts, D., Ringin, G., Melrose, R., Sixsmith, J., Lymburner, L., McIntyre, A., Tan, P., Curnow, S., & Ip, A. (2016). Water observations from space: Mapping surface water from 1987 to 2014 using the entire Australian Landsat archive. *Remote Sensing of Environment*, *174*, 341–352. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.018

Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature, 540*(7633), 418–422. https://doi.org/10.1038/nature20584

Xiao, X., Boles, S., Frolking, S., Li, C., Babu, J. Y., Salas, W., & Moore, B. (2004). Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment, 90*(4), 485–496. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.004

SESIÓN 11

Geología, Mineralogía, Petrología y Geomorfología

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.149

Caracterización de residuos mineros sulfurosos mediante imagen hiperespectral UAS de alta resolución: mina de Lagunazo (SO de España)

Moreno González, Raúl [1] **Curcio, Andrea** [2] **Isgró, Melisa** [1] **Barbero, Luis** [1] **Basallote, María Dolores** [3]

[1] Universidad de Cádiz, España

[2] Eye4sky Technologies

[3] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, CSIC

ORCID: Moreno González 0000-0002-5679-2110 Curcio 0000-0002-3374-5151 Isgró 0000-0003-2194-8020 Barbero 0000-0002-3513-2025 Basallote 0000-0003-2011-3806

Correspondencia: raul.morenogonzalez@uca.es acc@eye4sky.com melisa.isgrochi@alum.uca.es luis.barbero@uca.es mdolores.basallote@csic.es

RESUMEN

Los residuos mineros de sulfuros constituyen focos de contaminación ambiental debido a la generación de drenaje ácido de mina (AMD) y a la elevada heterogeneidad mineralógica de sus superficies. El enfoque tradicional basado en muestreos puntuales presenta limitaciones en la captura de la variabilidad espacial, dificultando la delimitación de zonas activas de generación de acidez y movilización de elementos potencialmente tóxicos. En este estudio se evalúa el potencial de la teledetección hiperespectral desde plataforma UAS para la caracterización mineralógica de alta resolución de residuos de la mina de Lagunazo, en la Faja Pirítica Ibérica (SO de España). La identificación mineralógica se abordó mediante extracción de endmembers y desmezcla espectral por mínimos cuadrados no negativos, empleando librerías espectrales de referencia y validación cualitativa con difracción de rayos X (XRD). Este enfoque permitió definir asociaciones minerales realistas, formadas por combinaciones óptimas de 2–3 fases, que reflejan distintos estadios de la evolución paragénetica del AMD. La distribución espacial de estas facies revela tres dominios geoquímicos principales: (i) un dominio sulfuro-reactivo en el sector occidental, dominado por pirita y cuarzo; (ii) un dominio oxidativo avanzado en la zona central, dominado por goethitas y hematites, asociado a superficies más evolucionadas y relativamente estables; y (iii) un dominio transicional en el sector oriental, caracterizado por la coexistencia de óxidos de Fe y sulfatos férricos hidratados altamente solubles. Aunque estas sales secundarias actúan como reservorios temporales de acidez y metales durante los periodos secos, y su rápida disolución tras los primeros episodios de lluvia genera picos de contaminación que incrementan la carga contaminante transportada hacia los sistemas de drenaje superficial. En conjunto, los resultados evidencian el alto potencial de la teledetección hiperespectral UAS para identificar focos activos de contaminación y apoyar la priorización de medidas de gestión y restauración ambiental en entornos mineros abandonados.

Palabras clave: *Teledetección hiperespectral; UAS; Residuos mineros; Unmixing espectral*

Fecha de recepción: 10 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 10 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Caracterización de residuos mineros sulfurosos mediante imagen hiperespectral UAS de alta resolución: mina de Lagunazo (SO de España)

Moreno González, Raúl [(1)], Curcio, Andrea [(2)], Isgró, Melisa [(1)], Barbero, Luis [(1)], Basallote, María Dolores [(3)]

[(1)] Universidad de Cádiz, España.

0000-0002-5679-2110, raul.morenogonzalez@uca.es

0000-0003-2194-8020, melisa.isgrochi@alum.uca.es ; 0000-0002-3513-2025, luis.barbero@uca.es.

[(2)] Eye4sky Technologies.

0000-0002-3374-5151, acc@eye4sky.com.

[(3)] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, CSIC.

0000-0003-2011-3806, mdolores.basallote@csic.es.

Resumen: Los residuos mineros de sulfuros constituyen focos de contaminación ambiental debido a la generación de drenaje ácido de mina (AMD) y a la elevada heterogeneidad mineralógica de sus superficies. El enfoque tradicional basado en muestreos puntuales presenta limitaciones en la captura de la variabilidad espacial, dificultando la delimitación de zonas activas de generación de acidez y movilización de elementos potencialmente tóxicos. En este estudio se evalúa el potencial de la teledetección hiperespectral desde plataforma UAS para la caracterización mineralógica de alta resolución de residuos de la mina de Lagunazo, en la Faja Pirítica Ibérica (SO de España). La identificación mineralógica se abordó mediante extracción de *endmembers* y desmezcla espectral por mínimos cuadrados no negativos, empleando librerías espectrales de referencia y validación cualitativa con difracción de rayos X (XRD). Este enfoque permitió definir asociaciones minerales realistas, formadas por combinaciones óptimas de 2–3 fases, que reflejan distintos estadios de la evolución paragénetica del AMD. La distribución espacial de estas facies revela tres dominios geoquímicos principales: (i) un dominio sulfuro-reactivo en el sector occidental, dominado por pirita y cuarzo; (ii) un dominio oxidativo avanzado en la zona central, dominado por goethitas y hematites, asociado a superficies más evolucionadas y relativamente estables; y (iii) un dominio transicional en el sector oriental, caracterizado por la coexistencia de óxidos de Fe y sulfatos férricos hidratados altamente solubles. Aunque estas sales secundarias actúan como reservorios temporales de acidez y metales durante los periodos secos, y su rápida disolución tras los primeros episodios de lluvia genera picos de contaminación que incrementan la carga contaminante transportada hacia los sistemas de drenaje superficial. En conjunto, los resultados evidencian el alto potencial de la teledetección hiperespectral UAS para identificar focos activos de contaminación y apoyar la priorización de medidas de gestión y restauración ambiental en entornos mineros abandonados.

Palabras clave: Teledetección hiperespectral; UAS; Residuos mineros; Unmixing espectral.

***Abstract**: Mining sulfide wastes constitute sources of environmental contamination due to the generation of acid mine drainage (AMD) and the high mineralogical heterogeneity of their surfaces. The traditional approach based on point sampling has limitations in capturing spatial variability, making it difficult to delineate active zones of acid generation and mobilization of potentially toxic elements. In this study, the potential of UAS-based hyperspectral remote sensing is evaluated for the high-resolution mineralogical characterization of wastes from the Lagunazo mine, located in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). Mineral identification was carried out through endmember extraction and non-negative least squares (NNLS) spectral unmixing, using reference spectral libraries and qualitative validation by X-ray diffraction (XRD). This approach made it possible to define realistic mineral associations, formed by optimal combinations of 2–3 phases, which reflect different stages in the paragenetic evolution of AMD. The spatial distribution of these facies reveals three main geochemical domains: (i) a sulfide-reactive domain in the western sector, dominated by pyrite and quartz; (ii) an advanced oxidative domain in the central zone, dominated by goethite and hematite, associated with more evolved and relatively stable surfaces; and (iii) a transitional domain in the eastern sector, characterized by the coexistence of Fe oxides*

and highly soluble hydrated ferric sulfates. Although these secondary salts act as temporary reservoirs of acidity and metals during dry periods, their rapid dissolution after the first rainfall events generates contamination peaks that increase the pollutant load transported to surface drainage systems. Overall, the results demonstrate the high potential of UAS hyperspectral remote sensing to identify active contamination hotspots and support the prioritization of environmental management and restoration measures in abandoned mining environments.

***Keywords**: Hyperspectral remote sensing; UAS; mine wastes; spectral unmixing.*

1. INTRODUCCIÓN

La exposición de materiales ricos en sulfuros a condiciones atmosféricas favorece reacciones de oxidación que generan lixiviados ácidos (drenaje ácido de minas, AMD) enriquecidos en metales, capaces de degradar suelos y masas de agua durante largos periodos de tiempo. En zonas mineras históricas, grandes volúmenes de residuos permanecen expuestos en superficie, actuando como fuentes crónicas de liberación de contaminantes. Los residuos de sulfuros acumulados en forma de escombreras son sistemas altamente heterogéneos desde el punto de vista físico y mineralógico. Los métodos tradicionales basados en muestreos puntuales y análisis mineralógicos resultan insuficientes para capturar adecuadamente esta complejidad espacial, lo que limita la correcta identificación de los focos activos de contaminación.

Las técnicas de teledetección, y en particular las imágenes hiperespectrales, ofrecen una herramienta muy potente para la caracterización de residuos mineros. Los óxidos e hidróxidos de Fe y los sulfatos secundarios presentan rasgos espectrales diagnósticos en VNIR–SWIR, lo que permite su identificación mediante su comparación con librerías espectrales de referencia, como la del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS; Crowley *et al*., 2003). La incorporación de sensores hiperespectrales en plataformas UAS ha supuesto un avance clave, al proporcionar resoluciones espaciales centimétricas que permiten analizar con gran detalle la heterogeneidad superficial de las escombreras.

Este trabajo se centra en la mina de Lagunazo (Fig. 1), localizada en la Faja Pirítica Ibérica (FPI). La FPI es una de las provincias metalogenéticas más importantes del mundo, caracterizada por sulfuros masivos dominados por contener pirita (FeS_2). La intensa actividad minera desarrollada en la FPI ha dejado numerosas explotaciones abandonadas, cortas mineras, galerías y grandes escombreras de residuos mineros (Grande *et al*., 2014). La mina de Lagunazo representa un ejemplo típico de explotación abandonada de sulfuros, donde importantes volúmenes de residuos mineros permanecen expuestos en superficie sin medidas de restauración. Estos residuos presentan una elevada heterogeneidad textural y composicional, incluyendo materiales gruesos de estéril y fracciones finas derivadas de los diversos tratamientos del mineral.

El objetivo de esta comunicación es presentar un estudio basado en imágenes hiperespectrales UAS en la mina de Lagunazo, orientado a (i) identificar y cartografiar minerales secundarios asociados a la alteración de residuos sulfurosos, (ii) interpretar los procesos geoquímicos dominantes a partir de las asociaciones minerales superficiales y (iii) evaluar el valor añadido de la teledetección hiperespectral para el análisis ambiental de zonas mineras abandonadas.

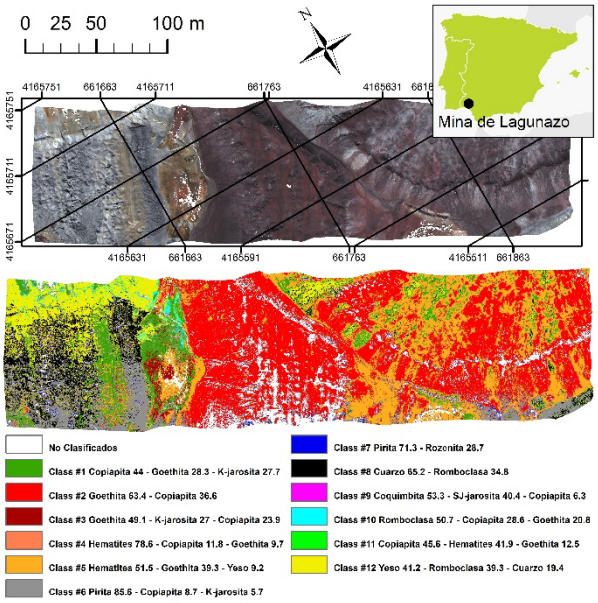


Figura 1. Mapa de los residuos mineros de la mina de Lagunazo (arriba) y clasificación mineralógica derivada de imágenes hiperespectrales (abajo).

2. METODOLOGÍA

Los vuelos se realizaron el 16 de mayo de 2023 sobre los residuos de la mina de Lagunazo mediante un UAS DJI Matrice 600 Pro equipado con un sensor hiperespectral Headwall VNIR–SWIR (400–2500 nm), con una resolución espectral aproximada de 6 nm en el rango VNIR y 8 nm en el rango SWIR, además de un sensor LiDAR. El LiDAR se empleó para generar un modelo digital de superficie (MDS) que permitió la correcta georreferenciación y ortorrectificación de los hipercubos. La misión se planificó con UgCS (120 m de altura, 5 m/s de velocidad y 40 % de solape lateral) bajo condiciones de iluminación homogénea, y la calibración radiométrica se realizó mediante una lona de referencia. Los datos VNIR y SWIR se procesaron de forma independiente en SpectralView (conversión a radiancia, corrección a reflectancia y ortorrectificación con SBET y MDS) y se fusionaron posteriormente en un mosaico VNIR–SWIR ortorrectificado y georreferenciado, con una resolución espacial final de 0,05 × 0,06 m.

El procesado posterior se realizó con ENVI v. 5.3.6. El sistema de referencia utilizado fue ETRS89 / UTM zona 29N (EPSG:25829). Para el análisis mineralógico se empleó el rango espectral comprendido entre 421 y 2449 nm, lo que dio lugar a un ortomosaico compuesto por 418 bandas espectrales explotables, abarcando de forma continua las regiones VNIR–SWIR. Previamente al análisis espectral, se aplicó una máscara para excluir áreas cubiertas por vegetación y cuerpos de agua, de manera que el estudio se centró exclusivamente en las superficies de residuos mineros. La transformación Minimum Noise Fraction (MNF) se aplicó para reducir el ruido de los datos hiperespectrales y resaltar la variabilidad espectral más relevante. Sobre 11 componentes MNF, se utilizó el Pixel Purity Index (PPI) junto con el análisis en el espacio n-dimensional (n-DV) para identificar los píxeles más puros y extraer *endmembers* espectrales representativos de las principales asociaciones mineralógicas presentes en los residuos mineros.

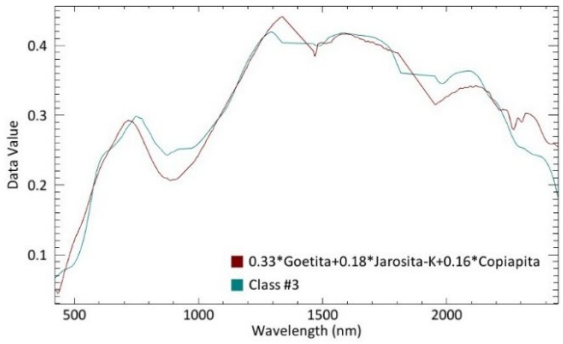


Figura 2. Comparación entre el *endmember* de la Clase 3 y su mejor mezcla mineralógica.

La caracterización mineralógica se llevó a cabo mediante desmezcla espectral lineal por mínimos cuadrados no negativos (NNLS), empleando la librería espectral mineralógica de la USGS como conjunto de *endmembers* de referencia (Fig. 2; Heinz & Chang, 2001; Clark *et al*., 2017). Para cada *endmenber*, el procedimiento consistió en: (i) identificar los minerales candidatos a partir de la similitud espectral con la librería; (ii) generar combinaciones de dos y tres minerales; (iii) ajustar cada combinación mediante NNLS, restringiendo las abundancias a valores no negativos; y (iv) comparar los ajustes obtenidos a partir del RMSE calculado entre el espectro observado y el espectro modelizado. La selección final de la mezcla óptima no se basó únicamente en el menor RMSE, sino también en la plausibilidad mineralógica de las asociaciones resultantes, evitando combinaciones espectralmente aceptables pero inconsistentes con el contexto mineralógico del área.

Los resultados de la desmezcla espectral se contrastaron con análisis mineralógicos independientes obtenidos mediante difracción de rayos X (XRD), realizados previamente (Rodrigo Molina, 2021). Esta validación permitió confirmar las principales fases minerales identificadas espectralmente y respaldar la interpretación de los ensamblajes mineralógicos derivados de la imagen hiperespectral.

3. RESULTADOS

La desmezcla espectral permitió descomponer cada clase en combinaciones óptimas de 2–3 minerales, obteniendo ensamblajes mineralógicos coherentes con el patrón espacial observado en la Figura 1. En conjunto, las clases no representan minerales “puros”, sino facies superficiales que reflejan distintos estadios de la evolución paragénetica bajo condiciones de drenaje ácido de mina. La correspondencia entre los ensamblajes identificados y los principales dominios superficiales cartografiados refuerza la consistencia mineralógica de los resultados.

Las facies dominadas por sulfuros se concentran en el sector occidental, donde predominan tonalidades grises (Fig. 1) asociadas a superficies dominadas por pirita y cuarzo. Estas clases representan los focos más activos de generación de AMD, al mantener un alto potencial de producción de acidez y movilización de metales. Esta interpretación se ve reforzada por la composición de los lixiviados que surgen de la escombrera sulfuro-reactiva, que presentan pH ácido y concentraciones muy elevadas de metales y metaloides (As hasta 2,1 mg/L, Fe hasta 407,5 mg/L, Pb hasta 0,4 mg/L y Zn hasta 16,6 mg/L), evidenciando una intensa movilización asociada a la oxidación de sulfuros primarios (Rodrigo Molina, 2021). En este mismo sector se identifican parches claros asociados a sales evaporíticas (copiapita, romboclasa, coquimbita, rozenita y yeso), interpretadas como precipitados superficiales bajo condiciones de elevada evaporación y déficit hídrico.

El sector central, caracterizado por tonalidades rojizas continuas (Fig. 1), está controlado por óxidos e hidróxidos de Fe^{3+}, con predominio de goethita y hematites. La desmezcla muestra composiciones entre ambas fases, coherentes con superficies altamente oxidadas y geoquímicamente evolucionadas, donde el Fe se ha inmovilizado mayoritariamente en minerales relativamente estables. Estas facies representan estadios avanzados de la paragénesis del AMD y, en términos relativos, un menor potencial de generación directa de contaminación. Esta interpretación se ve respaldada por la menor afección del lixiviado, que drena entre las escombreras central y oriental y presenta concentraciones significativamente más bajas de metales y metaloides (As 0,01 mg/L, Fe 6,5 mg/L, Pb 0,1 mg/L y Zn 2,5 mg/L) en comparación con los lixiviados asociados al dominio sulfuro-reactivo del sector occidental (Rodrigo Molina, 2021). No obstante, bajo condiciones suficientemente ácidas, estas fases férricas pueden redisolverse parcialmente y contribuir a la química de los lixiviados.

El sector oriental presenta un patrón mixto, con alternancia de tonalidades blanquecinas y rojizas (Fig. 1). En estas clases, la desmezcla indica la coexistencia de goethita–hematites con sulfatos férricos hidratados (p. ej., copiapita, romboclasa, coquimbita y rozenita), lo que sugiere superficies sometidas a ciclos repetidos de oxidación, disolución y reprecipitación de sales. Desde el punto de vista ambiental, este dominio combina fases relativamente estables (óxidos de Fe) con fases altamente solubles (sales evaporíticas), que actúan como reservorios temporales de acidez y metales y

pueden generar picos de contaminación durante los primeros eventos de lluvia. La composición del lixiviado (Rodrigo Molina, 2021), con concentraciones moderadas de Fe y metales traza, es coherente con este comportamiento transicional entre los dominios sulfuro-reactivo y oxidativo avanzado, pero manteniendo un potencial de movilización asociado a la disolución episódica de sales.

En conjunto, la distribución espacial de los ensamblajes identificados por la desmezcla permite distinguir de forma continua (i) focos sulfuro-reactivos en el oeste (pirita–cuarzo), (ii) un dominio oxidativo estable en la zona central (goetita–hematita) y (iii) un dominio oriental de comportamiento transicional, controlado por óxidos de Fe y sales evaporíticas altamente solubles.

4. CONCLUSIONES

La imagen hiperespectral adquirida desde plataforma UAS permitió caracterizar con alta resolución espacial los principales ensamblajes mineralógicos de los residuos de la mina de Lagunazo, evidenciando una marcada heterogeneidad superficial que no puede capturarse mediante muestreo puntual. La distribución espacial de las facies permitió diferenciar tres dominios geoquímicos principales: (i) un dominio sulfuro-reactivo en el sector occidental (pirita–cuarzo), que constituye el principal foco de generación de acidez y movilización de metales; (ii) un dominio oxidativo avanzado en la zona central, dominado por goethita y hematites, asociado a superficies geoquímicamente más evolucionadas y relativamente más estables; y (iii) un dominio transicional en el sector oriental, caracterizado por la coexistencia de óxidos de Fe y sulfatos férricos hidratados altamente solubles.

La coherencia entre la cartografía hiperespectral y la respuesta hidrogeoquímica refuerza esta zonación: los lixiviados asociados a la escombrera sulfuro-reactiva presentan pH ácido y concentraciones muy elevadas de metales y metaloides, mientras que el lixiviado que drena entre las escombreras central y oriental muestra una afección significativamente menor, coherente con el carácter más estable del dominio oxidativo y el comportamiento intermedio del dominio transicional. Asimismo, las sales sulfatadas secundarias (copiapita, rozenita, romboclasa, coquimbita y yeso) actúan como reservorios temporales de acidez y elementos potencialmente tóxicos durante los periodos secos, su disolución durante los primeros episodios de lluvia después del estío genera picos de contaminación, incrementándose de forma significativa la carga transportada desde las escombreras hacia los sistemas de drenaje superficial. En conjunto, la integración de cartografía hiperespectral UAS y desmezcla espectral, apoyada por datos hidrogeoquímicos, constituye una herramienta robusta para la identificación de focos activos de contaminación y para la priorización de medidas de gestión y restauración ambiental en entornos mineros abandonados.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el MICINN (FJC2021-047600-I; AEI/NextGenerationEU), la Junta de Andalucía/CUII y FSE+ (DGP_POST_2024_00813). MD Basallote agradece a la Agencia Estatal de Investigación (AEI) la financiación del contrato RYC2022-035326-I, cofinanciado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FSE+. El equipamiento científico ha sido financiado por los proyectos de infraestructuras EQC2018-004446-P (Gobierno de España) y PAIDI2020-INFRA/IN (Junta de Andalucía y Ministerio de Universidades).

REFERENCIAS

Clark, R. N., Swayze, G. A., Kokaly, R. F., et al. (2017). USGS spectral library version 7. *U.S. Geological Survey Data Series 1035.* https://doi.org/10.3133/ds1035

Crowley, J. K., Williams, D. E., Hammarstrom, J. M., Piatak, N., Mars, J. C., & Chou, I.-M. (2003). Spectral reflectance properties (0.4–2.5 μm) of secondary Fe-oxide, Fe-hydroxide, and Fe-sulphate-hydrate minerals associated with sulphide-bearing mine wastes. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 3(3), 219–228. https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-001

Grande, J., Valente, T., De la Torre, M. L., Santisteban, M., Cerón, J. C., & Pérez-Ostale, E. (2014). Characterization of acid mine drainage sources in the Iberian Pyrite Belt: Base methodology for quantifying affected areas and for environmental management. *Environmental Earth Sciences, 71*, 2729–2738. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2652-0

Heinz, D. C., & Chang, C.-I. (2001). Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39*(3), 529–545. https://doi.org/10.1109/36.911111

Rodrigo Molina, I. (2021). Determinación del potencial contaminante de la mina de Lagunazo sobre la rivera del Cobica (SO España). *Trabajo Fin de Máster, Máster en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales*, *Universidad de Huelva*.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.158

Exploración de indicios de litio en la zona de Téra (Tillaberi, Níger) mediante Índices Litológicos Espectrales

Montesinos Melendo, Salomón [1] **Luque Ballestero, César** [2] **Fernández Fornos, Lara** [1] **Montesinos Aranda, Salomón** [1]

[1] SM GEODIM, España

[2] UAB, España

ORCID:

Correspondencia: s2montesinos@geodim.es cesarluqueballestero@gmail.com lfernandez@geodim.es smontesinos@geodim.es

RESUMEN

La transición energética enfrenta importantes desafíos, como el incremento significativo de la demanda de metales críticos como el litio (Li). El objetivo de este estudio es la exploración de indicios de litio en un Área de Interés (AOI, Area Of Interest) de 4.000 km2 en el entorno de la ciudad de Téra (Tillaberi, Níger) mediante el análisis de índices litológicos espectrales (ILE) obtenidos a partir de imágenes multiespectrales de los satélites ASTER, Landsat 8-9 (OLI) y Sentinel 2 (S2). Hemos utilizado cocientes entre bandas que nos permiten caracterizar ILE. Esta técnica es una excelente opción para la prospección geológica debido a la simplicidad para delinear objetivos de interés para la investigación, al mejorar el comportamiento espectral de diferentes objetivos donde una banda espectral es inversamente proporcional a otra. La presencia de minerales se expresa mediante longitudes de onda indetectables a simple vista. El análisis de la imagen genera un mapa de indicios con condiciones favorables para depósitos minerales. En la imagen de satélite procesada, se puede localizar, evaluar y muestrear eficientemente los indicios. Algunos depósitos no se reconocerán en la imagen, aun así, el trabajo de campo se va a concentrar en áreas con el mayor potencial mineral. La imagen nos sirve también para planificar el mejor acceso terrestre a los indicios.

Palabras clave: *Litio, Níger, Índices Litológicos, ILE*

Fecha de recepción: 14 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Exploración de indicios de litio en la zona de Téra (Tillaberi, Níger) mediante Índices Litológicos Espectrales

Montesinos Melendo, Salomón [(1)], Luque Ballestero, César [(2)], Fernández Fornos, Lara [(1)], Montesinos Aranda, Salomón [(1)]

[(1)] SM GEODIM, España.
s2montesinos@geodim.es ; lfernandez@geodim.es ; smontesinos@geodim.es.

[(2)] UAB, España.
cesarluqueballestero@gmail.com.

Resumen: La transición energética enfrenta importantes desafíos, como el incremento significativo de la demanda de metales críticos como el litio (Li). El objetivo de este estudio es la exploración de indicios de litio en un Área de Interés (AOI, *Area Of Interest*) de 4.000 km^2 en el entorno de la ciudad de Téra (Tillaberi, Níger) mediante el análisis de índices litológicos espectrales (ILE) obtenidos a partir de imágenes multiespectrales de los satélites ASTER, Landsat 8-9 (OLI) y Sentinel 2 (S2). Hemos utilizado cocientes entre bandas que nos permiten caracterizar ILE. Esta técnica es una excelente opción para la prospección geológica debido a la simplicidad para delinear objetivos de interés para la investigación, al mejorar el comportamiento espectral de diferentes objetivos donde una banda espectral es inversamente proporcional a otra. La presencia de minerales se expresa mediante longitudes de onda indetectables a simple vista. El análisis de la imagen genera un mapa de indicios con condiciones favorables para depósitos minerales. En la imagen de satélite procesada, se puede localizar, evaluar y muestrear eficientemente los indicios. Algunos depósitos no se reconocerán en la imagen, aun así, el trabajo de campo se va a concentrar en áreas con el mayor potencial mineral. La imagen nos sirve también para planificar el mejor acceso terrestre a los indicios.

Palabras clave: Litio, Níger, Índices Litológicos, ILE

Exploration for evidence of lithium in the Téra area (Tillaberi, Niger) using Spectral Lithological Indices

***Abstract**: The energy transition faces significant challenges, such as the substantial increase in demand for critical metals like lithium (Li). The objective of this study is to explore for lithium deposits in a 4,000 km² Area of Interest (AOI) near the city of Téra (Tillaberi, Niger) by analyzing spectral lithological indices (ILEs) obtained from multispectral images from the ASTER, Landsat 8-9 (OLI), and Sentinel-2 (S2) satellites. We used band ratios to characterize ILEs. This technique is an excellent option for geological prospecting due to its simplicity in delineating targets of interest for research, as it enhances the spectral behavior of different targets where one spectral band is inversely proportional to another. The presence of minerals is expressed through wavelengths undetectable to the naked eye. Image analysis generates a map of indications with conditions favorable for mineral deposits. In the processed satellite image, these indications can be efficiently located, evaluated, and sampled. Some deposits will not be recognizable in the image; even so, fieldwork will be concentrated in areas with the greatest mineral potential. The image also helps us plan the best ground access to the indications.*

***Keywords**: Lithium, Niger, Lithological Indices, ILE*

1. INTRODUCCIÓN

La transición energética enfrenta importantes desafíos, como el incremento significativo de la demanda de metales críticos como el litio (Li). El litio puro es un metal alcalino blando de color blanco plateado que se oxida rápidamente al aire libre que juega un papel fundamental en los sistemas de almacenamiento de energía, así como en aplicaciones en las industrias de cerámica, vidrio, acero, nuclear, química y medicina. En la situación actual, es necesario desarrollar métodos mejorados para explorar, extraer y utilizar estos metales.

La teledetección espacial es una fuente de datos de vital importancia para la exploración minera, especialmente en lugares remotos, política y socialmente inestables.

Desafortunadamente, el litio es un elemento químico, no un mineral con una "curva de reflectancia espectral" propia, en el sentido geológico de teledetección.

En la naturaleza, el litio está asociado con muchos minerales en varias rocas ígneas como el granito y las pegmatitas, siendo la espodumena y la lepidolita los minerales más comunes de los que se extrae.

La espodumena es un mineral de silicato de litio y aluminio. Su curva de reflectancia es generalmente alta y presenta bandas de absorción relacionadas con grupos hidroxilo (OH) y agua en el rango del infrarrojo de onda corta (SWIR). Presenta reflectancia alta en el visible/NIR y los valles de absorción diagnósticos en el SWIR (~1410 nm, ~1910 nm, ~2209 nm).

La lepidolita es una mica rica en litio (color lila/rosa). Su espectro de reflectancia muestra características de absorción distintivas en la región del SWIR (específicamente alrededor de 2200-2400 nm) debido a la estructura de la mica y los grupos OH.

Se han reconocido más de 124 especies de minerales de litio, principalmente en cuatro entornos geológicos: (i) pegmatitas graníticas de litio-cesio-tantalio (LCT) y rocas metasomáticas asociadas; (ii) pegmatitas altamente peralcalinas; (iii) rocas metasomáticas no asociadas directamente con pegmatitas, y (iv) depósitos de manganeso. Las pegmatitas LCT están asociadas con los minerales de litio geológicamente más antiguos (3.000 - 3.100 Ma) (Grew, 2020).

Cardoso-Fernandes *et al*. (2019), proponen dos enfoques para la exploración de Li mediante teledetección: (i) identificación de minerales de alteración hidrotermal asociados con las pegmatitas con Li; e (ii) identificación directa de minerales de Li.

El objetivo de este estudio es la exploración de indicios de litio en un Área de Interés (AOI, *Aire Of Interest*) de 4.000 km^2 en el entorno de la ciudad de Téra (Tillaberi, Níger) mediante el análisis de índices litológicos espectrales (ILE) obtenidos a partir de imágenes multiespectrales de los satélites ASTER, Landsat 8-9 (OLI) y Sentinel 2 (S2).

2. ZONA DE ESTUDIO

La AOI se localiza al oeste de Níger, en la provincia de Tillaberi (Fig. 1).

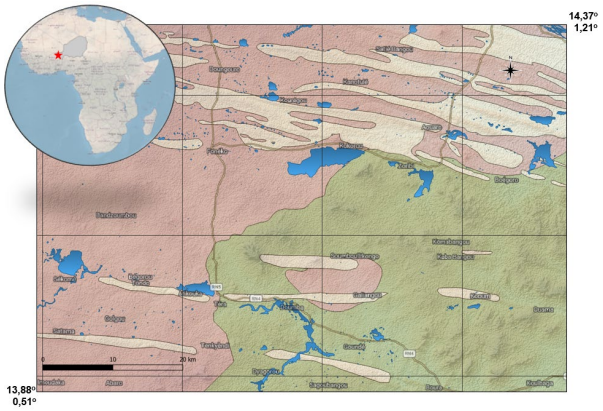


Figura 1. Localización y Geología de la AOI. En verde, sedimentos volcánicos; en rosa, afloramientos de granitos y en beige, dunas de arena.

Geológicamente, se caracteriza por la alternancia de cinturones de roca verde (Gorouol, Diagorou-Darbani, Sirba y Makalondi) y plutones granitoides (Téra-Ayorou, Dargol-Gothèye y Torodi) con una orientación NE-SO (Ahmed *et al*., 2022).

La zona de Téra ha sido elegida, como zona piloto, debido a que ya Machens (1961) detectó la presencia de pegmatitas con litio en las rocas precámbricas de Liptako y que Attourabi *et al*. (2021) analizaron las características geológicas de la mineralización de litio en las pegmatitas de la zona y propusieron un modelo metalogénico de su emplazamiento. La mineralización de litio en la AOI, se presenta como espodumena y, secundariamente, como lepidolita y holmquistita.

Además, contamos con verdad-terreno, ya que, en el año 2018, al SW de Téra, la compañía *Two Shields Investments* realizó 860 perforaciones geoquímicas con barrena, a una profundidad promedio de 3,5 m de la superficie. Recolectaron también, 15 muestras de lascas de roca de diversos afloramientos de pegmatitas. Las muestras recolectadas fueron predominantemente de saprolita granítica. Una cuadrícula de 200 x 100 metros, identificó 6 anomalías separadas entre 100 y 200 m de ancho y 500 m y 3 km de largo. Estas anomalías se pensó que podrían representar enjambres de pegmatitas ocultos, como se observó en el afloramiento en superficie. Los valores de óxido de litio (Li_2O) oscilaron entre 2,5 y 597 ppm. Se observó que las pegmatitas de litio suelen lixiviarse en la superficie y presentan leyes significativamente inferiores a las pegmatitas a 20 metros de profundidad (Fig. 2).

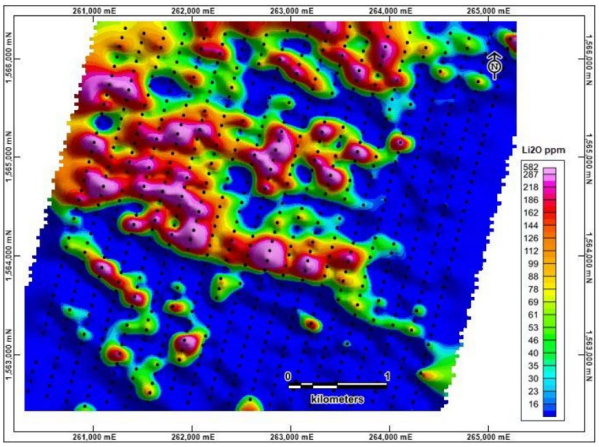


Figura 2. Resultado del análisis geoquímico de campo realizado en el año 2018 (Fuente: *Two Shields Investments*).

La geología subyacente del área analizada está formada por leucogranitos y vetas de pegmatita; ambos se consideran como posibles anfitriones de mineralización de litio.

Tectónicamente, el área se ve afectada por dos fases principales de deformación. La primera fase corresponde a un acortamiento NO-SE, responsable de las zonas de foliación con dirección N25° a N45°, microplegamiento, boudinage y cizalladura con dirección NS. La segunda fase corresponde a un

acortamiento NNO-SSE, responsable de las zonas de cizalladura dextral N100° a N110° y sinistral N25° a N45°. (Ahmed *et al*., 2022).

Otro punto de interés es que la AOI coincide con perímetros de concesiones mineras libres o con permisos de investigación.

3. MATERIALES Y MÉTODO

La base metodológica empleada en este estudio se puede ver en Sabins (1999), Van der Meer *et al*. (2012) y Montesinos (2024). Aunque muchos autores utilizan Composiciones en color y Análisis de Componentes Principales, en este estudio, hemos utilizado cocientes entre bandas que nos permiten caracterizar cuantitativamente los ILE. Esta técnica es una excelente opción para la prospección geológica debido a la simplicidad para delinear objetivos de interés para la investigación, al mejorar el comportamiento espectral de diferentes objetivos donde una banda espectral es inversamente proporcional a otra. Para ello, la banda con mayor reflectancia debe dividirse entre la banda con menor reflectancia que, generalmente corresponde a rangos de absorción (Sabins, 1999).

Cardoso-Fernandes *et al*. (2021) han caracterizado los espectros de reflectancia de minerales de litio y pegmatitas, en un estudio de caso para la caracterización mineralógica y litológica en el área de Fregeneda-Almendra (entre España y Portugal), lo que nos ha permitido conocer los rangos de absorción y de máxima reflectancia en la respuesta espectral de la espodumena y la lepidolita (Fig. 3).

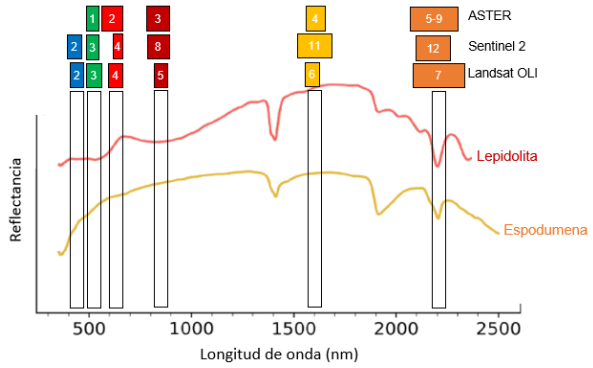


Figura 3. Curvas de reflectancia espectral de la espodumena y la lepidolita (modificado de Cardoso-Fernandes *et al*. (2021) y su relación con las bandas de los satélites Landsat, Sentinel 2 y ASTER.

La fuente de datos utilizada en el estudio han sido imágenes multiespectrales de los satélites Sentinel 2, Landsat OLI y ASTER.

A partir de una secuencia anual de imágenes Sentinel 2, se ha determinado que primavera es el momento óptimo en la zona, para realizar un análisis utilizando ILE, en términos de ausencia de vegetación y menor contenido de humedad en el suelo, aunque, en el año 2025, nos hemos encontrado con amplias zonas que habían sufrido incendios que alteraban la respuesta espectral de los suelos.

La utilización de estos 3 satélites, en esta fase de exploración minera, es debido a que ASTER tiene la mayor riqueza espectral en el SWIR, con 5 bandas, con una resolución espacial de 30 m; S2 mejora la resolución espacial hasta los 10-20 metros, aunque solo presenta una banda espectral en SWIR y Landsat OLI, aunque solo tiene una banda en el SWIR y una resolución espacial de 30 metros, ofrece una calibración espectral superior a los otros 2 satélites (Fig. 3).

El reconocimiento de zonas mineralizadas se realiza también, mediante la identificación de los halos de alteración asociados. Los minerales más comunes asociados a estas zonas de alteración son óxidos de hierro y minerales arcillosos (Sabins, 1999).

En la siguiente tabla, se pueden ver las fechas y los ILE normalizados que hemos utilizado en el estudio.

Tabla 1. Fechas de satélite utilizadas e ILE utilizados en el estudio.

	Landsat OLI	Sentinel 2	ASTER
Fecha de la imagen	09/03/2024	11/03/2024	11/03/2007
Pegmatitas	3/7	4/12	6/7, 1/3, 12/6, 12/9
Arcillas alteradas	6/7	11/12	4/5
Óxidos de hierro	4/2	4/2	4/3

Los ILE obtenidos se han analizado en relación a la escasa verdad terreno con la que contábamos, encontrando tendencias directas entre los valores más altos obtenidos en los ILE específicos de pegmatitas y las zonas con mayor concentración en Li (Fig. 4).

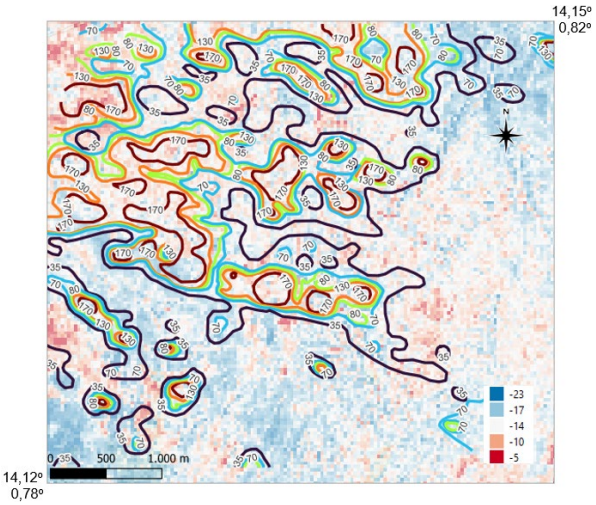


Figura 4. Tendencias entre el ILE de pegmatitas y la verdad-terreno de la geoquímica de campo.

Los ILE de arcillas alteradas presentaban una alta correlación con los de pegmatitas. Sin embargo, esta correlación no se da con los ILE de óxidos de hierro.

Para definir zonas espectralmente similares, se han realizado varios análisis *"cluster"*, teniendo en cuenta todos los ILE para cada tipo de sensor y teniendo en

cuenta, solamente, los ILE de pegmatitas. En el primer caso, las clases establecidas no correlacionaban con la verdad terreno existente, seguramente por la distorsión que introducían los ILE de óxidos de hierro. Mientras que el cluster de los ILE de pegmatitas aportaron una zonificación coherente con las observaciones de campo.

4. RESULTADOS

Todos los datos y la información generada se han integrado en un Sistema de Información Geográfica, permitiendo definir unidades homogéneas con mayor probabilidad de encontrar Litio (Fig. 5).

La definición de estas unidades homogéneas es importante en la AOI, para la planificación de los sondeos de campo que corroboren cuantitativamente la vialidad de la explotación de Litio.

En la figura 4 se pueden ver las 10 clases espectrales en las que se ha segmentado la AOI, enmascaradas con las unidades litológicas donde la probabilidad de encontrar Li es nula. Además, las clases espectrales visibles se han codificado desde colores azules, donde la probabilidad es menor, a colores rojos donde la probabilidad es mayor.

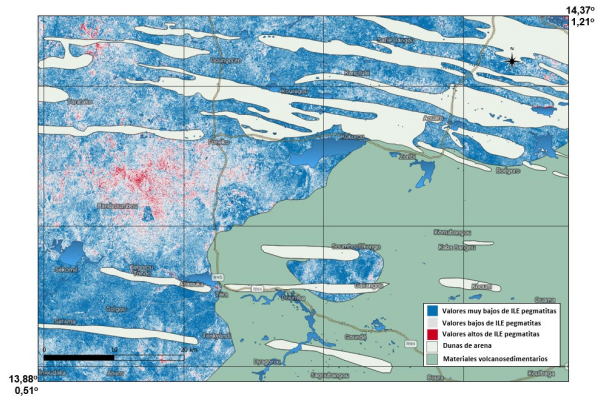


Figura 5. Clasificación de la AOI basada en los ILE.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En una imagen de satélite, que cubre miles de km², es posible interpretar los tipos de roca, estructuras y la alteración hidrotermal (si existe).

La presencia de minerales se expresa mediante longitudes de onda indetectables a simple vista. El análisis de la imagen permite generar un mapa de indicios con condiciones favorables para localizar depósitos minerales. En la imagen de satélite procesada, se puede localizar, evaluar y muestrear eficientemente los indicios.

La mineralización de litio se presenta principalmente como espodumena y, secundariamente, como lepidolita.

Algunos depósitos no se van a identificar en la imagen, aun así, el trabajo de exploración en campo, que es el más costoso, se va a centrar en áreas con la mayor probabilidad de potencial mineral.

La imagen nos sirve también para planificar el mejor acceso terrestre a los indicios.

Los próximos trabajos de exploración en la AOI, que incluyen un programa de perforación para cuantificar la mineralización a mayor profundidad, se realizarán atendiendo a las clases espectrales detectadas y cartografiadas.

6. REFERENCIAS

Ahmed, Y.L., Attourabi, S.A., Hallarou, M.M., Chamsi, L.I., Noura, G.R., & Chékaraou, M.M.S. (2022). Relationship between regional deformation and the emplacement of the Dibilo pegmatites (Liptako, West Niger): *Journal of African Earth Sciences, 198, 1–16.* https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104814

Attourabi, S.A.; Ahmed, Y., & Hallarou, M.M. (2021). Origin and Emplacement Conditions of the Dibilo Lithiniferous Mineralization (Liptako, Western Niger). *International Journal of Science and Research, 10 (10), 55-71* https://doi.org/10.21275/SR21917211430

Cardoso-Fernandes, J.; Teodoro, A.C., &Lima, A. (2019). Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites.*International Journal of Applied Earth Obsvation and Geoinformation, 76*, 10–25. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.001

Cardoso-Fernandes, J., Silva, J., Perrotta, M. M., Lima, A., Teodoro, A. C., Ribeiro, M. A., Dias, F., Barrès, O., Cauzid, J., & Roda-Robles, E. (2021). Interpretation of the Reflectance Spectra of Lithium (Li) Minerals and Pegmatites: A Case Study for Mineralogical and Lithological Identification in the Fregeneda-Almendra Area. *Remote Sensing*, *13*(18), 3688. https://doi.org/10.3390/rs13183688

Grew, E. S. (2020). The Minerals of Lithium. *Elements*, *16*(4),235–240. https://doi.org/10.2138/GSELEMENTS.16.4.235

Machens, E. (1961). *Prospection Génerale du Liptako, campagne1960-1961*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières: 73.

Montesinos, S. (2024). Diseño e implementación de un plugin QGIS para el cálculo de índices litológicos espectrales a partir de imágenes Sentinel 2*. Tesis de Máster. Geoinnova.*

Sabins, F.F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews, Volume 14, (3-4):* 157-183*.* https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4

Van der Meer, F.D.; van der Werff, F.; Harald M.A.; van Ruitenbeek, J.A.; Hecker, C.A.; Bakker, W.H.; Noomen, M.F.; van der Meijde, M.; Carranza, E.J.M.; Boudewijn de Smeth, J. B., & Woldai, T. (2012). Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 14, (1):* 112-128. https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.002

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.169

Predicción de la calidad del agua en entornos afectados por la minería: un estudio de teledetección hiperespectral en la faja pirítica Ibérica

Isgró, Melisa [1,2] **Basallote Sánchez, M Dolores** [1] **Moreno González, Raúl** [2] **Barbero, Luis** [2]

[1] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN), CSIC, Departamento de Ecología y Gestión Costera, E-11510, Puerto Real, Cádiz, España

[2] Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz, Av. República Saharaui s/n, Puerto Real, 11510, Cádiz, España

ORCID: Isgró 0000-0003-2194-8020 Basallote Sánchez 0000-0003-2011-3806 Moreno González 0000-0002-5679-2110 Barbero 0000-0002-3513-2025

Correspondencia: meli.isgro@gmail.com mdolores.basallote@csic.es raul.morenogonzalez@uca.es luis.barbero@uca.es

RESUMEN

Este estudio integra imágenes hiperespectrales obtenidas mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) con técnicas de aprendizaje automático para estimar concentraciones de pH, Fe y SO4-2 en nueve masas de agua de las minas abandonadas de Tharsis y Lagunazo, en la Faja Pirítica Ibérica (SO España). Estos emplazamientos presentan un gradiente hidroquímico de contaminación extrema oscilando entre condiciones de extrema acidez y neutras. Se utilizaron mediciones in situ para entrenar diversos modelos de regresión basados en un ortomosaico hiperespectral de 221 bandas (398.8–887.1 nm). Se evaluaron cinco algoritmos, destacando el Perceptrón Multicapa (MLP) como el mejor para la predicción del pH (R2 = 0.952) y Random Forest para el Fe (R2 = 0.861) y el S (R2 = 0.880). Los resultados subrayan el potencial de combinar sensores espectrales embarcados en drones y aprendizaje automático para el monitoreo operativo de alta resolución en entornos mineros impactados.

Palabras clave: *Datos hiperespectrales, drones, pequeñas masas de agua, monitoreo, drenaje ácido de mina.*

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 17 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Predicción de la calidad del agua en entornos afectados por la minería: un estudio de teledetección hiperespectral en la faja pirítica Ibérica

Isgró, Melisa [1,2], Basallote Sánchez, M Dolores [1], Moreno González, Raúl [2], Barbero, Luis [2]

[1] Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN), CSIC, Departamento de Ecología y Gestión Costera, E-11510, España.

0000-0003-2194-8020, meli.isgro@gmail.com ; 0000-0003-2011-3806, mdolores.basallote@csic.es.

[2] Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz, España.

0000-0002-5679-2110, raul.morenogonzalez@uca.es ; 0000-0002-3513-2025, luis.barbero@uca.es.

Resumen: Este estudio integra imágenes hiperespectrales obtenidas mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) con técnicas de aprendizaje automático para estimar concentraciones de pH, Fe y SO_4^{-2} en nueve masas de agua de las minas abandonadas de Tharsis y Lagunazo, en la Faja Pirítica Ibérica (SO España). Estos emplazamientos presentan un gradiente hidroquímico de contaminación extrema oscilando entre condiciones de extrema acidez y neutras. Se utilizaron mediciones in situ para entrenar diversos modelos de regresión basados en un ortomosaico hiperespectral de 221 bandas (398.8–887.1 nm). Se evaluaron cinco algoritmos, destacando el Perceptrón Multicapa (MLP) como el mejor para la predicción del pH (R^2 = 0.952) y *Random Forest* para el Fe (R^2 = 0.861) y el S (R^2 = 0.880). Los resultados subrayan el potencial de combinar sensores espectrales embarcados en drones y aprendizaje automático para el monitoreo operativo de alta resolución en entornos mineros impactados.

Palabras clave: Datos hiperespectrales, drones, pequeñas masas de agua, monitoreo, drenaje ácido de mina.

Predicting Water Quality in Mine-Affected Environments: A Hyperspectral Remote Sensing Study in the Iberian Pyrite Belt

***Abstract**: This study integrates hyperspectral images obtained by unmanned aerial vehicles (UAVs) with machine learning techniques to estimate pH, Fe, and SO_4^{-2}concentrations in nine water bodies of the abandoned Tharsis and Lagunazo mines in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). These sites present a contamination hydrochemical gradient ranging from extreme acidity to circum-neutral conditions. In situ measurements were used to train various regression models based on a 221-band (398.8–887.1 nm) hyperspectral orthomosaic. Five algorithms were evaluated, highlighting the Multilayer Perceptron (MLP) as the best for pH prediction (R2 = 0.952) and Random Forest for Fe (R2 = 0.861) and S (R2 = 0.880). The results emphasize the potential of combining drone-mounted spectral sensors and machine learning for high-resolution operational monitoring in impacted mining environments.*

***Keywords**: Hyperspectral data, drones, small water bodies, monitoring, acid mine drainage*

1. INTRODUCCIÓN

La Faja Pirítica Ibérica (IPB), en el suroeste de la Península Ibérica, alberga una de las mayores concentraciones de sulfuros masivos del mundo. La intensa actividad minera histórica desarrollada en la zona ha dejado tras de sí numerosas cortas abiertas, escombreras y depósitos de residuos que, al quedar expuestos a la meteorización, generan el fenómeno conocido como Drenaje Ácido de Mina (AMD) (Cánovas *et al*., 2016; Huang *et al*., 2023; Nieto *et al*., 2007; Olías *et al*., 2021; Sánchez España *et al*., 2005). Estos lixiviados se caracterizan por una acidez extrema (a menudo con pH < 3) y una carga masiva de elementos tóxicos disueltos.

La monitorización de estas masas de agua es fundamental para la protección de las cuencas fluviales receptoras (como los ríos Tinto y Odiel). Sin embargo, los métodos de muestreo convencionales se enfrentan a desafíos logísticos: la topografía escarpada de las minas abandonadas dificulta el acceso y la alta variabilidad espacial de las lagunas impide una caracterización completa mediante muestras puntuales. La teledetección satelital, aunque útil a escala regional,

carece de la resolución espacial necesaria para las dimensiones de estas cortas. En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) emergen como una solución intermedia ideal, proporcionando una "ultra-alta" resolución que permite capturar la heterogeneidad química superficial de estas aguas (Koerting *et al*., 2024; Ma *et al*., 2023).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y toma de muestras

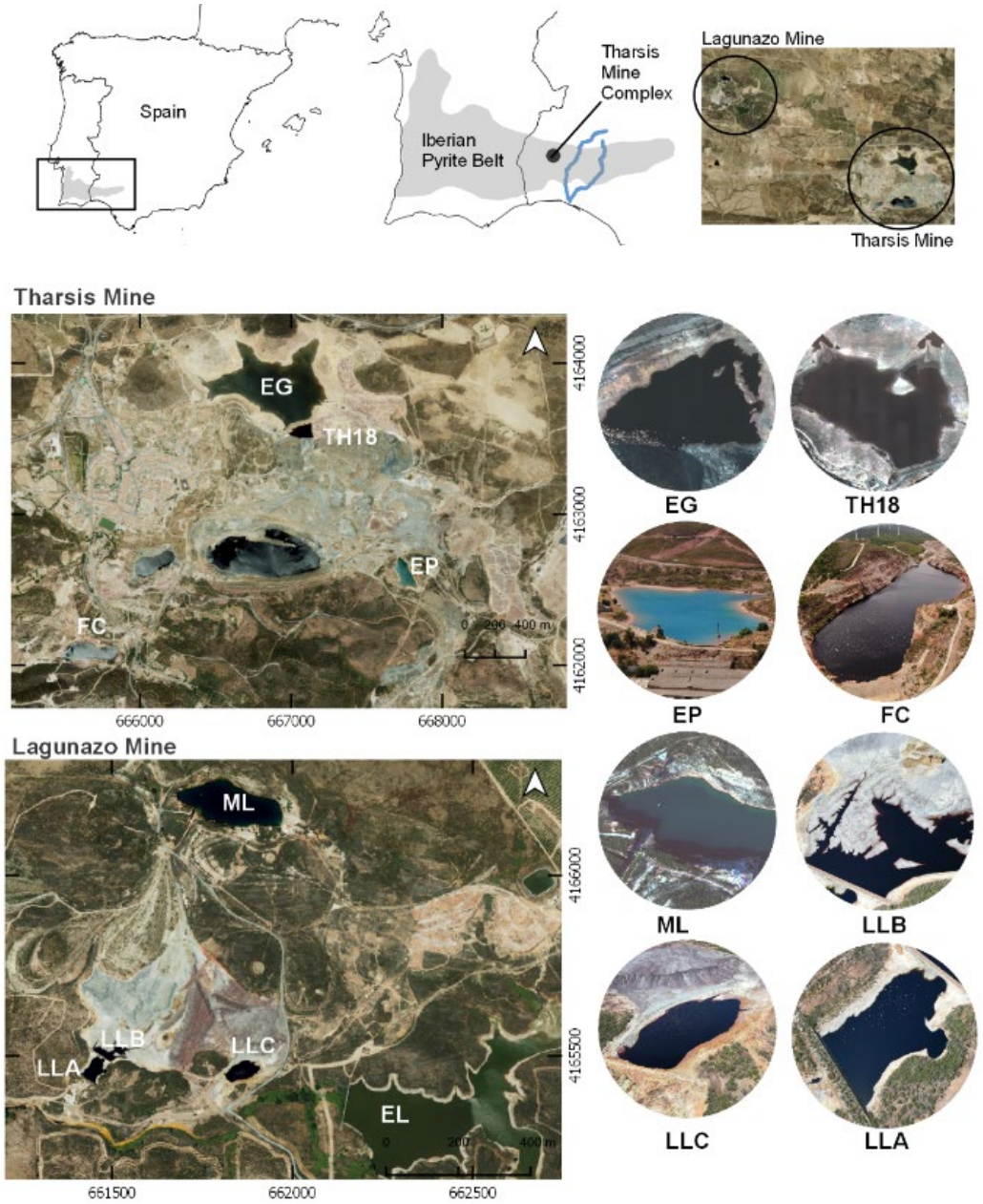


Figura 1. Mapa de localización de los puntos de muestreo. Se muestrearon cuatro masas de agua en la Mina de Tharsis: Filón Centro (FC), Embalse del Pino (EP), Embalse Grande (EG) y Th18. Adicionalmente, se muestrearon otras cinco masas de agua en el emplazamiento de la Mina Lagunazo: Mina Lagunazo (ML), Embalse Lagunazo (EL) y las Lagunas A, B y C (LLA, LLB y LLC, respectivamente).

El diseño experimental se basó en capturar el máximo gradiente hidroquímico posible para lo que se seleccionaron nueve masas de agua representativas en las minas de Tharsis y Lagunazo (Huelva, España; Fig 1). Paralelamente a los vuelos de dron, se recogieron muestras de agua a 10-20 cm de profundidad. El pH y la conductividad eléctrica se midieron in situ, mientras que la concentración de Fe y S se determinó en laboratorio mediante Espectroscopía de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).

2.2. Adquisición y preprocesamiento hiperespectral

Se utilizó un hexacóptero DJI Matrice 600 equipado con el sensor Headwall Nano-Hyperspec (rango 400-1000 nm). Los vuelos se realizaron a una altura de 90 metros

con una velocidad de 4 m/s. El flujo de procesamiento incluyó:

- Corrección Radiométrica: Conversión de niveles digitales a radiancia.
- Corrección Atmosférica: Aplicación del Método de Línea Empírica (ELM) utilizando paneles de calibración con reflectancia conocida (2%, 12%, 24% y 50%) colocados en el área de estudio.
- Ortorrectificación: Integración de datos de la IMU y GPS para corregir distorsiones geométricas.

El resultado fue un ortomosaico de 221 bandas espectrales con un tamaño de píxel de 9 cm.

2.3. *Pipeline* de Aprendizaje Automático

Dada la alta colinealidad de las 221 bandas seleccionadas, se aplicaron dos estrategias de reducción de datos: 1) PCA (Análisis de Componentes Principales): Transformación de las bandas en componentes ortogonales que explican el 99% de la varianza. 2) LASSO (*Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*): Selección de las bandas más influyentes eliminando aquellas con coeficientes nulos.

Se evaluaron cinco regresores: *Random Forest* (RF), k-*Nearest Neighbors* (KNN), *Partial Least Squares Regression* (PLSR), *XGBoost* y un Perceptrón Multicapa (MLP) de tres capas ocultas. El entrenamiento se realizó mediante una validación cruzada de 5 pliegues para asegurar la generalización de los modelos.

Se analizaron un total de 13 muestras derivadas de imágenes hiperespectrales (una por cuerpo de agua). Cada muestra consistió en firmas espectrales promediadas, obtenidas de seis regiones de interés (ROI) representativas por cada cuerpo de agua, lo que resultó en 78 espectros por parámetro. Los datos espectrales abarcaron el rango VNIR (aprox. 398–887 nm) con 221 bandas por firma. El entrenamiento de los modelos se realizó utilizando el conjunto de datos completo de 221 bandas VNIR, o bien subconjuntos multibanda seleccionados mediante LASSO o transformados a través de PCA. Se utilizó una validación cruzada de 5 iteraciones (K-Fold) para evaluar el rendimiento y la precisión del modelo. Este método es particularmente adecuado para conjuntos de datos pequeños, ya que optimiza el uso de muestras limitadas al tiempo que mitiga el riesgo de sobreajuste. El conjunto de datos se divide en cinco grupos (folds) de igual tamaño. En cada iteración, se utilizaron cuatro grupos para entrenar el modelo y el grupo restante se utilizó para la validación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cuerpos de agua seleccionados presentan un amplio gradiente hidroquímico, que abarca desde condiciones neutras hasta extremadamente ácidas (pH < 1 a 7.8) y desde soluciones diluidas a ricas en metales (e.g., Fe, Cu, Zn). Las masas de agua EP, FC, ML, TH18, LLA, LLB y LLC se clasifican como ácidas (pH < 3.8), mientras que EG y EL representan aguas circum-neutras (pH 6.6–7.7). Las concentraciones de hierro oscilan entre 0.053 y 69 g/L. Del mismo modo, las concentraciones de sulfato varían de 49.33 a 84 g/L, notándose una variabilidad sustancial en el contenido de sulfato entre los cuerpos de agua.

3.1 Comportamiento espectral de las aguas de mina

Se observó una clara diferenciación espectral según el pH y la carga metálica. Los cuerpos de agua con pH neutro presentan una firma típica de agua limpia con baja reflectancia. Sin embargo, las aguas afectadas por AMD muestran una fuerte absorción en las longitudes de onda del azul (<500 nm), causada por la presencia de hierro disuelto y la formación de complejos de sulfato de hierro. Además, se detectó un pico de reflectancia pronunciado entre 600 y 700 nm (región del rojo), coincidente con el color rojizo de las aguas más ácidas debido a la suspensión de precipitados minerales como la schwertmannita.

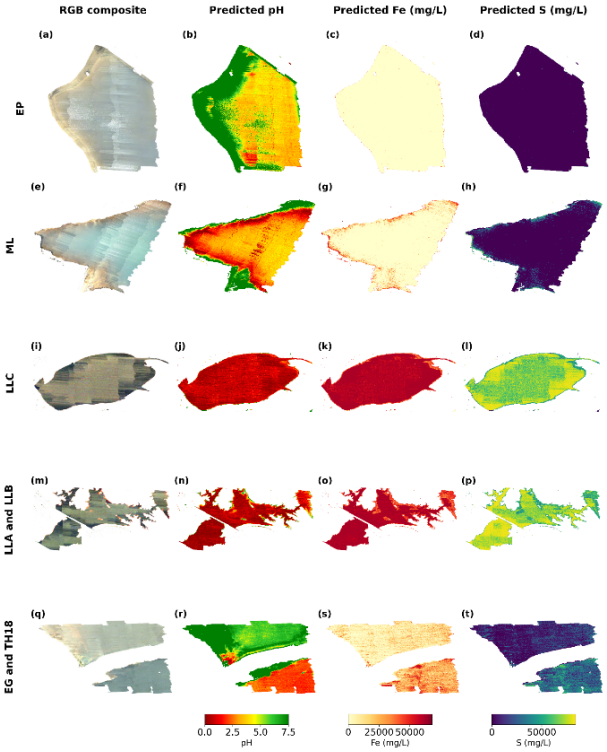


Figura 2. Imagen RGB hiperespectral compuesta y parámetros de calidad del agua predichos para EP, ML, LLC, LLA y LLB (2023), EG y TH18. a) Imagen compuesta RGB generada a partir de bandas VNIR seleccionadas del cubo hiperespectral; b) Predicción de la distribución de pH; c) Predicción de la concentración de Fe en mg/L; d) Predicción de la concentración de S en mg/L.

3.2 Evaluación del rendimiento de los modelos

Los resultados muestran una capacidad de predicción excelente para los tres parámetros clave (Tabla 1):

- pH: El modelo MLP fue el más preciso (R^2=0.952, RMSE=0.51). Esto sugiere que las redes neuronales captan mejor la relación no lineal entre la reflectancia y la escala logarítmica del pH.

- Hierro y Azufre: Los modelos de *Random Forest* (RF) superaron al resto cuando se utilizaron las variables seleccionadas por LASSO (R^2=0.861 para Fe y R^2=0.880 para S). La robustez de RF ante valores atípicos fue fundamental dada la presencia de concentraciones extremas en algunas lagunas**.**

Tabla 1. Resumen de los principales resultados obtenidos por parámetro.

Parámetro	Mejor Modelo	R2	RMSE
pH	MLP	0.952	0.51
Fe (mg/L)	RF	0.861	185.2
S (mg/L)	RF	0.880	542.4

3.3 Análisis de importancia de variables (SHAP)

La aplicación de valores SHAP (*SHapley Additive exPlanations*) permitió interpretar los modelos de "caja negra". Para el pH y el Fe, las bandas más críticas se situaron en el rango de 450-480 nm y 670-710 nm (Fig. 3). Esto valida físicamente los modelos, ya que estas regiones espectrales están directamente ligadas a los procesos de absorción y dispersión del hierro en sus diferentes estados de oxidación.

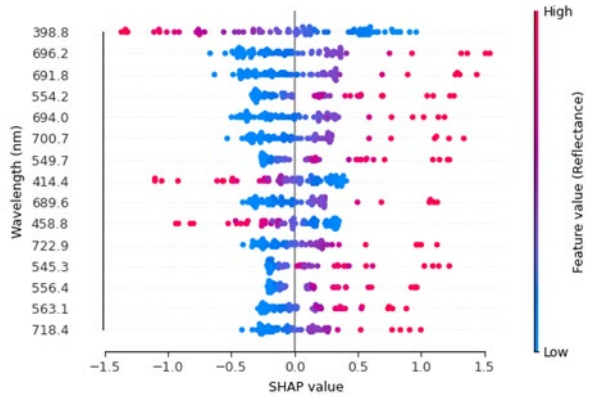


Figura 3. Gráfico de resumen SHAP para la predicción del pH mediante MLP con una representación espectral completa

4. CONCLUSIONES

La integración de sensores hiperespectrales en drones y técnicas de aprendizaje automático representa un avance disruptivo en el monitoreo ambiental minero. La metodología propuesta permite obtener mapas continuos de calidad del agua con una precisión cercana a los análisis de laboratorio, eliminando los riesgos del muestreo manual en zonas peligrosas. La capacidad de predecir el pH y la carga metálica de forma remota facilita una respuesta rápida ante posibles vertidos y permite evaluar la eficacia de los procesos de remediación y tratamiento de aguas de mina de manera operativa y sistemática.

5. AGRADECIMIENTOS

MD Basallote agradece a la Agencia Estatal de Investigación (AEI) la financiación del contrato RYC2022-035326-I, cofinanciado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FSE+. R Moreno-gonzález agradece por su ayuda DGP_POST_2024_00813 (Junta de Andalucía/CUII y FSE+). El equipamiento científico ha sido financiado por los proyectos de infraestructuras EQC2018-004446-P (Gobierno de España) y PAIDI2020-INFRA/IN (Junta de Andalucía y Ministerio de Universidades). Los autores agradecen las facilidades otorgadas por la empresa minera *Tharsis Mining* S.L. para el acceso a las instalaciones de Tharsis y Lagunazo.

6. REFERENCIAS

Cánovas, C. R., Olías, M., Macias, F., Torres, E., San Miguel, E. G., Galván, L., Ayora, C., & Nieto, J. M. (2016). Water acidification trends in a reservoir of the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Science of the Total Environment, 541*, 400–411. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.070

Huang, C., Chen, X. Y., & Lee, M. (2023). An improved hyperspectral sensing approach for the rapid determination of copper ion concentrations in water environment using short-wavelength infrared spectroscopy. *Environmental Pollution, 333*(February), 121984. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121984

Koerting, F. M., Asadzadeh, S., Hildebrand, J. C., Savinova, E., Kouzeli, E., Nikolakopoulos, K. G., Lindblom, D., Koellner, N., Buckley, S. J., Lehman, M. R., Schläpfer, D., & Micklethwaite, S. (2024). *Imaging Spectroscopy for Mining: Insights for Hyperspectral Drone Applications*. https://doi.org/10.20944/preprints202407.1407.v1

Ma, T., Zhang, D., Li, X., Huang, Y., Zhang, L., Zhu, Z., Sun, X., Lan, Z., & Guo, W. (2023). Hyperspectral remote sensing technology for water quality monitoring: knowledge graph analysis and Frontier trend. *Frontiers in Environmental Science (Vol. 11)*. Frontiers Media SA. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1133325

Nieto, J. M., Sarmiento, A. M., Olías, M., Canovas, C. R., Riba, I., Kalman, J., & Delvalls, T. A. (2007). Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and bioavailability of the transported metals to the Huelva Estuary. *Environment International, 33*(4), 445–455. https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.11.010

Olías, M., Cánovas, C. R., & Basallote, M. D. (2021). Surface and Groundwater Quality Evolution in the Agrio and Guadiamar Rivers After the Aznalcóllar Mine Spill (SW Spain): Lessons Learned. *Mine Water and the Environment, 40*(1), 235–249. https://doi.org/10.1007/s10230-020-00713-7

Sánchez España, J., Pamo, E. L., Santofimia, E., Aduvire, O., Reyes, J., & Barettino, D. (2005). Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (Odiel river watershed, Huelva, SW Spain): Geochemistry, mineralogy and environmental implications. *Applied Geochemistry, 20*(7), 1320–1356. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.01.011

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.210

Teledetección para la cartografía de cromo y níquel en Sierra de la Nieves: una aproximación desde el aprendizaje automático interpretable

Canero, Francisco M. [1] **Rodriguez-Galiano, Victor** [1] **Mendes, Maria Paula** [2] **Ollega Caro, Jose M.** [1]

[1] Departamento de Geografía Física y AGR, Universidad de Sevilla, Sevilla, 41004, España

[2] CERENA - Centro de Recursos Naturais e Ambiente, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001, Lisboa, Portugal

ORCID: Canero 0000-0002-7813-1487 Rodriguez-Galiano 0000-0002-5422-8305 Mendes 0000-0001-9451-2266

Correspondencia: fcanero@us.es vrgaliano@us.es mpaulamendes@tecnico.ulisboa.pt jollega@us.es

RESUMEN

La cartografía de metales pesados (MP) en suelos ha ganado atención por su relevancia para la salud del suelo. Sin embargo, la información sobre los niveles de base en regiones no contaminadas sigue siendo limitada. Este estudio cartografía el contenido de cromo (Cr) y, níquel (Ni) del suelo de la Sierra de las Nieves, España. Los conjuntos de variables predictivas incluyeron compuestos trimestrales, índices espectrales representativos de la cobertura del suelo, características fenológicas extraídas de la serie temporal de Sentinel 2 para 2018-2020, y características geológicas y del terreno. Se aplicó un enfoque basado en pilas de regresores (stacks), empleando el método de Selección Secuencial de Características para la reducción de dimensionalidad. La predicción de MP se evaluó utilizando los siguientes métodos de Aprendizaje Automático Interpretable (IML): Importancia de Características agnóstica del modelo y gráficos de Efecto Local Acumulado (ALE). El níquel mostró la mayor precisión (R2=0.6, RMSE=0.78), seguido por el cromo (R2=0.41, RMSE=0.68. La distancia a las peridotitas fue determinante, con varias características de teledetección, como SWIR, siendo altamente relevantes. Este marco metodológico ofrece mapas de referencia a escala de paisaje e información valiosa sobre los factores impulsores de la distribución espacial de MP del suelo.

Palabras clave: *cromo, níquel, Sentinel 2, feature importance, accumulated local effects, Sierra de las Nieves*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 marzo 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Teledetección para la cartografía de cromo y níquel en Sierra de la Nieves: una aproximación desde el aprendizaje automático interpretable

Canero, Francisco M. [(1)], Rodriguez-Galiano, Victor [(1)], Mendes, Maria Paula [(2)], Ollega Caro, Jose M. [(1)]

[(1)] Departamento de Geografía Física y AGR, Universidad de Sevilla, España.

0000-0002-7813-1487, fcanero@us.es ; 0000-0002-5422-8305, vrgaliano@us.es ; jollega@us.es.

[(2)] CERENA - Centro de Recursos Naturais e Ambiente, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001,Portugal.

0000-0001-9451-2266, mpaulamendes@tecnico.ulisboa.pt.

Resumen: La cartografía de metales pesados (MP) en suelos ha ganado atención por su relevancia para la salud del suelo. Sin embargo, la información sobre los niveles de base en regiones no contaminadas sigue siendo limitada. Este estudio cartografía el contenido de cromo (Cr) y, níquel (Ni) del suelo de la Sierra de las Nieves, España. Los conjuntos de variables predictivas incluyeron compuestos trimestrales, índices espectrales representativos de la cobertura del suelo, características fenológicas extraídas de la serie temporal de Sentinel 2 para 2018-2020, y características geológicas y del terreno. Se aplicó un enfoque basado en pilas de regresores (*stacks*), empleando el método de Selección Secuencial de Características para la reducción de dimensionalidad. La predicción de MP se evaluó utilizando los siguientes métodos de Aprendizaje Automático Interpretable (IML): Importancia de Características agnóstica del modelo y gráficos de Efecto Local Acumulado (ALE). El níquel mostró la mayor precisión (R^2=0.6, RMSE=0.78), seguido por el cromo (R^2=0.41, RMSE=0.68. La distancia a las peridotitas fue determinante, con varias características de teledetección, como SWIR, siendo altamente relevantes. Este marco metodológico ofrece mapas de referencia a escala de paisaje e información valiosa sobre los factores impulsores de la distribución espacial de MP del suelo.

Palabras clave: *: cromo, níquel, Sentinel 2, feature importance, accumulated local effects, Sierra de las Nieves*

Remote sensing for chromium and nickel mapping in Sierra de las Nieves: an Interpretable Machine Learning approach

Abstract*: Mapping heavy metals (HM) in soil has gained attention for its relevance to soil health, yet background levels in unpolluted regions remain limited. This study maps soil chromium (Cr) and nickel (Ni) content in Sierra de las Nieves, Spain Predictive feature sets included three-month composites, spectral indices representing land cover, and phenological features extracted from Sentinel 2 time series for 2018-2020, and geological and terrain features. An ensemble stacking approach was applied, with Sequential Feature Selection method for dimensionality reduction. The HM prediction was evaluated using the following Interpretable Machine Learning method: model-agnostic Feature Importance and Accumulated Local Effect (ALE) plots. Nickel showed the highest accuracy (R^2 = 0.6, RMSE = 0.78), followed by chromium (R^2 = 0.41, RMSE = 0.68). Distance to peridotites was the most important feature for both Cr and Ni, but several remote sensing features including SWIR composites played a highly relevant role. This framework offers baseline maps at the landscape scale and valuable insights into the distribution drivers.*

Keywords*: chromium, nickel, Sentinel 2, feature importance, accumulated local effects, Sierra de las Nieves*

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de metales pesados (MP) en suelos plantea riesgos ambientales significativos debido a su persistencia y origen tanto natural como antropogénico (Wang *et al*., 2018). A pesar de los esfuerzos por parte de la normativa europea a través de las novedosa Ley de Monitorización del Suelo y los mapas supranacionales existentes , las evaluaciones a gran escala omiten la heterogeneidad local. Dada la alta variabilidad espacial, es indispensable una cartografía de alta resolución para

diseñar estrategias de remediación efectivas (Moradpour *et al*., 2023).

La teledetección ha emergido como una fuente prometedora para la predicción en estos entornos. La predicción espacial de MP basada en teledetección en suelos forestales se basa en métodos indirectos a partir del marco SCORPAN (McBratney *et al*., 2003). En este enfoque, las imágenes de la misión Sentinel-2 de la ESA suponen un nuevo impulso para la cartografía de MP proporcionando información de cobertura, vegetación y suelo en diferentes canales espectrales o índices derivados (Azizi *et al*., 2026). Este enfoque es valioso en áreas forestales donde el dosel obstruye la reflectancia del suelo, pero donde la contaminación pudiera alterar rasgos bioquímicos y respuestas espectrales de la vegetación (Kooistra *et al*., 2004). Además, la resolución espacio-temporal de Sentinel-2 permite describir trayectorias fenológicas (Caparros-Santiago *et al*., 2021) y extraer impulsores biofísicos como la dinámica vegetal o la actividad fotosintética acumulada.

La contribución innovadora de este trabajo reside en la combinación de técnicas de aprendizaje por apilamiento *stacking learning*) y selección de características junto con aprendizaje automático interpretable (IML), junto a datos derivados de Sentinel-2, para el modelado espacial de cromo (Cr) y níquel (Ni) en la Sierra de las Nieves, sur de España.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y datos

Sierra de las Nieves (SN) es un área montañosa mediterránea ubicada en el sur de España que comprende aproximadamente 230 km². Sierra de las Nieves (SN) presenta un entorno geológico muy diverso, que puede dividirse a grandes rasgos en dos dominios geológicos principales dispuestos a lo largo de una orientación NE-SO: en el área sur, un sector de peridotita ultramáfica, y en la parte norte y central, sector de dolomía karstificada.

Se recolectaron cien muestras de suelo superficial en octubre de 2019 con una profundidad media de alrededor de 20 cm, basándose en un muestreo sistemático en una cuadrícula de 1 km, intensificado en áreas de interés. Las muestras se tamizaron y digirieron por microondas con ácidos bidestilados, para realizar una espectrometría de masas mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) para obtener el contenido en Cr y Ni, fuertemente correlacionadas (R = 0.87). Los valores observados se transformaron logarítmicamente, eliminando seis muestras con valores NA para las características de teledetección (tabla 1).

Tabla 1. Resumen estadístico de los metales pesados utilizados en este estudio (n=94).

Ud: log(mg/kg)	Media	Mediana	Min	Max	Rango IQ
Cr	4.23	3.91	1.39	7.84	1.00
Ni	4.54	4.08	2.40	8.09	1.17

2.2. Características predictoras

El conjunto de datos estuvo compuesto por noventa y cuatro características predictoras, que pueden resumirse en cinco subconjuntos: compuestos de Sentinel-2 y sus derivadas, características fenológicas, características del terreno y características geológicas. Se obtuvieron cuatro compuestos trimestrales para el año 2019: composiciones de enero-marzo (primavera), abril-junio (verano), julio-septiembre (otoño) y octubre-diciembre (invierno). Las imágenes de la tesela 30SUF se descargaron a nivel de reflectancia en el Techo de la Atmósfera (TOA) utilizando el paquete de R sen2r . Se utilizaron siete bandas originales con una distancia de muestreo del suelo de 20 m para cada composición, es decir, las bandas roja, verde y azul del visible (R, V y A), de borde rojo (RE1, RE2 y RE3), NIR, SWIR1 y SWIR2. Los índices estacionales se derivaron de las imágenes compuestas para representar los parámetros de la cobertura del suelo (Tabla 2), comprendiendo 68 características (9 bandas y 8 índices por composición).

Tabla 2. Índices extraídos de los compuestos de este estudio.

Índice	Abb.	Formula
Índice de vegetación de diferencia normalizada	NDVI	(NIR-R)/(NIR+R)
Índice de vegetación mejorado 2	EVI2	2.5*(NIR-R)/((NIR+R+1)
Índice de diferencia normalizada del agua	NDWI	(V–NIR)/(V+NIR)
Índice de clorofila verde	GCI	(NIR/V)-1
Índice Rojo/Verde	RG_FE	Red/Green
Índice de reflectanciad de la antocianina	ARI	(1/V)-(1/RE1)
Silicatos ferrosos	FS	SWIR2/SWIR1
Óxidos ferrosos	FO	SWIR1/NIR

Las características fenológicas se obtuvieron de la serie temporal de Sentinel 2 para el período 2018-2020 (292 imágenes, 73 por año). Las series temporales de EVI2 se preprocesaron para reducir cualquier artefacto en las series temporales que pudiera alterar el patrón temporal derivado de los datos satelitales (Caparros-Santiago *et al*., 2021). Las series temporales se suavizaron utilizando la función logística doble implementada en el software TIMESAT (Jonsson and Eklundh, 2002). Se extrajeron las trece fenométricas para la primera estación detectada del año 2019, utilizando un método basado en un umbral del 10 %.

Se extrajeron varias características del terreno derivadas del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del área de estudio. Estos MDE se obtuvieron por interpolación a partir de los vuelos LIDAR de la primera cobertura del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), con una densidad de 0,5 puntos/m². La distancia de muestreo del suelo original fue de 5 metros, remuestreada a 20 m y a la malla de S-2. Las características del terreno se

calcularon en SAGA GIS 7.8.2 . Se derivaron dos características geológicas a partir de información geológica cualitativa del Instituto Geológico y Minero de España (IGME): la distancia a rocas peridotitas y la distancia a fracturas.

2.3. Modelado predictivo

El marco de modelado predictivo constó de tres etapas clave: (i) el entrenamiento de un modelo apilado basado en tres algoritmos base (Random Forest (RF) , Máquinas de Vector Soporte (SVR) y una Red Neuronal (NN)) usando RF como algoritmo de apilado, (ii) un método de Selección de Características utilizando la Selección Secuencial hacia Adelante (SFS) aplicado tras la selección de los hiperparámetros de los modelos apilados, y (iii) la aplicación de dos técnicas de IML para la interpretación del modelo a posteriori: importancia de características agnóstica al modelo y gráficas de efectos locales acumulados. Se usaron dos métricas para evaluar la exactitud, R^2 y raíz del eror cuadrático medio, con las siguientes fórmulas:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)^2}{n}}$$

donde: RSS = Suma de cuadrados residuales, TSS = Suma total de cuadrados, n = número de observaciones, p_i = valor i-ésimo predicho, o_i = valor observado para la observación i-ésima.

3. RESULTADOS

Los resultados del modelado de Cr y Ni se muestran en la Tabla 3, mostrando que el enfoque de apilamiento por stacks con el modelo de selección SFS superó a los algoritmos base utilizados en este estudio. Los mejores resultados comparados por MP fueron obtenidos para Ni, con R^2 = 0,6 y RMSE = 0,78 log(mg/kg), mientras que Cr alcanzó un R^2 de 0,41. Se observó una clara jerarquía de rendimiento entre los enfoques de modelado. El modelo apilado con selección de características demostró una capacidad predictiva superior, seguido por el modelo apilado con todas las características, el cual a su vez superó a los mejores aprendices base individuales.

Tabla 3. Resultados del modelado.

Algoritmo	Métrica	Cr	Ni
SVR	R^2	-0,02	-0,34
	RMSE	1,13	1,52
RF	R^2	0,13	0,07
	RMSE	0,95	1,22
NN	R^2	-1,05	-0,03
	RMSE	1,03	1,24
STACK	R^2	0,13	-0,05
	RMSE	0,84	1,07
STACK+SFS	R^2	0,41	0,6
	RMSE	0,68	0,78

La Figura 2 resume los resultados de IML para el modelo apilado de Cr. La distancia a las peridotitas se identificó como el predictor más significativo (importancia media de 1,97); los gráficos ALE revelan que las muestras próximas a estas litologías exhiben predicciones de Cr superiores a la media en más de 2 log(mg/kg). Las bandas SWIR1_aut y SWIR2_aut siguieron en relevancia, mostrando correlaciones específicas entre la reflectancia y las variaciones en la predicción de concentración. Paralelamente, la Figura 3 presenta la clasificación para el modelo de Ni. La distancia a las peridotitas se confirmó nuevamente como el factor determinante (importancia de 2,67), mostrando en los gráficos ALE una tendencia análoga al Cr, con valores elevados en zonas próximas a peridotitas. La Elevación y SWIR2_sum destacaron como predictores secundarios; elevaciones superiores a 1000 m y baja reflectancia en SWIR2_sum se asociaron con desviaciones positivas en la concentración de Ni. Al igual que en el modelado de Cr, la mayoría de las variables seleccionadas provienen de datos de teledetección.

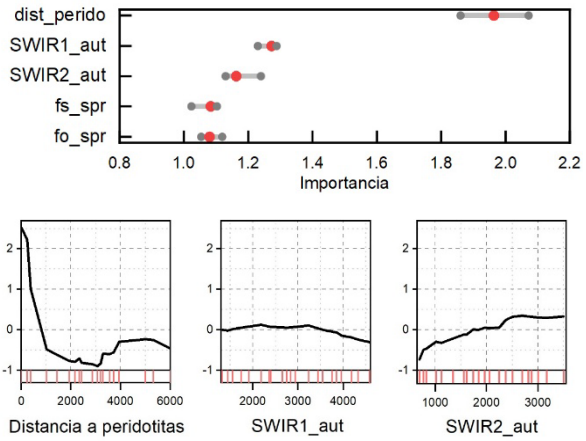


Figura 2. Resultados del IML para Cr. Arriba: clasificación de características para la predicción de Cr utilizando el modelo apilado con selección de características. Abajo: gráficos de efecto local acumulado para las tres características más importantes en la predicción de Cr.

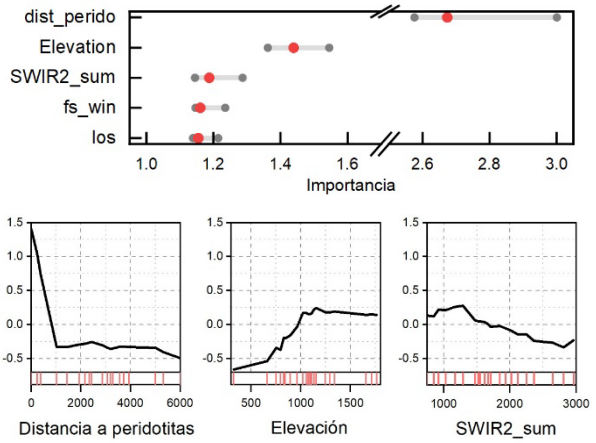


Figura 3. Resultados de IML para Ni. Arriba: clasificación de características para la predicción de Ni utilizando el modelo apilado con selección de características. Abajo: gráficos de efecto local acumulado para las tres características más importantes en la predicción de Ni.

La Figura 4 ilustra la distribución espacial de los MP del suelo. El Cr y el Ni exhibieron patrones espaciales similares, con un eje de alta concentración (más de 5,2

y 6,43 log(mg/kg) para Cr y Ni respectivamente) extendiéndose desde el este hacia el sur, correspondiendo a la geología de peridotitas. Sin embargo, en el resto del área de estudio, estas dos características mostraron patrones espaciales distintos.

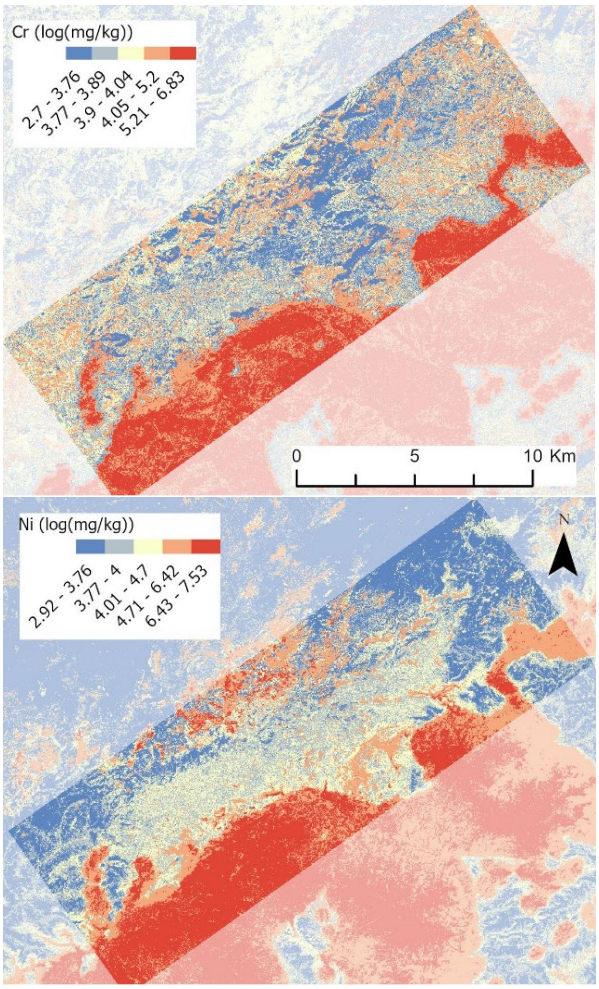


Figura 4. Cartografía de Cr (arriba) y Ni (abajo) a partir de la predicción del mejor modelo.

4. CONCLUSIONES

Este estudio modeló el contenido en cromo (Cr) y níquel (Ni) del suelo, integrando el aprendizaje por stacks con IML a partir de múltiples conjuntos de características predictoras de teledetección, terreno y características geológicas. La distancia a las peridotitas fue clave para las predicciones de Cr y Ni. Las observaciones dentro del área de peridotita se asociaron con concentraciones elevadas debido a depósitos localizados de mineral de Cr-Ni. Sin embargo, algunas características de teledetección, particularmente las composiciones SWIR, demostraron ser significativamente relevantes. En general, los modelos de apilamiento con selección de características superaron a los apilados con todas las características y a los modelos base. Los resultados destacaron el rendimiento del Ni, con el R^2 arrojando una precisión robusta (R^2 = 0,6; RMSE = 0,78), con resultados moderados logrados por los modelos de Cr (R^2 = 0,41; RMSE = 0,68). Estas metodologías de cartografía de suelos todavía pueden enfrentar limitaciones debido a la complejidad geológica y de la cobertura del suelo mediterránea. Las futuras misiones hiperespectrales (p. ej., CHIME, SBG) que combinan altas resoluciones temporales y espectrales podrían abordar estos desafíos, mejorando la predicción indirecta de MP del suelo en entornos heterogéneos.

5. AGRADECIMIENTOS

El primer autor es beneficiario de una ayuda FPU financiada por el Ministerio de Universidades español (Referencia FPU18/04274). Los autores desean expresar su agradecimiento por el apoyo financiero proporcionado por el proyecto 2914/2022, financiado por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. MPM agradece a la Fundación Portuguesa para la Ciencia y la Tecnología (FCT) la financiación estratégica de CERENA (UIDB/04028/2025) y a través del proyecto individual 2023.08653.CEECIND.

6. REFERENCIAS

Azizi, K., Zhao, S., Ayoubi, S., Kamangarpour, A., Nabiollahi, K., Ge, Y., Zhao, K., Rodrigo-Comino, J., & Demattê, J. A. M. (2026). Integrating proximal sensing data (soil spectra and magnetic susceptibility) with the common covariates to predict soil carbon pools in semiarid regions. *JSTILL*, *256*. https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106840

Caparros-Santiago, J. A., Rodriguez-Galiano, V., & Dash, J. (2021). Land surface phenology as indicator of global terrestrial ecosystem dynamics: A systematic review. *ISPRSJPRS*, *171*, 330-347. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.019

Jonsson, P., & Eklundh, L. (2002). Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *40*(8), 1824-1832. https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802519

Kooistra, L., Salas, E. A. L., Clevers, J. G. P. W., Wehrens, R., Leuven, R. S. E. W., Nienhuis, P. H., & Buydens, L. M. C. (2004). Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains. *Environmental Pollution*, *127*(2), 281-290. https://doi.org/10.1016/s0269-7491(03)00266-5

McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, *117*(1-2), 3-52. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4

Moradpour, S., Entezari, M., Ayoubi, S., Karimi, A., & Naimi, S. (2023). Digital exploration of selected heavy metals using Random Forest and a set of environmental covariates at the watershed scale. *Journal of Hazardous Materials*, *455*. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131609

Wang, F., Gao, J., & Zha, Y. (2018). Hyperspectral sensing of heavy metals in soil and vegetation: Feasibility and challenges. *ISPRSJPRS*, *136*, 73-84. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.12.003

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.228

Evaluación de la heterogeneidad composicional de una Piedra Natural ornamental mediante técnicas de teledetección óptica de proximidad.

Cruz Martínez, Juncal A. [1] **García-Meléndez, Eduardo** [1] **Rodríguez Álvarez, Indira** [1] **Coronado, Ismael** [1] **Ferrer-Julià, Montserrat** [1] **Bakker, Winn H.** [2] **Valenzuela, Pablo** [1] **Colmenero Hidalgo, Elena** [1] **Pereira, Inés** [1] **Espín de Gea, Antonio** [3]

[1] (1) Grupo de Investigación Geología Ambiental, Cuaternario y Geodiversidad (Q-GEO), Universidad de León., España

[2] (2) Department of Applied Earth Sciences, Faculty of Geo information Science & Earth Observation (ITC), University Twente, Hallenweg 8, 7522 NH Enschede, The Netherlands.

[3] (3) Unidad Tecnológica Geológico-Minera del Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales (CTM),Cehegín (Murcia, España).

ORCID: Cruz Martínez 0000-0003-2768-9242 García-Meléndez 0000-0001-8217-8205 Rodríguez Álvarez 0000-0002-2518-952X Coronado 0000-0002-8469-6003 Ferrer-Julià 0000-0001-8021-1040 Bakker 0000-0003-0382-7225 Valenzuela 0000-0002-2424-5884 Colmenero Hidalgo 0000-0002-5449-2739 Pereira 0000-0002-7328-4791

Correspondencia: jcrum@unileon.es egarm@unileon.es iroda@unileon.es icorv@unileon.es mferj@unileon.es w.h.bakker@utwente.nl pvalm@unileon.es e.colmenero@unileon.es iperr@unileon.es antonio.espin@ctmarmol.es

RESUMEN

La Piedra natural presenta una variabilidad composicional que a menudo pasa desapercibida mediante las inspecciones visuales convencionales en cantera. En este trabajo se caracteriza la roca carbonatada ornamental "Emperador Castril" dicha heterogeneidad química y mineralógica mediante la integración de técnicas espectroscópicas (espectroscopia de reflectancia difusa de laboratorio e imágenes hiperespectrales). La validación se realiza con técnicas analíticas (difracción y fluorescencia de rayos X) sobre muestras comerciales y de descarte. La espectroscopia de reflectancia VNIR-SWIR puntual permitió identificar bandas diagnósticas de la dolomita (~2325 nm), presencia de arcillas y contenido de hierro. Posteriormente, las imágenes hiperespectrales permitieron conocer la distribución irregular de las distintas fases minerales aplicando el algoritmo de clasificación Spectral Angle Mapper (SAM). Todas las técnicas mostraron coherencia en revelar una composición predominantemente dolomítica, con presencia minoritaria de calcita y, en casos específicos, cuarzo y fases arcillosas, además de confirmar una variabilidad composicional ligada al mayor aporte detrítico. Se concluye que el uso de tecnologías espectroscópicas in situ puede optimizar la clasificación del material y la eficiencia de la explotación, reduciendo los residuos mineros conforme a la normativa europea.

Palabras clave: *Difracción de Rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), reflectancia difusa de laboratorio (VNIR-SWIR), imagen hiperespectral, roca carbonatadas*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 19 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Evaluación de la heterogeneidad composicional de una Piedra Natural ornamental mediante técnicas de teledetección óptica de proximidad.

Cruz Martínez, Juncal A. [(1)], García-Meléndez, Eduardo [(1)], Rodríguez Álvarez, Indira [(1)], Coronado, Ismael [(1)], Ferrer-Julià, Montserrat [(1)], Bakker, Winn H. [(2)], Valenzuela, Pablo [(1)], Colmenero Hidalgo, Elena [(1)], Pereira, Inés [(1)], Espín de Gea, Antonio [(3)]

[(1)] Grupo de Investigación Geología Ambiental, Cuaternario y Geodiversidad (Q-GEO), Universidad de León., España.

0000-0003-2768-9242, jcrum@unileon.es; 0000-0001-8217-8205, egarm@unileon.es

0000-0002-2518-952X, iroda@unileon.es ; 0000-0000-0000-0001, icorv@unileon.es

0000-0001-8021-1040, mferj@unileon.es ; 0000-0002-2424-5884, pvalm@unileon.es

0000-0002-5449-2739, e.colmenero@unileon.es ; 0000-0002-7328-4791, iperr@unileon.es

[(2)] Department of Applied Earth Sciences, Faculty of Geo information Science & Earth Observation (ITC), University Twente, Hallenweg 8, NH Enschede, The Netherlands.

0000-0003-0382-7225, w.h.bakker@utwente.nl

[(3)] Unidad Tecnológica Geológico-Minera del Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales (CTM), Cehegín (Murcia, España).

antonio.espin@ctmarmol.es

Resumen: La Piedra natural presenta una variabilidad composicional que a menudo pasa desapercibida mediante las inspecciones visuales convencionales en cantera. En este trabajo se caracteriza la roca carbonatada ornamental "Emperador Castril" dicha heterogeneidad química y mineralógica mediante la integración de técnicas espectroscópicas (espectroscopia de reflectancia difusa de laboratorio e imágenes hiperespectrales). La validación se realiza con técnicas analíticas (difracción y fluorescencia de rayos X) sobre muestras comerciales y de descarte. La espectroscopia de reflectancia VNIR-SWIR puntual permitió identificar bandas diagnósticas de la dolomita (~2325 nm), presencia de arcillas y contenido de hierro. Posteriormente, las imágenes hiperespectrales permitieron conocer la distribución irregular de las distintas fases minerales aplicando el algoritmo de clasificación *Spectral Angle Mapper* (SAM). Todas las técnicas mostraron coherencia en revelar una composición predominantemente dolomítica, con presencia minoritaria de calcita y, en casos específicos, cuarzo y fases arcillosas, además de confirmar una variabilidad composicional ligada al mayor aporte detrítico. Se concluye que el uso de tecnologías espectroscópicas *in situ* puede optimizar la clasificación del material y la eficiencia de la explotación, reduciendo los residuos mineros conforme a la normativa europea.

Palabras clave: Difracción de Rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), reflectancia difusa de laboratorio (VNIR-SWIR), imagen hiperespectral, roca carbonatadas.

Assessment of the compositional heterogeneity of an ornamental natural stone using optical proximal sensing techniques

Abstract*: Natural stone exhibits compositional variability that often goes unnoticed during conventional visual inspections in quarries. This study characterizes the chemical and mineralogical heterogeneity of the ornamental carbonate rock "Emperador Castril" by integrating spectroscopic techniques (laboratory diffuse reflectance spectroscopy and hyperspectral imaging). Validation was performed using analytical techniques (X-ray diffraction and fluorescence) on commercial and discard samples. Spot VNIR-SWIR reflectance spectroscopy allowed for the identification of diagnostic bands of dolomite (~2325 nm), the presence of clays, and iron content. Subsequently, hyperspectral imaging revealed the irregular distribution of the different mineral phases using the Spectral Angle Mapper (SAM) classification algorithm. All techniques consistently reveal a predominantly dolomitic composition, with minor calcite and, in specific cases, quartz and clay phases, while also confirming compositional variability linked to the greater detrital input. It is concluded that the use of in-situ spectroscopic technologies can*

optimize material classification and mining efficiency, reducing mining waste in accordance with European regulations.

Keywords*: X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), laboratory diffuse reflectance (VNIR-SWIR), hyperspectral imaging, carbonate rocks.*

1. INTRODUCCIÓN

La piedra natural engloba a las rocas (ígneas, metamórficas o sedimentarias) procesadas en bloques o losas para la construcción y decoración como rocas ornamentales. Aunque comercialmente se dividen en granitos, mármoles y pizarras, cada grupo incluye una amplia variedad de rocas con distintas propiedades (IGME, 2022). El mercado de rocas ornamentales carbonatadas es un sector estratégico global. Sin embargo, la industria enfrenta el desafío de la heterogeneidad del material. La clasificación tradicional en cantera se basa en criterios visuales (color, textura), los cuales son insuficientes para detectar variaciones químicas o mineralógicas que afectan a la durabilidad (resistencia y dureza) y al valor comercial. Este trabajo se centra en el "Mármol Emperador Castril", una dolomía utilizada en arquitectura moderna, con el objetivo de evaluar su variabilidad mediante técnicas analíticas avanzadas y espectroscopía de reflectancia e imágenes hiperespectrales.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología se diseñó priorizando técnicas de teledetección no destructivas, seguidas de una fase de validación analítica para confirmar los hallazgos basados en la respuesta espectral (Figura 1).

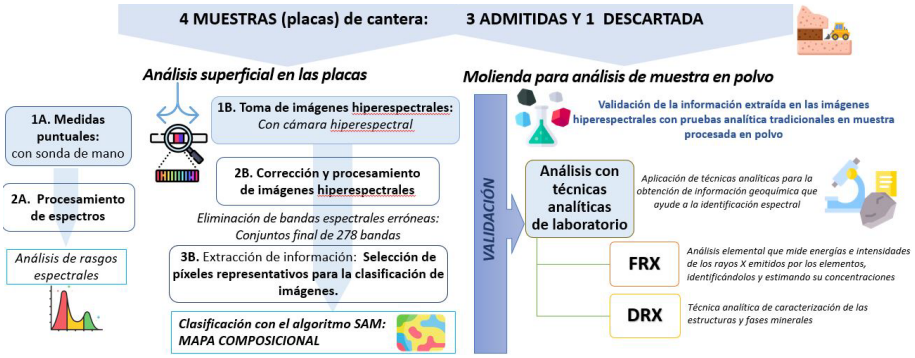


Figura 1. Esquema del procedimiento seguido para los análisis de la roca ornamenta

2.1. Selección de Muestras

Se seleccionaron cuatro placas representativas del "Mármol Emperador Castril" (5-10 cm^2): tres clasificadas comercialmente como aceptables (CMam-3, CMam-4a, CMam-4b) y una de descarte (CMam-2) (Figura 2).

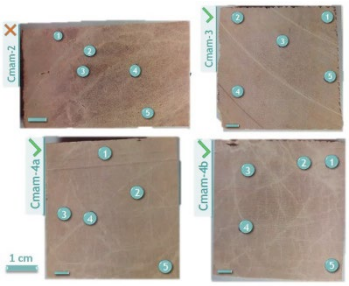


Figura 2. Las 4 muestras de Piedra Natural analizadas incluyendo en su superficie los puntos de análisis para espectroscopia VNIR-SWIR, DRX y FRX.

2.2. Teledetección de Proximidad

2.2.1. Espectroscopía de Reflectancia puntual

Se adquirieron curvas espectrales (350-2500 nm) con un espectrorradiómetro *ASD-Fieldspec® 4* en el laboratorio de Geodinámica Externa de la Universidad de León. Se tomaron medidas en cinco puntos por placa de roca mediante una sonda de contacto calibrada con un blanco de *Spectralon®* para identificar rasgos de absorción específicos. La sonda presenta una fibra óptica que recoge espectros con 2151 bandas desde 350-2500 nm, con una resolución espectral de 3 nm en el rango de 350-1000 nm y de 10 nm en el rango de 1000-2500 nm. Los espectros fueron procesados con el *software SpectraGryph v.1.2*.

2.2.2. Imágenes Hiperespectrales (HSI)

Las imágenes obtenidas de las placas se captaron mediante un sensor SPECIM (SWIR) de laboratorio con la diposición establecidapor la Universidad de Twente (Países Bajos) obteniendo unas imágenes con una resolución espacial de 0.256 mm y una resolución espectral de 12 nm. Los datos se procesaron con el programaENVI 5.2.

El procesamiento consistió inicialmente en eliminar los datos de bandas erróneas para trabajar finalmente con 278 bandas correspondientes al SWIR. Posteriormente se analizó visualmente las muestras a través de varias composiciones en color con el fin de detectar visualmente la distribución espacial general de las diferentes zonas composicionales. A continuación, se comparan las curvas espectrales de píxeles representativos de diferentes áreas de la imagen con la respuesta espectral de los minerales de la biblioteca espectral del USGS (Kokaly *et al*. 2017). A partir de estos

píxeles representativos se seleccionaron *endmembers* para la posterior clasificación de imágenes. Se utilizó como algoritmo de clasificación el *Spectral Angle Mapper* (SAM), ya que se basa en la similitud espectral entre la reflectancia espectral de los píxeles de la imagen y los espectros de referencia de la misma con materiales conocidos de bibliotecas espectrales (Rodriguez *et al*., 2025). Se ejecutó con un umbral de 0.13 radianes. Los píxeles más alejados del umbral máximo especificado en radianes no se clasifican.

2.3. Validación Analítica de Laboratorio

Para validar la interpretación espectral, se analizaron muestras en polvo obtenidas mediante un micro-taladro en los mismos puntos de análisis de la espectroscopia de reflectancia VNIR-SWIR, y se estudiaron mediante:
Difracción de Rayos X (DRX): Técnica utilizada con un equipo *Bruker D8 Advance* del Servicio General de Difracción de Rayos X de la Universidad de Salamanca para la identificación mineralógica cuali-cuantitativa.
Fluorescencia de Rayos X (FRX): Análisis elemental con un equipo portátil *Niton XL3t GOLDD+* de la Universidad de Twente (Países Bajos), para determinar la concentración de elementos menores y traza.

3. RESULTADOS

Los datos se muestran comentados principalmente para CMam-2 y CMam-3 por mostrar los resultados más diferenciados y mayor contraste, con respecto a las otras dos placas, mucho más homogéneas.

3.1. Caracterización espectral

Los sensores ópticos detectaron una variabilidad composicional clara en todas las muestras con las dos técnicas utilizadas. Así, en cuanto a los espectros de reflectancia, un rasgo de absorción que se aprecia en todos los espectros de las distintas muestras es en torno a 2300 nm (figura 3). Esa característica de absorción es causada por procesos vibracionales de los iones carbonato (CO_3^{2-}), alrededor de 2315 nm para la dolomita y de 2335 nm para la calcita.

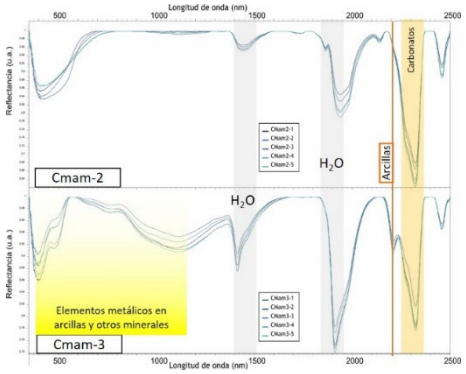


Figura 3. Curvas espectrales VNIR -SWIR de las muestras CMam-2 y CMam-3.

La presencia de minerales arcillosos intercalados con carbonatos suele estar indicada por un rasgo de absorción vibracional alrededor de 2200 y 2315 nm debido a la combinación del estiramiento de los grupos OH con los modos de flexión Al-OH y Mg-OH, respectivamente (Zaini, *et al*., 2014).

Con respecto a los distintos espectros de las cuatro muestras de roca, los que se diferencian más en sus rasgos de absorción son los que perteneces a la muestra Cmam-3. No solo presentan los rasgos distintivos antes mencionados, sino que en el rango de longitudes de onda del VNIR sus rasgos, debido a la presencia de minerales con contenido en hierro, son claramente diferentes a los de las demás muestras.

Para la clasificación SAM se escogieron 5 *endmembers*, correspondientes tanto a píxeles de carácter monomineral como de mezclas, cuyos nombres aparecen en la leyenda de la figura 4, en donde se aprecian las áreas en las que aparecen las 5 clases correspondientes. Destaca la prevalencia de fases puras en la placa CMam-2, con respecto a la muestra CMam-3, en donde las fases-mezcla con arcillas están presentes en una proporción muy superior.

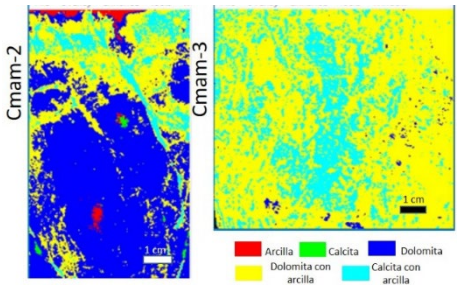


Figura 4. Mapas composicionales a partir de las imágenes hiperespectrales de las muestras CMam-2 y CMam-3

3.2. Validación y Confirmación Analítica (DRX y FRX)

Los datos de laboratorio confirmaron con precisión las observaciones de las técnicas de teledetección de proximidad. Los resultados obtenidos demuestran la coexistencia de 3 fases minerales: calcita, dolomita y cuarzo (figura 5). Esta última presente solo en la muestra Cmam-3 y en un porcentaje menor al 5%. Sin embargo, sí se aprecia variabilidad en el porcentaje de calcita/dolomita en las distintas muestras. Siendo en la mayoría de los casos dominante el contenido en dolomita.

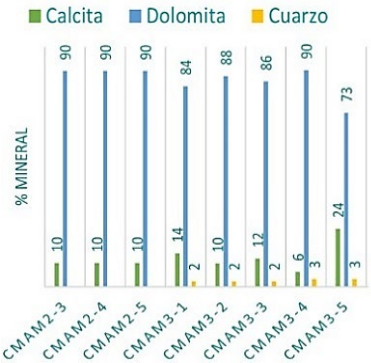


Figura 5. Análisis de DRX de las muestras CMam-2 y CMam-3.

Los análisis químicos de FRX (figura 6.) evidencian que las muestras consisten en carbonatos cuya composición en elementos traza es muy variable. En todas las muestras se observa distinto contenido en Mg, Ba, Cl, Cr, Fe, Ti, K, S, Si y Sr, pero la muestra CMam-3 muestra mayor contenido en Ba, Cr, Fe, Ti, K y Si que el resto. Además, también presenta

elementos como el Rb y el Al con valores significativos. Curiosamente, esta muestra es la que mayor porcentaje en cuarzo tiene y la segunda en cuanto a dolomita (por detrás de Cmam-2).

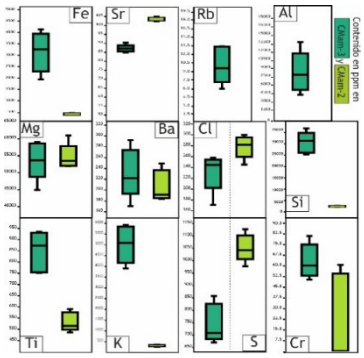


Figura 6. Análisis de FRX de las muestras CMam-2 y CMam-3.

4. DISCUSIÓN

La aplicación de técnicas de teledetección óptica de proximidad ha demostrado ser una metodología robusta para la evaluación de la heterogeneidad composicional del Mármol Emperador Castril. El análisis de los datos espectrales y de imagen permite una caracterización detallada que supera las limitaciones de la inspección visual convencional en cantera.

4.1. Análisis Espectral e Imagen Hiperespectral (VNIR-SWIR)

La espectroscopía VNIR-SWIR y la imagen hiperespectral se postulan como herramientas diagnósticas fundamentales para la identificación de fases minerales en tiempo real. La posición de los rasgos de absorción de los carbonatos, gobernada por la masa del catión, permitió discriminar con precisión entre la dolomía (~2315 nm) y la calcita (~2335 nm).

El procesamiento de las imágenes hiperespectrales mediante el algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) facilitó la generación de mapas composicionales que evidencian la distribución espacial de estas fases y sus mezclas. Particularmente, la detección de rasgos de absorción vibracional en torno a los 2200 nm y 2300 nm permitió identificar la presencia de filosilicatos (arcillas) intercalados en la matriz carbonatada, un hallazgo especialmente abundante en la muestra CMam-3. Asimismo, el análisis del grado de hidratación mediante los rasgos de absorción en 1400 nm y 1900 nm aportó información adicional sobre la presencia de minerales arcillosos hidratados o posibles inclusiones fluidas.

4.2. Validación mediante DRX y FRX

Los resultados obtenidos a través de la teledetección fueron rigurosamente verificados mediante técnicas analíticas de laboratorio. El análisis por DRX confirmó la naturaleza predominantemente dolomítica de la roca y validó la presencia de cuarzo y fases arcillosas en las muestras donde la espectroscopía ya había detectado anomalías (como CMam-3).

Por su parte, los datos de FRX corroboraron la variabilidad geoquímica observada espectralmente. Se observó una correlación directa entre los espectros con rasgos de absorción más intensos en el VNIR y mayores concentraciones de elementos metálicos (Fe) y detríticos (Si, Al, K, Ti) en la FRX. Esta validación cruzada acredita que la respuesta espectral es un indicador fiable de la composición química y mineralógica de la piedra natural.

5. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

Este estudio subraya que los criterios visuales tradicionales son insuficientes para garantizar la homogeneidad técnica del material. La teledetección permitió identificar que muestras aceptadas visualmente (CMam-3) poseen impurezas silíceas y arcillosas que podrían comprometer su durabilidad y proceso de pulido. Por el contrario, materiales descartados (CMam-2) mostraron una pureza espectral y química equiparable a los de alta calidad, lo que representa una oportunidad de recuperación de recursos.

Se concluye que la integración de sensores hiperespectrales y espectrorradiómetros *in situ* facilita una minería inteligente y sostenible. Esta tecnología puede llegar a optimizar la clasificación del material, reducir la generación de residuos mineros y alinear a la industria extractiva con los objetivos de Economía Circular de la Unión Europea.

Como línea futura, la metodología podría escalarse a nivel de cantera mediante la integración de sensores hiperespectrales embarcados en drones, permitiendo cartografías composicionales rápidas y no invasivas, con alto potencial para optimizar la explotación, mejorar la toma de decisiones y reducir la generación de residuos.

6. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por los proyectos HYPOPROCKS (PDC2021-121352-100), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR, y por el proyecto PID2023-150229OB-100 (HYPERLANDFORM), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER

7. REFERENCIAS

IGME (2022). Panorama Minero 2022. Piedra Natural. Instituto Geológico y Minero de España - CSIC. https://web.igme.es/PanoramaMinero/actual/PIEDRA%20NATURAL%202021.pdf

Kokaly, R. F., Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Pearson, N. C., ... & Klein, A. J. (2017). *USGS spectral library version 7* (No. 1035). US Geological Survey.

Rodríguez Álvarez, I., García-Meléndez, E., Ferrer-Juliá, M., Bakker, W., Cruz, J. A., & Espín de Gea, A. (2025). Teledetección hiperespectral de proximidad para la caracterización de rocas carbonatadas en el infrarrojo de onda corta (SWIR). *Geogaceta*, *77*, 55–58. https://doi.org/10.55407/geogaceta108997

Zaini, N., Van der Meer, F., & Van der Werff, H. (2014). Determination of Carbonate Rock Chemistry Using Laboratory-Based Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, *6*(5), 4149-4172. https://doi.org/10.3390/rs6054149

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.233

Cartografía de la distribución espacial de minerales indicadores de drenaje ácido de mina mediante imágenes WorldView-3

Pereira Rodríguez, Inés [1] **García-Meléndez, Eduardo** [1] **Ferrer-Julià, Montserrat** [1] **van der Werff, Harald** [2]

[1] Universidad de León, España

[2] Faculty for Geo-Information Science and Earth Observation, Unversity of Twente, Netherlands

ORCID: Pereira Rodríguez 0000-0002-7328-4791 García-Meléndez 0000-0001-8217-8205 Ferrer-Julià 0000-0001-8021-1040 van der Werff 0000-0002-2871-3913

Correspondencia: iperr@unileon.es egarm@unileon.es mferj@unileon.es h.m.a.vanderwerff@utwente.nl

RESUMEN

El drenaje ácido de mina (DAM) es uno de los principales problemas ambientales asociados a la minería metálica, ya que provoca la oxidación de los sulfuros, como la pirita, y la consiguiente liberación de metales, iones sulfato y acidificación del agua. Este proceso favorece la precipitación de minerales secundarios de hierro, como la hematite, la goethita y la jarosita, cuya respuesta espectral permite su detección mediante teledetección satelital. En este estudio se evalúa la capacidad de las imágenes multiespectrales VNIR del satélite WorldView-3 para cartografiar y discriminar estos minerales en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SE de España). Para ello se aplicaron dos técnicas espectrales —cocientes de bandas y una técnica de ajuste parabólico basada en máximos de reflectancia— y los resultados se validaron mediante difracción de rayos X de 74 muestras superficiales de suelo. Los resultados indican que WorldView-3 permite cartografiar los patrones espaciales asociados al DAM y discriminar parcialmente entre hematite y el grupo goethita-jarosita, evidenciando su potencial para estudios de detalle en áreas mineras afectadas por procesos de oxidación de sulfuros.

Palabras clave: *Hematita, Goethita, Jarosita, Máximo de reflectancia, Ajuste parabólico*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Cartografía de la distribución espacial de minerales indicadores de drenaje ácido de mina mediante imágenes WorldView-3

Pereira Rodríguez, Inés [(1)], García-Meléndez, Eduardo [(1)], Ferrer-Julià, Montserrat [(1)], van der Werff, Harald [(2)]

[(1)] Universidad de León, España.

0000-0002-7328-4791, iperr@unileon.es ; 0000-0001-8217-8205, egarm@unileon.es

0000-0001-8021-1040, mferj@unileon.es

[(2)] Faculty for Geo-Information Science and Earth Observation, Unversity of Twente, Netherlands.

0000-0002-2871-3913, h.m.a.vanderwerff@utwente.nl.

Resumen: El drenaje ácido de mina (DAM) es uno de los principales problemas ambientales asociados a la minería metálica, ya que provoca la oxidación de los sulfuros, como la pirita, y la consiguiente liberación de metales, iones sulfato y acidificación del agua. Este proceso favorece la precipitación de minerales secundarios de hierro, como la hematite, la goethita y la jarosita, cuya respuesta espectral permite su detección mediante teledetección satelital. En este estudio se evalúa la capacidad de las imágenes multiespectrales VNIR del satélite WorldView-3 para cartografiar y discriminar estos minerales en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SE de España). Para ello se aplicaron dos técnicas espectrales —cocientes de bandas y una técnica de ajuste parabólico basada en máximos de reflectancia— y los resultados se validaron mediante difracción de rayos X de 74 muestras superficiales de suelo. Los resultados indican que WorldView-3 permite cartografiar los patrones espaciales asociados al DAM y discriminar parcialmente entre hematite y el grupo goethita-jarosita, evidenciando su potencial para estudios de detalle en áreas mineras afectadas por procesos de oxidación de sulfuros.

Palabras clave: Hematite, Goethita, Jarosita, Máximo de reflectancia, Ajuste parabólico

Mapping the spatial distribution of acid mine drainage indicator minerals using WorldView-3 imagery

Abstract: *Acid mine drainage (AMD) is one of the main environmental problems associated with metallic mining, as it promotes the oxidation of sulphides such as pyrite and the subsequent release of metals, sulphate ions, and water acidification. This process favours the precipitation of secondary iron minerals, such as hematite, goethite, and jarosite, whose spectral response enables their detection through satellite remote sensing. This study evaluates the capability of WorldView-3 VNIR multispectral imagery to map and discriminate these minerals in the Sierra Minera de Cartagena–La Unión (SE Spain). Band ratios and a parabolic fitting approach based on reflectance maxima were applied and validated against X-ray diffraction analyses of 74 surface soil samples. The results indicate that WorldView-3 is able to map the general spatial patterns of AMD and provides partial discrimination between hematite and the goethite–jarosite group, highlighting its potential for detailed mineral mapping in mining-affected environments.*

***Keywords**: Hematite, Goethite, Jarosite, Reflectance Maximum, Parabolic Fitting*

1. INTRODUCCIÓN

El drenaje ácido de mina (DAM) es un problema ambiental asociado a la oxidación de sulfuros expuestos durante la actividad minera, que genera aguas ácidas con elevadas concentraciones de iones de sulfato y metales disueltos, degradando suelos, ecosistemas acuáticos y recursos hídricos. Los cambios fisicoquímicos de estas aguas favorecen la precipitación de minerales secundarios como la jarosita, que se forma en ambientes muy ácidos y ricos en sulfatos; la goethita, asociada a condiciones de acidez moderada; y la hematite, que representa la fase más estable y se desarrolla en entornos con pH más elevado (Nordstrom *et al*., 2015). En este contexto, la distribución espacial de estos minerales constituye un indicador de las condiciones ambientales.

Estos minerales presentan características espectrales diagnosticas en la región del visible e infrarrojo cercano

(VNIR), con absorciones entre 450–550 nm y 800–1100 nm, y un máximo de reflectancia entre 600–900 nm (Figura 1) (Rossman and Ehlmann, 2019). La posición precisa de estos rasgos permite su discriminación utilizando sensores satelitales. En este trabajo se emplean imágenes multiespectrales de la región VNIR de WordlView-3. WordlView-3 es un sensor comercial que ofrece una resolución espacial elevada (≈1,2 m), lo que lo convierte en una herramienta especialmente adecuada para estudios de detalle en áreas mineras complejas. Este estudio evalúa la eficacia de WorldView-3 para la identificación de hematite, goethita y jarosita en una antigua región minera.

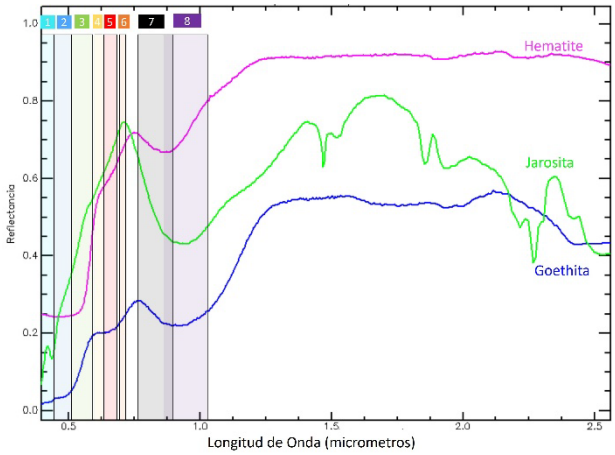


Figura 1. Curvas espectrales de minerales de hierro y localización de las bandas de WorldView-3.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Figura 2), situada en el sureste de España, es un antiguo distrito minero de explotación de plomo, zinc y hierro durante los siglos XIX y XX. Esta explotación generó grandes volúmenes de residuos mineros que, tras el cese de la actividad en 1991, quedaron expuestos sin restauración ambiental (López-Morell *et al*., 2019).

El área presenta un clima mediterráneo semiárido, con precipitaciones escasas e irregulares, que se concentran en episodios torrenciales, que favorecen la erosión y el transporte de materiales mineros a través de ramblas.

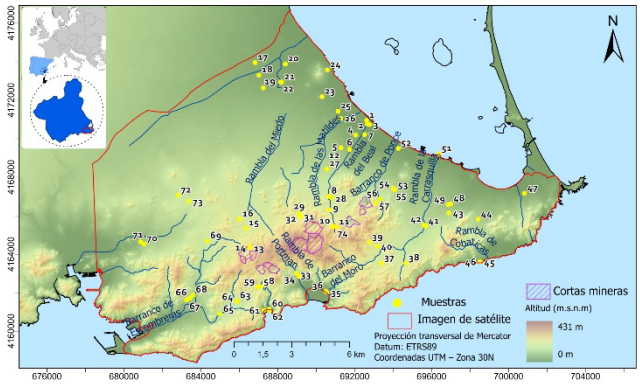


Figura 2. Localización del área de estudio y muestras.

2.2. Datos satelitales y pre-procesado

Se empleó una imagen de WorldView-3 adquirida el 13 de julio de 2020 (Vantor, Colorado, EE.UU.). La imagen dispone de 8 bandas en la región VNIR con una resolución espacial uniforme de aproximadamente 1,2 m.

La imagen se utilizó como producto de reflectancia en superficie. La corrección atmosférica fue realizada por el proveedor (Maxar) mediante el procesador AComp.

Antes del análisis espectral, se aplicaron máscaras de vegetación y agua mediante los índices NDVI y NDWI, enmascarando los píxeles con valores de NDVI fuera del rango 0,0–0,3 y NDWI > 0,04.

2.3. Técnicas espectrales

2.3.1. Cocientes de bandas

La técnica de cocientes de bandas se utilizó para diferenciar composicionalmente hematite, goethita y jarosita en función de sus respuestas espectrales en el visible. Los óxidos e hidróxidos de hierro presentan una mayor reflectancia en la región del rojo (600–700 nm) que en la del verde (500–570 nm), aunque con diferencias relativas entre minerales. A partir de este comportamiento espectral se calculó el siguiente cociente (Eq. 1) (Cudahy, 2012):

$$Cociente\ composicional = \frac{\text{Verde}}{\text{Rojo}} \qquad (1)$$

Se emplearon las bandas verde (B3) y roja (B5).

Valores elevados del cociente se asocian a superficies dominadas por minerales con elevada reflectancia en el rojo, como la hematite; valores intermedios se relacionan con la jarosita; y valores más bajos corresponden generalmente a la goethita (Cudahy, 2012). Este método permite identificar tendencias composicionales dominantes, aunque no debe interpretarse como una identificación mineralógica absoluta debido al solapamiento espectral y a la frecuente mezcla de fases minerales en ambientes naturales.

2.3.2. Técnica de ajuste parabólico

La técnica de ajuste parabólico, propuesta por van der Werff y van der Meer (2015), es un método desarrollado para el análisis de minerales de hierro mediante imágenes multiespectrales. Su aplicación se basa en el ajuste de una función polinómica de segundo grado (parábola) a un conjunto mínimo de tres bandas espectrales, lo que la hace adecuada para sensores multiespectrales.

En este estudio, la técnica se adaptó para analizar los máximos de reflectancia en el rango espectral 600–900 nm. A partir de tres bandas VNIR seleccionadas, se ajustó una parábola para interpolar la posición espectral del máximo de reflectancia de esta parábola en cada píxel. La selección de las combinaciones óptimas de bandas se realizó a partir de tres espectros tomados en laboratorio de tres muestras de campo representativas de hematite, goethita y jarosita, obtenidos mediante un espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4 y previamente caracterizados por difracción de rayos X (DRX). La

longitud de onda estimada de dicho máximo permite discriminar entre los tres minerales, ya que cada mineral presenta su pico de reflectancia en posiciones ligeramente distintas dentro de este intervalo espectral.

2.4. Validación

La validación se realizó mediante análisis DRX de 74 muestras de suelo. Los resultados derivados de las técnicas espectrales se compararon con la mineralogía determinada por DRX para evaluar la precisión de cada sensor y técnica, estableciendo la correspondencia entre el mapa resultante y el píxel asociado a la localización de cada muestra de suelo.

3. RESULTADOS

3.1. Cociente de bandas

El mapa obtenido a partir del cociente de bandas (Figura 4A) muestra una distribución espacial coherente de los minerales asociados al DAM. La hematite aparece como la fase más extendida, especialmente en las superficies inundables que drenan hacia el Mar Menor. Estas áreas presentan valores elevados del cociente, consistentes con una mayor reflectancia en la región del rojo.

Por su parte, la goethita y la jarosita se concentran principalmente en cabeceras de ramblas, taludes y sectores próximos a los cauces. Estas zonas suelen estar asociadas a mayor dinámica hidrológica y a condiciones de acidez más marcadas, lo que favorece la formación de fases más hidratadas o sulfatadas. No obstante, la transición entre goethita y jarosita no siempre es nítida, lo que sugiere mezcla mineralógica superficial y cierto solapamiento espectral en el visible, lo que se observa en las muestras de campo y en los resultados de validación (Tabla 1).

3.2. Técnica de ajuste parabólico

La combinación de bandas B5, B6 y B7 permitió estimar los máximos de reflectancia característicos de los tres minerales analizados, situados aproximadamente en ~840 nm para la hematite, ~775 nm para la goethita y ~730 nm para la jarosita (Figura 3).

El mapa resultante (Figura 4A) presenta una cartografía más extensa espacialmente que la obtenida con el cociente de bandas (Figura 4B). La hematite aparece claramente delimitada y con mayor continuidad espacial, mientras que las áreas clasificadas como goethita–jarosita tienen una distribución más fragmentada, especialmente visible en zonas próximas a cauces.

Sin embargo, debido a la proximidad espectral del máximo de reflectancia de goethita y jarosita, sus máximos coinciden dentro del mismo intervalo de bandas, lo que impide su separación consistente. En consecuencia, la técnica permite discriminar de forma fiable la hematite frente al resto de fases, pero no diferenciar con claridad entre estos minerales más hidratados.

3.3. Validación

La validación mediante DRX (Tabla 1) confirmó un buen comportamiento general del sensor. El cociente de bandas alcanzó un 74,3 % de aciertos, con un 16,2 % de errores y un 9,5 % de muestras no clasificadas. Por su parte, el ajuste parabólico obtuvo un 70,3 % de aciertos, reduciendo los errores al 8,1 %, aunque incrementando el porcentaje de no clasificados hasta el 21,6 %.

Las principales confusiones se produjeron entre jarosita y goethita, mientras que la hematite mostró una mayor consistencia en ambas metodologías.

Tabla 1. Resultados de validación (n = 74) para WorldView-3 con el cociente de bandas y el ajuste parabólico. Se indican aciertos, fallos y no clasificados.

	Cociente de bandas	Ajuste parabólico
Aciertos	55 (74,3%)	52 (70,3%)
Fallos	12 (16,2%)	6 (8,1%)
No clasificados	7 (9,5%)	16 (21,6%)

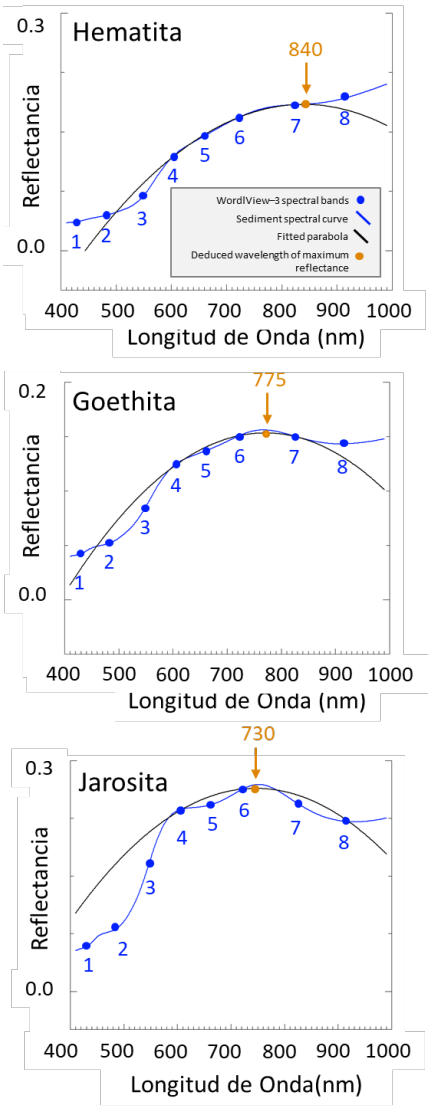


Figura 3. Espectro ASD de la hematite, goethita y jarosita (línea azul), bandas de WorldView-3 (puntos azules), parábola ajustada (línea negra) y longitud de onda estimada del máximo de reflectancia (punto naranja).

El mapa derivado del ajuste parabólico (Figura 4B) muestra la distribución espacial de las fases minerales identificadas. La cartografía se concentra principalmente en el sector aguas abajo del Campo de Cartagena, donde se observa un claro predominio de la hematite como fase más extendida.

La discriminación mineralógica permitió diferenciar la hematite del grupo goethita–jarosita, aunque no fue posible separar con claridad estas dos últimas fases debido a la proximidad espectral de sus máximos de reflectancia.

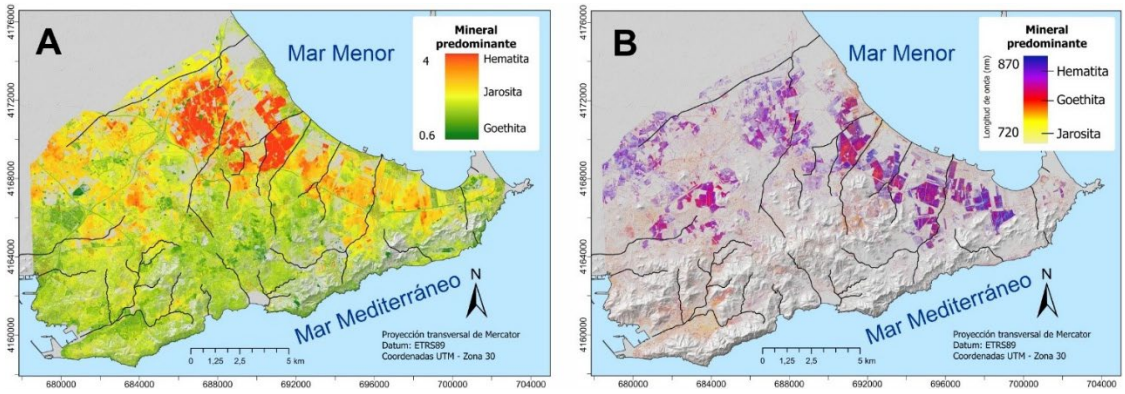


Figura 4. (A) Cociente de bandas de composición (B5/B3) y (B) Longitud de onda del máximo de reflectancia estimada mediante la técnica de ajuste parabólico para WorldView-3

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados confirman que WorldView-3 es capaz de cartografiar con coherencia los patrones espaciales del DAM en la Sierra Minera de Cartagena–La Unión. La elevada resolución espacial (≈1,2 m) permite identificar con gran detalle superficies mineralizadas, depósitos y trazados de ramblas, lo que resulta especialmente útil en un entorno minero complejo y heterogéneo.

Desde el punto de vista mineralógico, la hematite es la fase que se identifica con mayor fiabilidad. Esto es coherente con su mayor estabilidad geoquímica y con la posición relativamente diferenciada de su máximo de reflectancia dentro del intervalo VNIR analizado. En cambio, la separación entre goethita y jarosita presenta mayores dificultades debido a la proximidad de sus rasgos espectrales y a la limitada resolución espectral del sensor en la región del *red-edge.*

El cociente de bandas proporciona una cartografía más completa, mientras que el ajuste parabólico reduce las clasificaciones erróneas, pero aumenta los píxeles no asignados.

En conjunto, WorldView-3 demuestra ser una herramienta válida para estudios de detalle en áreas afectadas por DAM. No obstante, la discriminación precisa entre fases secundarias con rasgos espectrales muy próximos sigue estando condicionada por la resolución espectral disponible en el VNIR. Resultados similares han sido obtenidos en el sureste de España, como el distrito de Rodalquilar, donde WorldView-3 demostró su capacidad para cartografiar minerales de alteración férrica en condiciones de baja cobertura vegetal (Bendini, 2019).

5. AGRADECIMIENTOS

I. Pereira agradece al ITC de la Universidad de Twente la estancia de investigación y los análisis de DRX realizados por su Laboratorio de Geoquímica. Este trabajo fue financiado por el proyecto PID2023-150229OB-100 (HYPERLANDFORM), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER, y la participación de I. Pereira por el contrato FPU21/04495.

6. REFERENCIAS

Cudahy, T. (2012). *Australian ASTER geoscience product notes, version 1*. CSIRO ePublish No. EP-30-07-12-44. CSIRO, Australia.

Bedini, E. (2019). Application of WorldView-3 imagery and ASTER TIR data to map alteration minerals associated with the Rodalquilar gold deposits, southeast Spain. *Advances in Space Research, 63*(10), 3346–3357. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.047

López-Morell, M. Á., & Pérez de Perceval Verde, M. Á. (2019). From old mining to new mining: The introduction of differential flotation in Spanish mines and its environmental impact. *Revista de Historia Industrial—Industrial History Review*, 28, 119–148. https://doi.org/10.1344/rhi.v28i77.28892

Nordstrom, D. K., Blowes, D. W., & Ptacek, C. J. (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, 57, 3–16. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008

Rossman, G. R., & Ehlmann, B. L. (2019). Electronic spectra of minerals in the visible and near-infrared regions. En *Remote compositional analysis: Techniques for understanding spectroscopy, mineralogy, and geochemistry of planetary surfaces* (pp. 3–20). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781316888872.002

van der Werff, H., & van der Meer, F. (2015). Sentinel-2 for mapping iron absorption feature parameters. *Remote Sensing*, 7, 12635–12653. https://doi.org/10.3390/rs71012635

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.241

Uso del algoritmo Random Forest para el mapeo del uso y ocupación del suelo relacionados con bienes minerales en la APA das Cabeceiras do Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

Durval, Segundo [1] **Manzon, Gustavo** [1]

[1] Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

ORCID: Durval 0009-0008-9662-397X Manzon 0000-0002-5124-5898

Correspondencia: floresteiroaventureiro@gmail.com gustavo.nunes@ufmt.br

RESUMEN

Brasil posee una de las mayores redes de áreas protegidas del mundo, abarcando aproximadamente el 18 % de su territorio. Las unidades de conservación se dividen en diferentes categorías (UC de protección integral y UC de uso sostenible), las cuales deben analizarse por separado para verificar su compatibilidad con la actividad minera. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño del algoritmo Random Forest aplicado a datos Sentinel-2, generando una matriz de confusión y utilizando el coeficiente Kappa, con el propósito de medir la concordancia entre clasificaciones categóricas en el mapeo del uso y ocupación del suelo en el Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá. Se obtuvo una precisión global del 91,11 % (164/180) y un coeficiente Kappa de 0,87. Como resultado final, se generó un producto innovador orientado a la toma de decisiones más sostenibles en el uso de los recursos naturales y minerales, de relevancia tanto regional como global.

Palabras clave: *: Protección ambiental, algoritmo, Random Forest, Índice Kappa, bienes minerales.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 18 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Uso del algoritmo Random Forest para el mapeo del uso y ocupación del suelo relacionados con bienes minerales en la APA das Cabeceiras do Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

Durval, Segundo [1], Manzon, Gustavo [1]

[1] Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil, 0009-0008-9662-397X, floresteiroaventureiro@gmail.com.

[2] Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil, 0000-0002-5124-5898, gustavo.nunes@ufmt.br.

Resumen: Brasil posee una de las mayores redes de áreas protegidas del mundo, abarcando aproximadamente el 18 % de su territorio. Las unidades de conservación se dividen en diferentes categorías (UC de protección integral y UC de uso sostenible), las cuales deben analizarse por separado para verificar su compatibilidad con la actividad minera. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño del algoritmo Random Forest aplicado a datos Sentinel-2, generando una matriz de confusión y utilizando el coeficiente Kappa, con el propósito de medir la concordancia entre clasificaciones categóricas en el mapeo del uso y ocupación del suelo en el Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá. Se obtuvo una precisión global del 91,11 % (164/180) y un coeficiente Kappa de 0,87. Como resultado final, se generó un producto innovador orientado a la toma de decisiones más sostenibles en el uso de los recursos naturales y minerales, de relevancia tanto regional como global.

Palabras clave: Protección ambiental, algoritmo, Random Forest, coeficiente Kappa, bienes minerales.

Use of the Random Forest Algorithm for Land Use and Land Cover Mapping Associated with Mineral Resources in the Environmental Protection Area (APA) of the Cuiabá River Headwaters, Mato Grosso, Brazil.

***Abstract**: Brazil possesses one of the largest networks of protected areas in the world, covering approximately 18% of its territory. Conservation units are divided into different categories (strict protection units and sustainable use units), which must be analyzed separately to assess their compatibility with mining activities. This study aimed to evaluate the performance of the Random Forest algorithm applied to Sentinel-2 data, generating a confusion matrix and using the Kappa coefficient to measure agreement among categorical classifications in land use and land cover mapping within the Cuiabá River Headwaters Environmental Protection Area (EPA). An overall accuracy of 91.11% (164/180) and a Kappa coefficient of 0.87 were obtained. As a final product, was criated a innovative product aimed at supporting more sustainable decision-making in the use of natural and mineral resources, which are of both regional and global importance.*

***Keywords**: Environmental protection, algorithm, Random Forest, Kappa index, mineral resources.*

1. INTRODUCCIÓN

El Cerrado es el segundo bioma más grande de Brasil; es considerado un hotspot para la conservación de la biodiversidad y constituye un importante proveedor de servicios ecosistémicos que generan beneficios para las poblaciones humanas que dependen directa e indirectamente de este bioma como fuente de alimentos, agua, materiales y polinizadores (Alencar *et al*., 2020).

Debido a la fuerte presión antrópica sobre el bioma, el mapeo y el monitoreo de los cambios en el uso del suelo son fundamentales para el diseño de estrategias y políticas de protección del bioma y su biodiversidad, así como para el ordenamiento territorial y el desarrollo económico (Luca *et al*., 2025).

Brasil posee una de las mayores redes de áreas protegidas del mundo, abarcando aproximadamente el 18 % de su territorio nacional (Barros-Rosa *et al*., 2025). Sin embargo, solo una pequeña fracción de estas áreas está estrictamente protegida, clasificada en las categorías I a III de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), correspondiendo a cerca del 6 % de todas las unidades de conservación (Rodrigues et al., 2024). Las unidades de conservación se dividen en diferentes categorías (UC de protección integral y UC de uso sostenible), las cuales deben analizarse por separado para verificar su compatibilidad con la actividad minera. En este contexto, las Áreas de Protección Ambiental (APA), clasificadas como unidades de uso sostenible, representan la mayoría y están frecuentemente más expuestas a presiones antrópicas,

tales como la deforestación, la expansión agrícola, la minería y los incendios.

El uso de algoritmos de clasificación de imágenes para el mapeo del uso y cobertura del suelo ha sido una herramienta ampliamente utilizada por el gobierno brasileño y ha contribuido a que las instituciones responsables de la fiscalización y el licenciamiento de proyectos identifiquen áreas de relevancia ambiental, como las unidades de conservación (UC) y las Áreas de Protección Ambiental (APA) (Cho, 2021).

El Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá, creada por la Ley Estatal n.º 7.161/1999, es una Unidad de Conservación de Uso Sostenible del grupo de protección ambiental, que abarca aproximadamente y tiene como objetivo proteger los nacimientos de ríos, fauna y flora de la región, compatibilizando el uso sostenible de los recursos naturales con la conservación de la biodiversidad (MMA, 2024).

La actividad minera constituye un importante vector económico en Brasil; sin embargo, presenta un alto grado de impacto ambiental que debe ser mitigado por quienes la ejercen, en conformidad con el sistema jurídico de protección ambiental brasileño, buscando la preservación y conservación ambiental mediante un uso antrópico sostenible (Silva, 2021). Brasil extrae cerca de 80 recursos minerales que sirven como insumos para diversas cadenas productivas. Aunque la percepción general es que los productos minerales están presentes en la vida cotidiana en bienes más evidentes, como vehículos automotores, construcción civil, mobiliario, teléfonos móviles y computadoras, existen muchas otras cadenas productivas que requieren sustancias minerales, destacándose la agricultura (fertilizantes, correctivos y remineralizadores de suelos), la industria alimentaria (insumos para el procesamiento de alimentos), la industria electroelectrónica (generación y transmisión de datos) y la producción y transmisión de energía, entre otras. Desde el agua mineral hasta los minerales radiactivos, existe una amplia diversidad de recursos minerales de los cuales la sociedad no puede prescindir (MME, 2020).

En este contexto, el presente estudio propone una clasificación utilizando el algoritmo Random Forest para identificar no solo tipos y estructuras de vegetación en relación con los recursos minerales, sino también otras formas de recursos naturales, como los nacimientos de ríos y los recursos hídricos, así como formas de uso antrópico, como las áreas agrícolas.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño del algoritmo Random Forest aplicado a datos Sentinel-2, generando una matriz de confusión y utilizando el coeficiente Kappa (Landis y Koch, 1977), con el fin de analizar la concordancia entre clasificaciones categóricas en el mapeo del uso y ocupación del suelo en el APA Cabeceiras del río Cuiabá, como: suelo expuesto, agua, suelo agrícola en barbecho, agricultura, vegetación sabánica abierta y vegetación sabánica con cobertura forestal densa con la presencia de recursos minerales y recursos hídricos disponibles en el área de estudio.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Materiales

El área de estudio se localiza en el Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá, en la región centro-sur del estado de Mato Grosso, Brasil, dentro del bioma Cerrado. Esta área protegida abarca aproximadamente 462.320 hectáreas, distribuidas en seis municipios.

Las imágenes satelitales utilizadas se organizaron de la siguiente manera: (i) los datos empleados para la clasificación del uso y ocupación del suelo provinieron de imágenes Sentinel-2, obtenidas a través del programa de observación y monitorización de la Tierra, Copernicus, correspondientes al mes de mayo de 2025; (ii) los datos utilizados para el análisis comparativo del coeficiente Kappa, recolectados como regiones de interés (ROI) para validación, fueron obtenidos a partir de imágenes de los satélites Landsat y Sentinel disponibles en Google Earth; (iii) los datos sobre recursos minerales fueron obtenidos a través de la Agencia Nacional de Minería (ANM) (geo.anm.gov.br), que utiliza imágenes Sentinel-2 y Landsat 8 y 9.

2.1.1. Métodos

Este estudio se basó en la composición de cuatro imágenes adquiridas por el satélite Sentinel-2 (S2_L2A_CDAS), correspondientes a datos multiespectrales obtenidos por el sensor MultiSpectral Instrument (MSI), el cual dispone de 13 bandas espectrales en las regiones del visible (VIS), infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR). La recolección y el procesamiento de las clases se realizaron utilizando el software de procesamiento digital de imágenes ENVI.

Para la clasificación del uso y ocupación del suelo, se seleccionaron regiones de interés (ROI) dentro de la Unidad de Conservación de Uso Sostenible correspondiente al Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá, empleando el software ENVI. Se definieron seis clases de uso del suelo presentes en el área de estudio: suelo expuesto, agua, suelo agrícola en barbecho, agricultura, vegetación sabánica abierta y vegetación sabánica con cobertura forestal densa, como se muestra en la Figura 1.

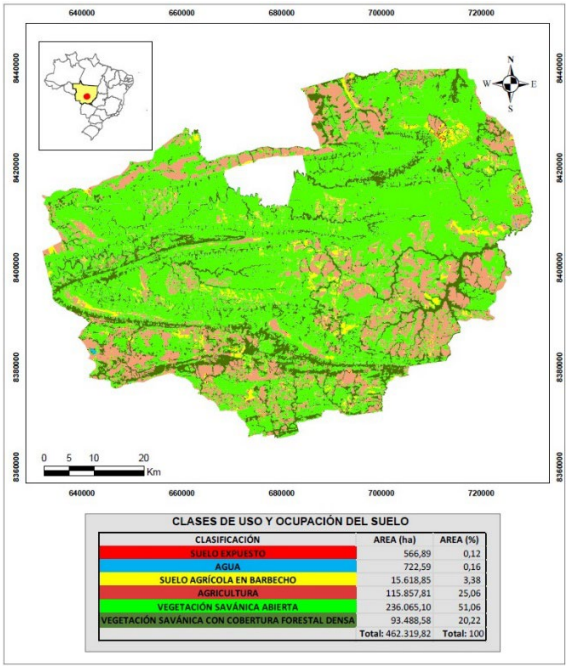


Figura 1. Clasificación del uso y ocupación del suelo del APA das Cabeceiras do Rio Cuiabá mediante el algoritmo Random Forest.

Para la validación de la selección de las ROI (Regiones de Interés), mediante el coeficiente Kappa, se muestrearon 30 puntos para cada clase de uso y ocupación del suelo, totalizando 180 puntos muestrales. En cuanto a los datos de recursos minerales, se verificaron pela la base de datos proporcionada por la Agencia Nacional de Minería (ANM), tales como basalto, diamante, fosfato, mineral de manganeso, mineral de oro, mineral de zinc, mármol y tierras raras (Figura 2).

Para la generación de la matriz de confusión y el cálculo del coeficiente Kappa, también se utilizó un software de procesamiento digital de imágenes (PDI), específicamente el ENVI..

3. RESULTADOS

La relevancia de comparar las clases de uso y ocupación del suelo con los recursos minerales identificados en el Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá, Mato Grosso, Brasil, radica en demostrar la importancia de estos recursos para el comercio mundial. Entre ellos se destacan: la seguridad alimentaria global (fosfato); la siderurgia global (minerales de manganeso); la influencia en los mercados financieros internacionales y en la industria electrónica (oro); las industrias automotriz, de la construcción y farmacéutica (zinc); y los componentes estratégicos de alta relevancia geopolítica, fundamentales para la transición energética y digital como motores eléctricos y sistemas electrónicos avanzados (tierras raras), como se muestra en la Figura 2.

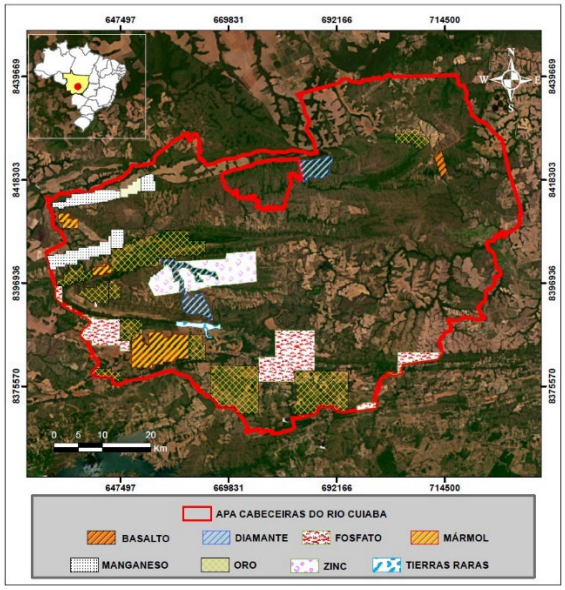


Figura 2. Bienes minerales existentes en la APA Cabeceiras do Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

Otro recurso natural identificado en el área de estudio, y que posee gran relevancia, son los recursos hídricos. Estudios recientes desarrollados por el Ministerio Público del Estado de Mato Grosso (Brasil) identificaron cerca de 2.157 posibles nacimientos de ríos que, además de la necesidad de preservación de los manantiales, también presentan preocupaciones relacionadas con la protección de especies de fauna silvestre (principalmente especies amenazadas de extinción), así como con la conservación de remanentes de ecosistemas de Cerrado y Amazonía, paisajes y elementos escénicos.

El uso del algoritmo Random Forest, asociado a la matriz de confusión y evaluado mediante el coeficiente Kappa (Landis y Koch, 1977), resultó satisfactorio para validar la metodología empleada, obteniéndose los siguientes valores: una precisión global del 91,11 % (164/180) y un coeficiente Kappa de 0,87, de acuerdo con la tabla 1.

Tabla 1. Coeficiente Kappa de las clasificaciones de uso y ocupación del suelo.

Coeficiente Kappa de las clasificaciones	Escala del Coeficiente Kappa (adaptado de Landis e Koch, 1977)	
Random Forest	Coeficiente Kappa	Calidad del Mapa Temático
Precisión general = 91,11% (164/180) Coeficiente Kappa = 0,87	0,80-1,00	Excelente

Como producto final, se generó una integración entre la clasificación obtenida mediante el algoritmo Random Forest, validada por el coeficiente Kappa, los recursos minerales y los recursos hídricos, constituyendo un producto inédito (Figura 3) que, en un futuro próximo, contribuirá tanto a la ciencia como al sector productivo en la toma de decisiones más sostenibles respecto al uso

de los recursos naturales y minerales, los cuales son de importancia tanto a nivel regional como global, como se muestra en la Figura.

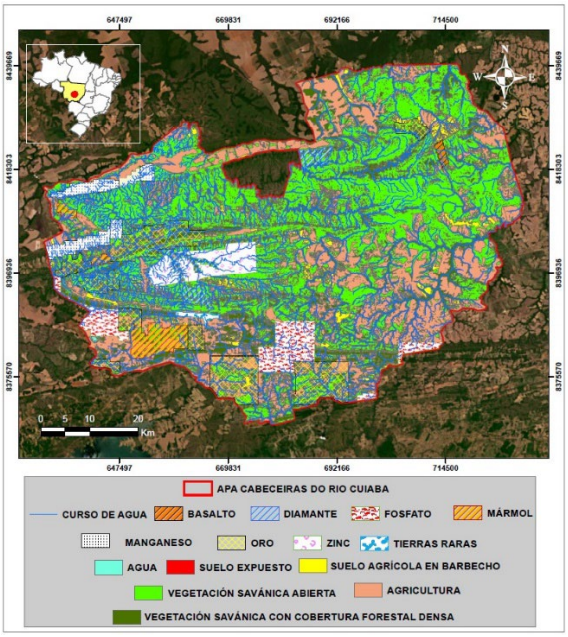


Figura 3. Clasificación Random Forest, bienes minerales y recursos hídricos existentes en la APA Cabeceiras do Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

4. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT); al Programa de Posgrado en Ciencias Forestales y Ambientales (PPGCFA) de la Facultad de Ingeniería Forestal (FENF), de la Universidad Federal de Mato Grosso (UFMT); y al Laboratorio de Sensoriamiento Remoto y Geotecnologías (LabSensoR) de la Facultad de Ingeniería Forestal (FENF-UFMT).

5. REFERENCIAS

Alencar, A., Shimbo, J.Z., Lenti, F., Marques, C.B., Zimbres, B.,Rosa, M., Arruda, V., Castro, I., Ribeiro, J.P.F.M., Varela, V., Alencar, I., Piontekowski, V., Ribeiro, V., Bustamante, M.M.C., Sano, E.E. & Barroso, M. (2020). 'Mapping three decades of changes in the Brazilian savanna native vegetation using Landsat data processed in the Google Earth Engine platform', *Remote Sensing, vol. 12*, no. (6), 924. https://doi.org/10.3390/rs12060924.

Barros-Rosa, L., Moura Peluso, L., Lemes, P., Johnson, Mark, S., Dalmagro Higo, J., Nunes da Cunha, C., Henrique Zanella de Arruda, P., Mateus Penha Lucia, J. (2025). The ineffectiveness of current environmental and fire policies in the world's largest wetland. Environmental Research *Letters, v. 20*, n. (3), p. 034039. DOI: 10.1088/1748-9326/adb7f5.

Cho, D. F.; Schwaida, S. F.; Cicerelli, R. E.; Almeida, T.; Ramos, A. P. M.; Sano, E. E. (2021). Desempenho do Algoritmo de Classificação de Imagens Random Forest para Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo no Cerrado Brasileiro. *Anuário do Instituto de Geociências, v. 44*, doi: 10.11137/1982-3908_2021_44_37979.

Gian Luca, S., Moris Jose, V., Segura-Garcia, C., Ana Carolina, P., Jones Matthew, W., Machado Manoela, S., Motta Renzo Auxiliadora Costa, Alencar., Ane; Ascoli, D.,; Oliveras Menor, I. (2025). Devegetation is a widespread driver of fire in the Brazilian Cerrado. *Journal of Environmental Management, v. 385*, p. 125637. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.125637.

Landis Richard, J., KOCH, Gary G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics, v. 33*, n. (1), p. 159–174.

Marcos Silva, B. (2021). Mineração e meio ambiente: desafios legais e sustentabilidade. 2. ed. São Paulo: Editora Ambiental.

Ministério de Minas e Energia. (2020). Mineração no Brasil. Brasília, DF: MME-Brasil. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br. Acesso em: 10 fev. 2026.

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). (2024). Área de Protección Ambiental Cabeceiras do Rio Cuiabá. Brasília, DF: MMA-Brasil. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br. Acesso em: 12 fev. 2026.

Rodrigues, D.M.; Coradi, P.C.; Timm, N.d.S.; Fornari, M.; Grellmann, P.; Amado, T.J.C.; Teodoro, P.E.; Teodoro, L.P.R.; Baio, F.H.R.; Chiomento, J.L.T. (2024) Correction: Applying Remote Sensing, Sensors, and Computational Techniques to Sustainable Agriculture: From Grain Production to Post-Harvest. *Agriculture, 14*, (161). Agriculture 2025,15,1490.https://doi.org/10.3390/agriculture15141490.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.251

Respuesta espectral de formas del relieve con imágenes AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) en el sector Sureste de la Comunidad de Madrid (España)

García-Meléndez, Eduardo [1] **Ferrer-Julià, Montserrat** [1] **Cruz, Juncal A.** [1] **García-Rivas, Javier** [2] **Valenzuela, Pablo** [1] **Rodríguez, Indira** [1] **Colmenero-Hidalgo, Elena** [1] **Pereira, Inés** [1]

[1] Universidad de León, España

[2] Universidad Complutense de Madrid, España

ORCID: García-Meléndez 0000-0001-8217-8205 Ferrer-Julià 0000-0001-8021-1040 Cruz 0000-0003-2768-9242 García-Rivas 0000-0002-7695-0016 Valenzuela 0000-0002-2424-5884 Rodríguez 0000-0002-2518-952X Colmenero-Hidalgo 0000-0002-5449-2739 Pereira 0000-0002-7328-4791

Correspondencia: egarm@unileon.es mferj@unileon.es jcrum@unileon.es javiga31@ucm.es pvalm@unileon.es iroda@unileon.es elena.colmenero@unileon.es iperr@unileon.es

RESUMEN

Los datos de alta resolución espectral y espacial registrados por el espectrómetro de imágenes AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) proporcionan una información muy útil para la exploración de recursos minerales y rocas industriales mediante la cartografía de la composición mineral de formas del relieve. El área de estudio se localiza en la cuenca sedimentaria del Tajo en unidades formadas por rocas arcillosas, evaporíticas, carbonatadas terciarias y sedimentos detríticos asociados a las unidades morfosedimentarias cuaternarias principalmente de origen fluvial. El estudio se basa en la respuesta espectral de minerales clave como carbonatos, sulfatos y arcillas, con el fin de cartografiar su presencia en las superficies planas y alomadas en la zona situada entre los ríos Tajo, Tajuña y Jarama. Simultáneamente a la campaña de vuelo, se llevó a cabo un estudio de espectrorradiometría de campo para caracterizar la variabilidad mineral de las distintas formas del relieve en el intervalo de longitud de onda visible-infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (VNIR-SWIR, 350-2500 nm) utilizando un espectrorradiómetro ASD FieldSpec-4. Se utilizaron muestras de campo para espectroscopía de reflectancia de laboratorio y difracción de rayos X con el fin de vincular la respuesta espectral con la caracterización mineralógica de las muestras y validar el resultado de la cartografía obtenida. También se emplearon varias técnicas cartográficas: cocientes de bandas para realzar los rasgos de absorción diagnósticos de los minerales de interés y el algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper). Los resultados muestran un patrón de mezcla complicado entre minerales de arcilla, carbonatos y sulfatos debido al solapamiento de algunos rasgos de absorción en determinadas longitudes de onda, pero bien determinado espacialmente, siendo las zonas con presencia de yeso las mejor diferenciadas, proporcionando una localización detallada de las abundancias minerales de la superficie.

Palabras clave: *Teledetección aerotransportada, hiperespectral, Geomorfología, mineral*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 20 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Respuesta espectral de formas del relieve con imágenes AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) en el sector Sureste de la Comunidad de Madrid (España)

García-Meléndez, Eduardo [(1)], Ferrer-Julià, Montserrat [(1)], Cruz, Juncal A. [(1)], García-Rivas, Javier [(2)], Valenzuela, Pablo [(1)], Rodríguez, Indira [(1)], Colmenero-Hidalgo, Elena [(1)], Pereira, Inés [(1)]

[(1)] Universidad de León, España.

0000-0001-8217-8205, egarm@unileon.es ; 0000-0001-8021-1040, mferj@unileon.es

0000-0003-2768-9242, jcrum@unileon.es ; 0000-0002-2424-5884, pvalm@unileon.es

0000-0002-2518-952X, iroda@unileon.es ; 0000-0002-5449-2739, elena.colmenero@unileon.es

0000-0002-7328-4791, iperr@unileon.es

[(2)] Universidad Complutense de Madrid, España.

0000-0002-7695-0016, javiga31@ucm.es

Resumen: Los datos de alta resolución espectral y espacial registrados por el espectrómetro de imágenes AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*) proporcionan una información muy útil para la exploración de recursos minerales y rocas industriales mediante la cartografía de la composición mineral de formas del relieve. El área de estudio se localiza en la cuenca sedimentaria del Tajo en unidades formadas por rocas arcillosas, evaporíticas, carbonatadas terciarias y sedimentos detríticos asociados a las unidades morfosedimentarias cuaternarias principalmente de origen fluvial. El estudio se basa en la respuesta espectral de minerales clave como carbonatos, sulfatos y arcillas, con el fin de cartografiar su presencia en las superficies planas y alomadas en la zona situada entre los ríos Tajo, Tajuña y Jarama. Simultáneamente a la campaña de vuelo, se llevó a cabo un estudio de espectrorradiometría de campo para caracterizar la variabilidad mineral de las distintas formas del relieve en el intervalo de longitud de onda visible-infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (VNIR-SWIR, 350-2500 nm) utilizando un espectrorradiómetro *ASD FieldSpec-4*. Se utilizaron muestras de campo para espectroscopía de reflectancia de laboratorio y difracción de rayos X con el fin de vincular la respuesta espectral con la caracterización mineralógica de las muestras y validar el resultado de la cartografía obtenida. También se emplearon varias técnicas cartográficas: cocientes de bandas para realzar los rasgos de absorción diagnósticos de los minerales de interés y el algoritmo SAM (*Spectral Angle Mapper*). Los resultados muestran un patrón de mezcla complicado entre minerales de arcilla, carbonatos y sulfatos debido al solapamiento de algunos rasgos de absorción en determinadas longitudes de onda, pero bien determinado espacialmente, siendo las zonas con presencia de yeso las mejor diferenciadas, proporcionando una localización detallada de las abundancias minerales de la superficie.

Palabras clave: Teledetección aerotransportada, hiperespectral, Geomorfología, minerales

Spectral response of landforms using AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) in the Southeastern sector of the Comunidad de Madrid (Spain)

***Abstract**: The high spectral and spatial resolution data recorded by the AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) imaging spectrometer provides very useful information for the exploration of mineral resources and industrial rocks by mapping the mineral composition of landforms. The study area is located in the Tagus sedimentary basin in units formed by clayey, evaporitic and Tertiary carbonate rocks and detrital sediments associated with Quaternary morphosedimentary units mainly of fluvial origin. The study is based on the spectral response of key minerals such as carbonates, sulphates and clays, with the aim of mapping their presence on flat and undulating surfaces in the area between the Tagus, Tajuña and Jarama rivers. Simultaneously with the flight campaign, a field spectroradiometry study was carried out to characterize the mineral variability of the different landforms in the visible-near infrared and shortwave infrared wavelength range (VNIR-SWIR, 350-2500 nm) using an ASD FieldSpec-4 spectroradiometer. Field samples were used for laboratory reflectance spectroscopy and X-ray diffraction in order to link the spectral*

response with the mineralogical characterization of the samples and validate the results of the cartography obtained. Several mapping techniques were used: band ratios to enhance the diagnostic absorption features of the minerals of interest and the SAM (Spectral Angle Mapper) algorithm. The results show a complicated mixing pattern between clay minerals, carbonates, and sulphates due to the overlap of some absorption features at certain wavelengths, nevertheless well distinguished. The areas with gypsum are the best differentiated, providing a detailed location of the mineral abundances on the surface.

***Keywords**: Airborne Remote Sensing, hyperspectral, Geomorphology, minerals*

1. INTRODUCCIÓN

La espectrometría de imágenes, según la definición inicial, es la adquisición de imágenes en cientos de bandas espectrales contiguas y registradas, de forma que para cada píxel pueda obtenerse un espectro de radiancia (Goetz et al., 1985). De esta forma, este autor afirma que los espectrómetros de formación de imágenes adquieren imágenes en un gran número (normalmente más de 40) de bandas espectrales estrechas (10-20 nm de ancho) contiguas (por ejemplo, adyacentes y no solapadas) para poder extraer espectros de reflectancia de cada píxel que puedan compararse directamente con espectros similares medidos sobre el terreno o en el laboratorio. Por otra parte, la exploración minera causa multitud de impactos en el medio ambiente, relacionados con la construcción de carreteras y caminos de acceso a las zonas de interés para la prospección y realización de sondeos, etc., en donde el movimiento de maquinaria pesada es común. Así, la Teledetección se ha venido utilizando con éxito en la exploración mineral, principalmente de áreas remotas, pero su uso debería de extenderse en el proceso de exploración mineral de cualquier zona para reducir el impacto medioambiental asociado, seleccionando zonas clave en la fase de exploración para posteriores prospecciones en el contexto de la creciente demanda de materias primas. Además, en los últimos años la Teledetección hiperespectral ha supuesto un avance cuantitativo de gran importancia en la precisión de la determinación composicional de las distintas superficies, especialmente con el desarrollo de sensores aerotransportados desde el AVIRIS de la NASA en 1988 y posteriormente con los sensores DAIS, CASI, HyMAP, AHS, etc. Estos avances se ven proyectados hacia el futuro con la disponibilidad de sensores hiperespectrales satelitales y operativos como DESIS (Alonso et al., 2019), PRISMA (Cogliati et al., 2021), EnMAP (Chabrillat et al., 2020), HUSUI (Matsunaga et al., 2020), EMIT (Thompson et al., 2023) que, aunque con menor resolución espacial, están suponiendo un gran progreso en la cartografía global de fenómenos naturales y de los procesos y recursos geológicos para determinar la composición mineral y las formas del relieve asociadas.

La zona de estudio se encuentra localizada en la cuenca sedimentaria del Tajo (Comunidad de Madrid), entre los ríos Tajo, Tajuña y Jarama (Figura 1). El relleno sedimentario está principalmente formado por depósitos miocenos y cuaternarios. Las facies miocenas se agrupan en tres grandes unidades estratigráficas (García-Romero, 2004): la Unidad Inferior en la que se explotan sales sódicas como la glauberita; la Unidad Intermedia en donde aparecen las facies más arcillosas de la cuenca denominadas "arcillas verdes" que están principalmente formadas por esmectitas magnésicas (saponitas) de elevada pureza, con frecuentes intercalaciones de "arcillas rosas" de composición estevensítica. El interés económico de esta unidad está en la explotación de bentonitas en las "arcillas verdes" y de sepiolita-paligorskita en las facies arcósicas; por último, la Unidad Superior en la que se encuentran explotaciones de recursos como las canteras de roca ornamental de la "Caliza de Colmenar".

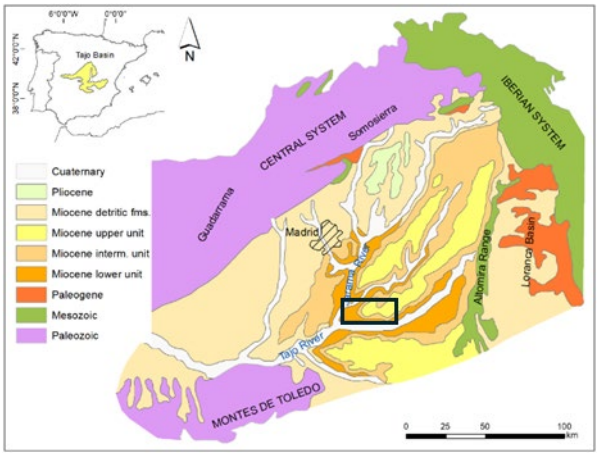


Figura 1. Esquema de localización de la Cuenca del Tajo (subcuenca de Madrid). Modificada de García-Romero (2004). El rectángulo en negro indica la localización de la zona de estudio.

Los objetivos planteados en este trabajo son aplicar técnicas de tratamiento digital de imágenes y procedimientos para el realce de rasgos de absorción diagnósticos, con el fin de detectar composiciones minerales significativas y determinar y cartografiar sus propiedades espectrales mediante imágenes captadas por el sensor aerotransportado AHS *(Airborne Hyperspectral Scanner*), para finalmente asociar la composición mineral con parámetros del relieve como las pendientes.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Adquisición de imágenes

Se realizó una campaña de vuelo a las 10:20 UTC del 1 de octubre de 2018 a 9000 FT (2743 m) con la aeronave CASA212-200-RS para la adquisición de imágenes sobre la zona de estudio por parte del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), utilizando el sensor AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*). El sensor AHS tiene 80 canales con una resolución radiométrica de 12 bits, que cubren 63 en la parte reflectante del espectro

(VNIR - SWIR), 7 en la región 3177-5251 nm (infrarrojo medio, MIR) y 10 en el rango 8310-12952 nm (infrarrojo térmico, TIR). La adquisición de los datos aerotransportados se realizó cubriendo un total de 8 líneas de barrido. Simultáneamente al vuelo, el equipo del INTA adquirió espectros de reflectancia de campo con el espectrorradiómetro *FieldSpec4 spectroradiometer* (*Analytical Spectral Devices, Inc.* Boulder, CO, USA) en varias zonas homogéneas (10 puntos) para posterior calibración de las imágenes. Este trabajo se centra en la parte del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo de onda corta (SWIR) con 31 bandas comprendidas entre los 1970 y 2468 nm de longitudes de onda, debido a las características espectrales de los rasgos de absorción identificables de los minerales de interés en este estudio.

2.2. Espectroscopía de reflectancia de campo y laboratorio y análisis mineralógico

La medida de los espectros de reflectancia en la superficie de sedimentos, suelos y rocas en unidades geomorfológicas previamente seleccionadas (correspondientes a la Mesa de Chinchón, la rampa erosiva de Villaconejos, la zona de escarpe entre ambas, los valles de los ríos Tajo y Tajuña, y escarpe entre estos valles y la rampa de Villaconejos) se realizó también con el espectrorradiómetro *FieldSpec4*. Se adquirieron en el rango de longitudes de onda de 350 a 2500 nm, con 25º de ángulo de campo de visión desde el nadir, a aproximadamente 120 cm de altura desde la superficie, entre las 11 y las 15 horas, en las que el sol presenta la máxima elevación. Las medidas de reflectancia de laboratorio se realizaron en el mismo rango de longitudes de onda, mediante una sonda de contacto con su propia fuente de iluminación. El análisis mineralógico de los materiales de las unidades geomorfológicas se determinó mediante difracción de rayos X (DRX), para la validar los resultados de las imágenes.

2.3. Tratamiento de imágenes y SIG

Se calculó el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) para enmascarar la vegetación vigorosa junto con la vegetación seca (umbral de separación por debajo de 0,3). Se realizaron cocientes de bandas espectrales para explorar la presencia de carbonatos, arcillas (alumínicas y magnésicas) y sulfatos. A partir de los cocientes de bandas utilizados (carbonatos-2397/2338 nm, arcillas-2084/23237 nm, sulfatos/yeso-2019/1970 nm) se extrajeron 10 *endmembers* (EMs) correspondientes a las curvas espectrales de píxeles de minerales "puros" y sus mezclas y que se mencionan en el siguiente aparatado como resultado, con los cuales se realizó la clasificación de la imagen. Los EMs se seleccionaron tras un análisis minucioso analizando la respuesta espectral de los píxeles de una composición en color formada con los cocientes anteriores. Así, se exploraron las distintas respuestas espectrales reflejadas en los colores correspondientes a los minerales "puros" de los cocientes y a sus mezclas. Las curvas espectrales anteriores se compararon visualmente de forma exahustiva con los espectros de los minerales de interés de la espectroteca del USGS (Kokaly et al. 2017) remuestreados (ajustados) a las longitudes de onda del sensor AHS, para facilitar la comparación de las curvas. Además, en el anterior proceso de selección de los EMs, se ha tenido en cuenta el conocimiento de la composición mineral de las formaciones sedimentarias presentes, tanto a través del trabajo de campo como de la bibliografía. Para derivar la composición mineral de las superficies que constituyen el relieve (formadas por rocas y suelos), se clasificó la imagen con el algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) que utiliza métodos de Similitud Espectral (*Spectral Similarity Methods*) para separar materiales en grupos espectrales similares, correspondientes a los EMs seleccionados, con un umbral angular de 0.1 rad. Todas las operaciones de tratamiento de imágenes se han realizado con el programa ENVI 5.3. Finalmente, se ha llevado a cabo análisis geoespacial (con el programa ArcGIS-pro) mediante superposición con el Modelo Digital de Elevación (MDE) de resolución espacial de 25 m del Instituto Geográfico Nacional (IGN) para establecer la relación de la mineralogía con las formas del relieve.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de los cocientes de bandas muestran buenas diferenciaciones en la distinción de las áreas cubiertas de sulfatos y carbonatos, estando la distribución de las arcillas menos clara como consecuencia de aparecer como mezclas con otros minerales (arcillas magnésicas con carbonatos y arcillas alumínicas con filosilicatos), debido a su variedad composicional.

En la Figura 2A se muestra el resultado de la clasificación SAM con las clases correspondientes a los 10 *endmembers* seleccionados que representan cuatro minerales principales y distintas mezclas de los mismos, representados en la Figura 2B.

A partir del análisis de los resultados y tras la superposición de la cartografía obtenida con el MDE, se han encontrado las siguientes relaciones entre unidades geomorfológicas y composición mineral:

1- La superficie superior de la mesa de Chinchón (750-770 m), donde la respuesta espectral está dominada por arcillas portadoras de Al (montmorillonita, illita) y mezclas de éstas con carbonatos.

2- La rampa erosiva de Villaconejos (600-640 m) con arcillas portadoras de Mg, mezclas de arcillas portadoras de Al y Mg y carbonatos y presencia de yeso.

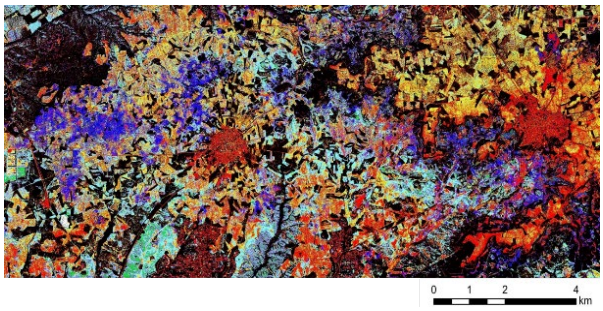
3- El escarpe que articula la superficie superior de la Mesa de Chinchón con la rampa erosiva de Villaconejos, con presencia de carbonatos y arcillas portadoras de Mg, correspondientes a la Unidad Intermedia.

4- El dominio de la rampa/glacis que articula el anterior dominio con las unidades fluviales de los ríos Tajuña y Tajo, donde afloran los yesos de la Unidad Inferior Miocena.

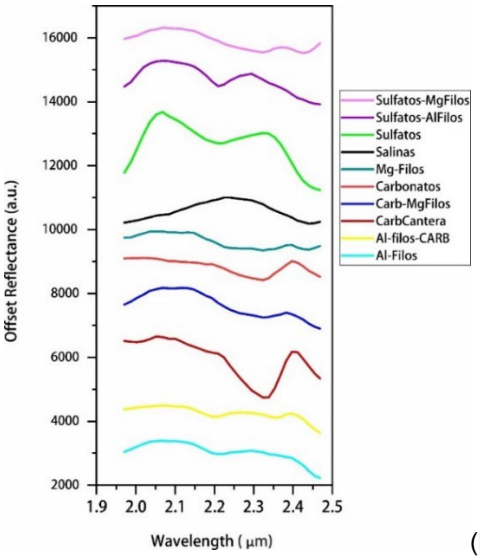
5- Los valles fluviales de los ríos Tajo y Tajuña donde predominan los Al-filosilicatos.

El análisis mineralógico mediante DRX permite validar los efectos en las curvas espectrales de los píxeles de la imagen correspondientes a las distintas mezclas de minerales, hallando un muy buen ajuste visual entre las curvas espectrales medidas en campo en cada zona de

muestreo, con los espectros de cada muestra y con los espectros de los píxeles correspondientes. Además, se realizó la matriz de confusión a partir de píxeles identificados en campo para cada EM, obteniendo una precisión total del 81,6%.



(A)



(B)

Figura 2A. Resultado de la clasificación SAM. **Figura 2B**. Curvas espectrales de los 10 *endmembers.* Ambas figuras comparten la misma leyenda.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1. Las áreas con minerales sulfatados, especialmente yeso, fueron las mejor diferenciadas, proporcionando una ubicación detallada de las abundancias de este grupo de minerales en la superficie. Se ha puesto de manifiesto la dificultad de discriminar las arcillas alumínicas y magnésicas en píxeles mezcla con yesos y carbonatos respectivamente, debido a la similitud de sus rasgos de absorción en el entorno de los 2200 y de 2300 nm.

2. Las dos técnicas de cartografía utilizadas, cocientes de bandas de imágenes para realzar los rasgos de absorción mineral de diagnóstico y el algoritmo SAM-*Spectral Angle Mapper*) muestran una buena diferenciación y separación de los minerales arcillosos, evaporíticos y carbonatados por su distribución espacial cartográfica.

3. Se ha podido proporcionar una distribución composicional asociada a cuatro dominios geomorfológicos, comprobándose una estrecha relación pendiente/mineralogía (como queda demostrado implícitamente en los resultados, por el propio conocimiento geomorfológico de la terminología asociada a las unidades geomorfológicas definidas).

4. La espectrometría de imágenes proporciona un nuevo enfoque para mejorar la información composicional proporcionada por los mapas geomorfológicos y geológicos

5. La cartografía obtenida puede ayudar a reducir los impactos ambientales asociados en la minería mediante la selección de áreas clave en la fase de exploración para posteriores fases de prospección en el contexto de la creciente demanda de materias primas, lo que se demuestra en esta zona de estudio en donde existen explotaciones de sulfatos, carbonatos y arcillas.

5. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto PID2023-150229OB-100 (HYPERLANDFORM), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

6. REFERENCIAS

Alonso, K., Bachmann, M., Burch, K., Carmona, E., Cerra, D. et al. (2019). Data products, quality and validation of the DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer (DESIS). *Sensors, 19*, 4471.

Chabrillat, S., Guanter, L., Segl, K., Foerster, S., Fischer, S., Rossner, G., Schickling, A., LaPorta, L., Honold, H.-P., & Storch, T. et al. (2020). The EnMAP German spaceborne imaging spectroscopy mission: Update and highlights of recent preparatory activities. In IGARSS 2020-2020 I*EEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3278–3281.

Cogliati, S., Sarti, F., Chiarantini, L., Cosi, M., Lorusso, R. et al. (2021). The PRISMA imaging spectroscopy mission: Overview and first performance analysis. *Remote Sensing of Environment, 262*, 112499.

García-Romero, E. (2004). Génesis de arcillas magnésicas en la Cuenca de Madrid: interrogantes planteados. *Bol. Geológico Miner.*, 115, 629-640.

Goetz, A.F.H., Vane, G., Solomon, J.E. & Rock, B.N. (1985). Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. *Science*, 228, 1147-1453.

Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzel, W.M., Lowers, H.A., Driscoll, R.L., & Klein, A.J. (2017). USGS Spectral Library Version 7: U.S. Geological *Survey Data Series 1035*, 61 p. https://doi.org/10.3133/ds1035

Matsunaga, T., Iwasaki, A., Tachikawa, T., Tanii, J., Kashimura, O. et al. (2020). Hyperspectral imager suite (HISUI): its launch and current status. En IGARSS 2020-2020 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3272–3273.

Thompson, D., Thompson, D.R., Green, R.O. et al. (2023). On-orbit calibration and performance of the EMIT imaging spectrometer. *ESS Open Archive*, July 20.

Congresos UEx. Actas de Congresos. ISSN: 3101-7177,
vol. 2, 2026, XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección
DOI: https://doi.org/10.17398/3101-7177.2.253

Teledetección hiperespectral de proximidad aplicada al análisis composicional de rocas carbonatadas ornamentales

Rodríguez, Indira [1] **Ferrer-Julià, Montserrat** [1] **García-Meléndez, Eduardo** [1] **Cruz, Juncal A.** [1] **Bakker, Wim H.** [2] **Espín de Gea, Antonio** [3]

[1] Universidad de León, España

[2] University Twente, The Netherlandas

[3] Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales

ORCID: Rodríguez 0000-0002-2518-952X Ferrer-Julià 0000-0001-8021-1040 García-Meléndez 0000-0001-8217-8205 Cruz 0000-0003-2768-9242 Bakker 0000-0003-0382-7225

Correspondencia: iroda@unileon.es mferj@unileon.es egarm@unileon.es jcrum@unileon.es w.h.bakker@utwente.nl antonio.espin@ctmarmol.es

RESUMEN

El uso de las imágenes hiperespectrales de proximidad facilita la zonificación de muestras de roca ornamental, caracterizando áreas con diferente composición mineralógica que puedan afectar la calidad del material. En este trabajo se ha realizado una clasificación de imágenes hiperespectrales con el algoritmo Spectral Angle Mapping (SAM) a partir de la selección de endmembers localizados previamente en la superficie de la muestra mediante composiciones en color generadas con cocientes de bandas. El resultado ha mostrado cómo, aunque la roca presenta una composición homogénea, es posible diferenciar áreas con distinto contenido en hierro, calcio y magnesio no observables a simple vista. Ello confirma que esta herramienta es idónea para obtener una caracterización rápida y objetiva de materias primas ahorrando costes y facilitando una explotación de manera más sostenible.

Palabras clave: *Teletección de proximidad, SWIR, cartografía mineral*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 20 febrero 2026

© 2026 XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

Teledetección hiperespectral de proximidad aplicada al análisis composicional de rocas carbonatadas ornamentales

Rodríguez, Indira [(1)], Ferrer-Julià, Montserrat [(1)], García-Meléndez, Eduardo [(1)], Cruz, Juncal A. [(1)], Bakker, Wim H. [(2)], Espín de Gea, Antonio [(3)]

[(1)] Universidad de León, España.

0000-0002-2518-952X, iroda@unileon.es ; 0000-0001-8021-1040, mferj@unileon.es

0000-0001-8217-8205, egarm@unileon.es ; 0000-0003-2768-9242, jcrum@unileon.es

[(2)] University Twente, The Netherlandas.

0000-0003-0382-7225, w.h.bakker@utwente.nl

[(3)] Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales.

antonio.espin@ctmarmol.es

Resumen: El uso de las imágenes hiperespectrales de proximidad facilita la zonificación de muestras de roca ornamental, caracterizando áreas con diferente composición mineralógica que puedan afectar la calidad del material. En este trabajo se ha realizado una clasificación de imágenes hiperespectrales con el algoritmo *Spectral Angle Mapping* (SAM) a partir de la selección de *endmembers* localizados previamente en la superficie de la muestra mediante composiciones en color generadas con cocientes de bandas. El resultado ha mostrado cómo, aunque la roca presenta una composición homogénea, es posible diferenciar áreas con distinto contenido en hierro, calcio y magnesio no observables a simple vista. Ello confirma que esta herramienta es idónea para obtener una caracterización rápida y objetiva de materias primas ahorrando costes y facilitando una explotación de manera más sostenible.

Palabras clave: Teledetección de proximidad, SWIR, cartografía mineral

Hyperspectral proximal sensing applied to the compositional analysis of ornamental carbonate rocks

***Abstract**: The use of proximal sensing hyperspectral images facilitates the zoning of ornamental rock samples, identifying areas with different mineralogical compositions that may affect the quality of the material. In this work, hyperspectral images were classified using the Spectral Angle Mapping (SAM) algorithm, based on the selection of endmembers previously identified on the surface of the sample using colour compositions generated from band ratios. The result has shown that, although the rock has a homogeneous composition, it is possible to distinguish areas with different iron, calcium and magnesium contents that are not visible to the naked eye. This confirms this tool is ideal for obtaining rapid and objective characerisation of raw materials, saving costs and facilitating more sustainable exploitation.*

***Keywords**: Proximal sensing, SWIR, mineral mapping*

1. INTRODUCCIÓN

La explotación de materias primas de origen mineral tiene un gran interés económico e industrial, pero suele presentar un importante rechazo por parte de la población debido a que es difícil realizar una explotación ambientalmente sostenible (Ren *et al*., 2026). En el caso de la roca ornamental, una parte importante del problema reside en la cantidad de residuos que se generan al rechazarse material que no cumple los criterios mínimos de calidad (por presencia de arcillas, óxidos de hierro o yeso). El análisis de imágenes hiperespectrales tomadas con sensores terrestres en laboratorio facilita la distinción de los componentes minerales de la roca gracias a su distinta respuesta espectral en el infrarrojo de onda corta (*short-wave infrared* – SWIR), lo que es imposible de detectar visualmente (Shankar, 2015). Esta herramienta presenta también la ventaja de poder trabajar en tiempo real, tanto en el campo como en naves industriales, lo que la hace idónea para su uso en el proceso de producción, al obtener de una forma muy rápida los resultados.

El objetivo de este trabajo es demostrar cómo la teledetección de proximidad facilita la generación de mapas de distribución mineralógica superficial en muestras de rocas ornamentales mediante operaciones de clasificación de imágenes, pudiendo contribuir a una extracción más eficiente y sostenible de los recursos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Se ha estudiado una muestra de mano de una roca ornamental procedente de mármoles paleozoicos del Complejo Nevado-Filábride de la provincia de Almería (España). Estos mármoles pertenecen a la formación Huertecica, formada por una asociación de yesos, brechas y rocas carbonatadas (García Monzón *et al*., 1975).

La muestra estudiada es un mármol dolomítico de color amarillo-anaranjado en cuya superficie se distinguen diferentes tonalidades (señaladas como 1 y 4 en la Figura 1) y dos tipos de patrones de fracturación. Por una parte, se distinguen fracturas nítidas de color marrón (señalado como 2 en la Figura 1) y, por otra parte, fracturas representadas por líneas más desdibujadas y de color negro (3 en la Figura 1). Principalmente, alrededor de estas últimas aparecen áreas más oscuras similares a dendritas difuminadas (4 en la Figura 1).

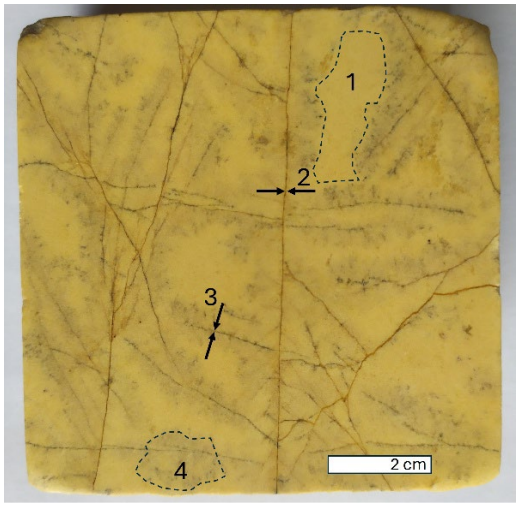


Figura 1. Fotografía de la muestra de roca ornamental estudiada en este trabajo.

Se tomó una imagen hiperespectral en laboratorio con cámara *Spectral Imaging LTD* (SPECIM) y resolución espacial de 0,256 mm. En su análisis solo se ha trabajado con un total de 288 bandas espectrales correspondientes al SWIR, con resolución espectral de 12 nm. En esta región del espectro se encuentran la mayor parte de los rasgos de absorción distintivos de los minerales de interés en este estudio (carbonatos, arcillas y sulfatos).

Durante el preprocesado de la imagen, se convirtieron los valores digitales a reflectancia y se analizaron con el programa *HypPy* (Bakker *et al*., 2024) para eliminar aquellas bandas que presentaban errores y mayor ruido, quedando finalmente una imagen compuesta por 278 bandas. Para el posterior procesado de imágenes se utilizó el programa ENVI 5.2.

Dado que los carbonatos predominan en toda la superficie de la roca objeto de estudio, los cocientes de bandas clásicos orientados a este tipo de mineralogía no permitían diferenciar unas zonas de la imagen de las otras. Por ello se hizo un preanálisis de las curvas espectrales de los píxeles que presentaban distintos colores y tonalidades en una composición en color RGB (1381 nm, 1657 nm, 1988 nm). En dichas curvas espectrales la posición de los rasgos de absorción coincidía, pero las pendientes de las curvas variaban en según qué rangos, lo que facilitó definir los siguientes tres cocientes de bandas:

$$cociente1 = \frac{B1}{B2}$$

donde B1 se corresponde con longitud de onda de 1012 nm y B2 con 1109 nm

$$cociente2 = \frac{B3}{B4}$$

donde B3 se corresponde con longitud de onda de 1915 nm y B4 con1903 nm

$$cociente3 = \frac{B5}{B6}$$

donde B5 se corresponde con longitud de onda de 1392 nm y B6 1409 nm

Con estos tres cocientes se realizó una composición en color que permitió diferenciar visualmente distintas zonas relacionadas con composiciones mineralógicas diferentes, lo que facilitó la selección de 5 *endmembers* necesarios para generar una clasificación de la imagen. De cada zona diferente se calculó un promedio de 5 curvas espectrales y se guardó en la librería espectral como Clase x (x corresponde a valores entre 1 y 5).

Paralelamente, las curvas espectrales de los *endmembers* se compararon con las respuestas espectrales de distintos minerales disponibles en la espectroteca del USGS (Kokaly *et al*. 2017), analizando cuantitativamente el valor de la longitud de onda correspondiente a los rasgos de absorción presentes, así como la forma general de las curvas espectrales.

Posteriormente se aplicó el algoritmo de clasificación *Spectral Angle Mapping* (SAM), que es una clasificación supervisada basada en la similitud espectral entre la reflectancia espectral de los píxeles de la imagen y los espectros de referencia de materiales conocidos de bibliotecas espectrales (Kruse *et al*., 1993), o bien de los *endmembers* seleccionados a partir de la imagen. El algoritmo determina la similitud espectral entre ellos calculando el ángulo entre los espectros, tratándolos como vectores en un espacio con una dimensionalidad igual al número de bandas. Los ángulos más pequeños representan coincidencias más cercanas al espectro de referencia. Los píxeles más alejados del umbral máximo de ángulo especificado en radianes no se clasifican.

Se realizó una primera clasificación SAM seleccionando un ángulo de 0,1 radianes para todas las clases. Con este ángulo, suficientemente elevado, se consigue que todos los píxeles sean clasificados. La clasificación genera un histograma que permite comprobar cuántos píxeles podían entrar en más de una clase. Esos píxeles son aquellos para los que las curvas de las diferentes clases se solapan.

Una vez analizado el histograma se hizo una segunda clasificación SAM en la que se asignaron ángulos de

similitud distintos para cada clase y más restrictivos que el ángulo utilizado en la primera clasificación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La imagen resultante de la composición en color de cocientes de banda (RGB-cociente1-cociente2-cociente3) resalta áreas que se comportan espectralmente diferente (Fig. 2), lo que ha permitido definir cinco clases: Clase 1, Clase 2, Clase 3, Clase 4 y Clase 5, y cada clase tiene un *endmember* asociado.

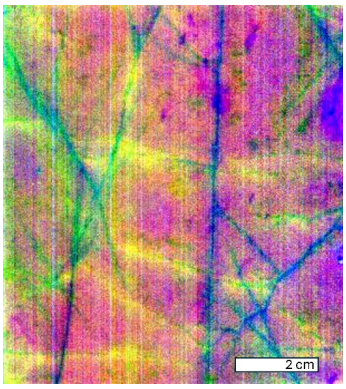


Figura 2. Composición en color de cocientes de bandas. (RGB-cociente1-cociente2-cociente3).

Las clases seleccionadas en la imagen de cocientes de bandas coinciden con las zonas diferenciadas visualmente en la muestra. Además, se añadió una nueva clase que solo se reconoce en la imagen de cocientes.

- Clase 1: Zonas de color rosa intenso distribuidas por toda la muestra.
- Clase 2: Colores azules distribuidos linealmente en franjas estrechas.
- Clase 3: Colores verdes y amarillos distribuidos linealmente en franjas.
- Clase 4: Colores naranjas adyacentes a las zonas rosas que aparecen cerca de las clases 2 y 3.
- Clase 5: Color morado en un área restringida a la parte superior derecha de la imagen.

Las firmas espectrales de los cinco *endmembers* presentan los rasgos de absorción de la dolomita a 2318 nm, 2275 nm, 2139 nm, 1976 nm, 1859 nm y 1741 nm (Fig. 3). Las diferencias observadas entre sus curvas espectrales son: mayor reflectancia general de la Clase 1 a longitudes de onda menores de 1800 nm; una pendiente más pronunciada- hasta 1200 nm- en la Clase 2; la uniformidad de la pendiente hasta 1600 nm de la Clase 4. un rasgo más profundo a 1400 nm en la Clase 5.

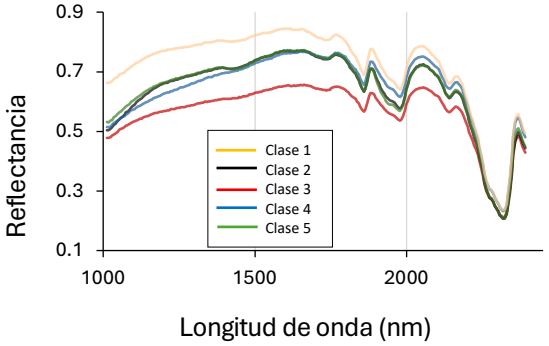


Figura 3. *Endmembers* de las cinco clases establecidas para la clasificación SAM de la imagen hiperespectral.

La comparación de estas curvas espectrales con las de la espectroteca del USGS, ha permitido diferenciar mineralógicamente estos *endmembers*. La Clase 5 corresponde a un carbonato puro con alto contenido en agua. Se han distinguido tres composiciones para las clases 2, 3 y 4: la Clase 2 presenta una pendiente más pronunciada en longitudes de onda inferiores a 1200 nm lo que podría estar relacionado con un mayor contenido de hierro que en la Clase 3 y un contenido similar al de la Clase 4. Por último, el rasgo de absorción que aparece a 2380 nm en todos los *endmembers* (excepto en la Clase 2) puede deberse a la existencia de arcillas magnésicas.

Tras el estudio de los histogramas generados en la primera clasificación SAM, en la segunda clasificación se otorgaron diferentes valores de ángulo para cada clase (Fig. 4): Clase 1: 0,011; Clase 2: 0,014; Clase 3: 0,015; Clase 4: 0,011; y Clase 5: 0,018 radianes. Ajustando los ángulos se consiguió una mayor separabilidad entre las clases.

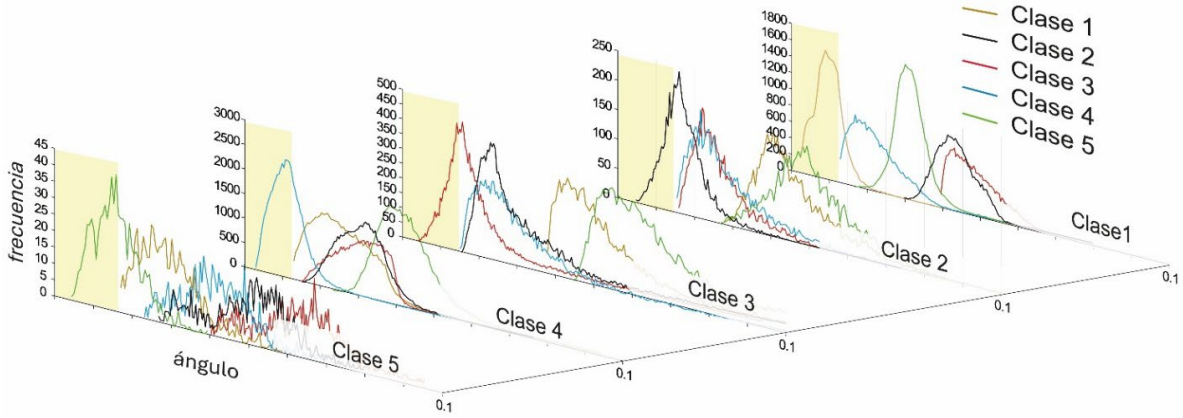


Figura 4. Histogramas de píxeles que se ajustan a un *endmember* en función del ángulo. La franja amarilla muestra el ángulo utilizado en la clasificación SAM que permite discriminar entre clases. También se muestra la similitud con el resto de *endmembers*.

La clasificación SAM realizada con los ángulos ajustados corresponde al mapa de distribución mineralógica de la Fig. 5. La mayor parte de la superficie de la muestra está formada por la composición correspondiente a la Clase 4. La Clase 1 aparece en toda la imagen, pero más frecuente en la mitad derecha. La Clase 5 aparece únicamente en la parte superior derecha. Las clases 2 y 3 se dan claramente en zonas lineales estrechas por toda la imagen.

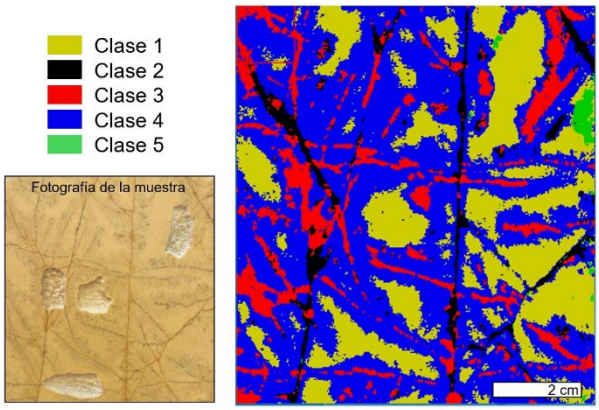


Figura 5. Mapa de distribución de clases generado a partir de la clasificación SAM. La correspondencia mineralógica se encuentra comentada en el texto.

4. CONCLUSIONES

La selección de *endmembers* no siempre puede realizarse a través de espectrotecas estándares, siendo en muchos casos necesario el análisis detallado de las curvas espectrales de los píxeles de la imagen: diferencias composicionales en la roca ornamental pueden mostrarse como variaciones muy sutiles en la respuesta espectral. Aun así, los resultados obtenidos demuestran cómo una vez definidos los *endmembers* en una muestra de roca ornamental, la reclasificación de la imagen puede realizarse en tiempo real, facilitando la clasificación de la roca a comercializar y minimizando la generación de residuos al disminuir el posible rechazo.

5. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por los proyectos HYPOPROCKS (PDC2021-121352-100), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR, y por el proyecto PID2023-150229OB-100 (HYPERLANDFORM), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER.

6. REFERENCIAS

Bakker, W., van Ruitenbeek, F., van der Werff, H., Hecker, C., Dijkstra, A., and van der Meer, F. (2024). Hyperspectral Python: *HypPy. Algorithms 17*(8), 337. https://doi.org/10.3390/a17080337

Crowley, J.K., Brickey, D.W., and Rowan, L.C. (1989). Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana: Mineral discrimination using relative absorption band-depth images. *Remote Sensing of Environment 29*(2), 121-134. https://doi.org/d6t32w

García Monzón,G., Kampschuur, W., and Vissers, R.L.M. (1975). Mapa geológico de la hoja nº 1013 (Macael). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), IGME.

Kirsch, M., Mavroudi, M., Thiele, S., Lorenz, S., Tusa, L., Booysen, R., Herrmann, E., Fatihi, A., Möckel, R., Dittrich, T., and Gloaguen, R. (2023). Underground hyperspectral outcrop scanning for automated mine-face mapping: The lithium deposit of Zinnwald/Cínovec. The Photogrammetric Record (38). https://doi.org/10.1111/phor.12457

Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzel, W.M., Lowers, H.A., Driscoll, R.L., and Klein, A.J. (2017). USGS Spectral Library Version 7: U.S. Geological Survey *Data Series 1035*, 61 p. https://doi.org/10.3133/ds1035

Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.B., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., and Goetz, A.F.H. (1993). *Remote Sensing of Environment 44*, 145–163. https://doi.org/csm2xm

Ren, H., Zhao, Y., and He, T. (2026). Remote Sensing in Mining-Related Eco-Environmental Monitoring and Assessment. *Remote Sensing, 18*(1), 103. https://doi.org/10.3390/rs18010103

Shankar, V. (2015). Field characterization by near infrared (NIR) mineral identifiers: A new prospecting approach. *Procedia Earth and Planetary Science, 11*, 198–203.

Índice de Autores

Índice de autores

A

Abaquero, Nur Algeet
Aceña Gil, Víctor
Afán, Isabel
Agenjos Moreno, Alba
Aguilar Gómez, Fernando
Aguilar Lome, Jaime
Aguilar Romero, Sergio
Agullo, Juan
Alamus, Ramón
Alcalá, José-Tomás
Alcaraz, Alejandro
Alcasena, Fermín
Alcasena Urdioz, Fermín
Ali, Abebe Mohammed
Altava-Ortiz, Vicent
Alvado, Bárbara
Alvado Arranz, Bárbara
Alvarado Fernández, Miguel Ramón
Álvarez Esteban, Óscar
Alvarez Llorente, Luis Antonio
Álvarez Mozos, Jesús
Álvarez Ripado, Ariadna
Álvarez-Martínez, José Manuel
Álvarez-Mozos, Jesús
Alves de Paula, Lourenço
Amouroux, Paul
Andreu, Ana
Angás, Jorge
Angelats Company, Eduard
Antolín Salazar, Alicia
Antuña Marrero, Juan Carlos
Aragonés, David
Aragones, David
Aragonés Borrego, David
Aragoneses, Elena
Araujo Ferreira, Victor Vinicius
Araújo Furtado de Mendonça, Bruno
Arcila Garrido, Manuel
Arellano, Irene
Arellano Pérez, Stéfano
Arellano Pérez, Stefano
Arencibia Pérez, Nuria
Arencibia-Pérez, Nuria
Arenhart Pirolla, Mallu
Arias Ballesteros, Manuel
Arizo-García, Patricia
Arlanzón, Daniel
Arribas Rodríguez, Bárbara
Arrogante Funes, Fátima
Arrogante Funes, Patricia
Astigarraga, Julen
Auruškevičius, Mantas

B

Badía Villas, David
Baissero, Adrián
Baissero García, Adrián Enrico
Bakker, Wim H.
Bakker, Winn H.
Balaguer Beser, Ángel
Ballester, José Belenguer
Ballestero García-Asenjo, Ernesto
Barba Ceballos, Paola
Barberà Bisbal, Maria Jesús
Barbero, Luis
Bareth, Georg
Barillé, Laurent
Barquín, José
Barquín, Jose
Barragán Sánchez, Jesús
Basallote, María Dolores
Basallote Sánchez, M Dolores
Becerra, Javier
Bellvert, Joaquim
Belmar, Francisco
Beltrán, Antonio
Bergas, Joan
Bergas Ques, Joan
Bermejo Priego, José Luis
Blazquez Casado, Ángela

Blázquez-Casado, Ángela
Bobichon, Yves
Bonifaz Barba, Gabriel
Borra-Serrano, Irene
Botella Bou, Raúl
Boumahdi, Meryeme
Bozorgi, Mahsa
Branca, Federico
Bravo Núñez, Andrés
Bravo-Hernández, Miriam
Bravo-Núñez, Andrés
Briceño de Urbaneja, Idania
Briceño-de-Urbaneja, Idania
Burchard-Levine, Vicente
Bustamante Díaz, Javier
Bustos-Caparrós, Juan R.

C

Caballero, Gabriel Rodrigo
Caballero, Isabel
Caballero Cañas, Gabriel Rodrigo
Caballero de Frutos, Isabel
Caballero-Molada, Marcos
Cabrera Díez, Marina
Cachorro, Victoria
Cachorro, Victoria Eugénia
Cachorro Revilla, Victoria Eugenia
Caiza-Morales, Lorena
Calama, Rafael
Calbet, Ana
Calera, Alfonso
Calle, Abel
Calle Montes, Abel
Calzado Carretero, Anabel
Camacho, Fernando
Cambronero-Ruiz, Laura
Campos Acosta, Joaquín
Campos Taberner, M.
Campos-Taberner, Manuel
Campoy, Jaime
Canero, Francisco M.
Cantón Martínez, Susana
Caparrós Santiago, José Antonio
Carbone, Andrea
Carbonell Rivera, Juan Pedro
Carbonell-Rivera, Juan Pedro
Carbonero, M.Dolores
Cárdenas-Martínez, Aarón
Carracedo, Rogelio
Carrascosa, Alejandro
Carretero, Laura
Carrillo García, Cristina
Casadesus, Jaume
Casal Pascual, Gema
Casillas-Martínez, Lucía
Casterad, Mª Auxiliadora
Casterad Seral, Mª Auxiliadora
Castillo-Malla, Darwin
Castiñeira-Ibáñez, Sergio
Català Forner, Mar
Catala-Forner, Mar
Cava, Jessica Esteban
Cea, Cristina
Cendrero-Mateo, M.ª Pilar
Cendrero-Mateo, Mª Pilar
Cervera Montero, Agustín
Chapinal, Libertad
Chapinal Cervantes, Libertad
Chardi-Raga, Cynthia
Chica Ruíz, Juan Adolfo
Chuvieco, Emilio
Clavero, Francisco Cáceres
Cobos, Joaquín
Cobos-Mora, Sandra
Colmenero Hidalgo, Elena
Colmenero-Hidalgo, Elena
Company, Jaume
Concostrina-Zubiri, Laura
Contreras, Eva
Cordero Montero, Faustino
Coronado, Ismael
Coronado-Campos, Javier
Cost, Adrián
Crespo, Pablo
Crespo Pérez, Rodrigo
Crespo-Peremarch, Pablo
Crisafulli, Virginia
Cristóbal, Jordi
Cristóbal Rosselló, Jordi
Cruces Pérez, Joaquín

Cruz, Juncal A.
Cruz Martínez, Juncal A.
Cruz-Alonso, Verónica
Cruzado-Campos, Enric
Curcio, Andrea

D

Davies, Bede Ffinian Rowe
de Castro, Ana
de Frutos, Ángel
de Frutos, Angel
de Frutos Baraja, Ángel Máximo
de la Rosa, Raúl
de la Rubia, Pablo
de Miguel, Eduardo
de Miguel Llanes, Eduardo
de Tena Rey, Maite
Delegido, Jesús
Delegido Gómez, Jesús
Della Bellver, Fàtima
Dewaissage, Carlos
di Lorenzi, Andrés
Díaz, Ricardo
Díaz-Delgado, Ricardo
Diaz-Qujada, Isidora
Doblas-Rodrigo, Álvaro
Dolores Carbonero, M.
Domingo, Darío
Domingo Carrasco, Concha
Dorado, José
Drazen, Skokovic
Durán Lalaguna, Concha
Durán-Barroso, Pablo
Durval, Segundo
Duveiller, Gregory

E

Eloisa de Freitas Milani, Jaçanan
Erena Arrabal, Manuel
Escayo Menéndez, Joaquín
Escobar Villanueva, Jairo
Escobar Villanueva, Jairo R.
Escudero, Ana Isabel
Escudero Muñoz, Catalina
Espín de Gea, Antonio
Esteban, Jessica
Esteban Cava, Jessica
Estefano Olaiz, Miguel
Estrany, Joan
Etxebeste, Iñaki
Eugenio González, Francisco
Eyji Sano, Edson

F

Falcão, António
Félez Bernal, Jorge
Fernández, Cristina
Fernández Fornos, Lara
Fernandez Isabel, Alberto
Fernández Merodo, Jose Antonio
Fernández Naranjo, Francisco Javier
Fernández-Guisuraga, José M.
Fernández-Menéndez, Álvaro
Ferreira Lopes Machado, Aroldo
Ferrer-Julià, Montserrat
Flo, Eva
Fragoso Campón, Laura
Fragoso-Campón, Laura
Franch, Belén
Franch Gras, Belen
Franquesa, Magí
Freitas Souza, Jhiorranni

G

Gabriel, Jose Luis
Gabriel, José Luis
Gago, Xurxo
Galindo Jiménez, Inés
Galve, Joan Miquel
García, Aurelio
Garcia, Carlos
García, Mariano
García, Omaira
García Bruzón, Adrián
Garcia Davalillo, Juan Carlos
García Díaz, Daniel

García Díaz, Diego
García Martín, Sergio
García Moreno, Alma M.
Garcia Pedrero, Ángel
García Pedrero, Ángel Mario
García Ramajo, Jorge Juan
García-Candanedo, Lucía
García-Díaz, Daniel
García-Espriu, Aina
Garcia-Espriu, Aina
García-Guerra, Jose
García-Haro, F. Javier
García-Meléndez, Eduardo
Garcia-Moreno, Alma M.
García-Rivas, Javier
Garrido Sáenz de Tejada, Jesús María
Garrido-Rubio, Jesús
Gatón, Javier
Gatón Herguedas, Javier
Gelabert Vadillo, Pere
Gené Skrabec, Bernat
Gernez, Pierre
Giambelluca, Ana Laura
Gil, Celia
Gil, Rodrigo Calero
Gil Martín, Celia
Gilabert, M.a
Gilabert, María Amparo
Gimeno, Sergio
Gimeno Crespo, Sergio
Godoy, Diego
Gomarasca, Ulisse
Gomes da Silva, Paula
Gómez, Cristina
Gómez, M.jose Muñoz
Gómez Candón, David
Gómez del Rio, Miguel
Gómez Enri, Jesús
Gómez Giraldez, Pedro
Gómez Giráldez, Pedro Jesús
Gómez-Gener, Lluís
Gómez-Giraldez, Pedro
Gómez-Giráldez, Pedro J.
Gómez-Giraldez, Pedro J.
González, Isabel
González, Isabel González
González, Ramiro
González Catón, Ramiro
González de Audícana Amenábar, María
González Fernández, Daniel
González Gambau, Verónica
González González, Isabel
González Mejías, Carlos José
González-Audícana, María
González-Cascón, Rosario
González-Dugo, M.Pat.
González-Dugo, María P.
Gonzalez-Dugo, Maria P.
González-Fernández, Daniel
González-Gambau, Verónica
González-Guerrero, Oscar
González-Haro, Cristina
González-Moreno, María Teresa
González-Piqueras, José
Gonzalo Martín, Consuelo
Grajera-Antolín, Cristina
Guamán Aucapiña, José
Guerrero Benavent, Cesar José
Guerrero Cubero, Carlos
Guijarro Guzmán, Mercedes
Guillén Castillo, Mónica
Guillen Climent, Maria Luz
Guillén-Climent, Mariluz
Guirado Luna, Adrián
Guisado-Pintado, Emilia
Gutiérrez, Pedro Antonio
Gutiérrez, R. R
Gutiérrez de la Cámara, Óscar
Gutiérrez de la Cámara Ara, Óscar
Gutierrez de la Camara Ara, Oscar

H

Haro, Sara
Heredia, Sergio
Hermosilla, Txomin
Hernandez, Blanca Sanchez
Herrera, Francisco
Herrera, Victorino
Herrero Anta, Sara
Herrero del Barrio, Celia

Herrero-Anta, Sara
Horsman, David
Hugé, Justine

I

Immitzer, Markus
Iranzo, Cristian
Isgró, Melisa
Isola, Claudia

J

Jacinto, Adrián
Jaramillo Carrión, María
Jeannet Chaves, Guilhem Nicolás
Jiménez, Marcos
Jiménez Michavila, Marcos
Jiménez Romanillos, José
Jiménez-Alfaro, Borja
Jimenez-Berni, Jose Antonio
Jiménez-Guisado, Adrián
Jiménez-Muñoz, Juan-Carlos
Julien, Yves
Jung, Martin

K

Kassimi Farhaoui, Mouhsine
Khairoun, Amin

L

Lagranja-Usán, Jorge
Lamelas Gracia, María Teresa
Lancho Martín, María del Carmen
León, Lorenzo
Li, Wantong
Llorens, Rafael
Lluch, Roger HUERTA I
Lóez Morales, Juan Antonio
Longarela, Bruno
Longarela Fuente, Bruno
López, Antonio
López Andreu, Francisco Javier
López-Ballesteros, Ana
López-Nieta, Diego
Lopez-Nieta, Diego
Lozano Valencia, Pedro José
Luque Ballestero, César

M

Madrigal Olmo, Javier
Makarova, Evgeniia
Mañanes Salinas, Rafael
Mantas, Vasco
Manzon, Gustavo
Manzon Nunes, Gustavo
Marcello, Javier
Marcello Ruiz, Francisco Javier
Marchante-Cambrón, J.Cesar
Marín Salcedo, José
Mariñas, Ana María NIVEAU-DE-VILLEDARY Y
Marino del Amo, Eva
Mariscal Yuste, Conchi
Marqués, Luis
Martí, Karen
Marti-Burillo, Ruben
Martín, Ana Amelia
Martín, M. Pilar
Martin, M.Pilar
Martín, Nicolás
Martín Alcón, Santiago
Martín Banda, Raquel
Martín de Diego, Isaac
Martín González, Fidel
Martín-Alcón, Santiago
Martín-Molina, David
Martínez, Ana
Martínez, Beatriz
Martinez, Gema Tarraga
Martínez Barbáchano, Rubén
Martínez García, Francisco Manuel
Martinez-Rodrigo, Raquel
Martínez-Sánchez, Enrique
Mary, Benjamin
Mateos, Alessandro

Mateos, David
Mateos Villán, David
Mazón Ibáñez, Elena
Mcglade, James
Mederos Barrera, Antonio
Mederos Barrera, Antonio Ramón
Medina Méndez, Gustavo Adolfo
Mena, Juan Diego
Mendes, Maria Paula
Merino de Miguel, Silvia
Merino-de-Miguel, Silvia
Mesas Carrascosa, Francisco Javier
Mesas-Carrascosa, Francisco Javier
Meseguer-Ruiz, Oliver
Mesias-Ruiz, Gustavo Adolfo
Migliavacca, Mirco
Miguel, Silvia Merino de
Miguel, Sofía
Millán Roldán, María del Carmen
Molina Jiménez, Barbara Beatriz
Molina-Medina, Antonio
Moncholi Estornell, Adrián
Moncholí-Estornell, Adrián
Moncholi-Estornell, Adrián
Monedero de Andrés, Ana
Montealegre Gracia, Antonio Luis
Montesinos Aranda, Salomón
Montesinos Melendo, Salomón
Montorio, Raquel
Montorio Llovería, Raquel
Montoro, Amelia
Montoro Girona, Miguel
Morales-Martín, Alejandro
Moreno, José
Moreno, Marcos
Moreno, Sergio
Moreno Camacho, Juan
Moreno González, Raúl
Moreno Marcos, Gerardo
Moreno-Cano, Francisco
Moya, Alejandro
Muela, Jimmy
Muela, Jimmy A.
Muela Pillajo, Jimmy A.
Muleo Martínez, Roberto
Muñoz, Félix
Muñoz Sanchéz, Felix
Muñoz Sánchez, Félix
Muñoz Sanchez, Félix
Muñoz-Gómez, M.José
Muñoz-Lorite, Juanma
Munuera Irurzun, Saioa

N

Nadal Romero, Estela
Naranjo, Miguel Ángel
Nardini, Andrea
Nardini, Andrea Gianni Cristoforo
Navarro, Gabriel
Navarro, José Antonio
Navarro, Martí
Navarro Almendros, Gabriel
Navarro Frutos, Alvaro
Nieto, Hector
Nieto, Héctor
Ninyerola, Miquel
Novo, Ana

O

Olalla, Adrián
Olano, José Miguel
Oli, Aman
Oliva, Patricia
Olivares-Solís, Angelo Hernane
Ollega Caro, Jose M.
Olmedo, Estrella
Olmedo Casal, Estrella
Onrubia, Raul
Orozco Bagou, Daniel
Ortega Terol, Damián

P

Pabon-Moreno, Daniel E.
Pacheco-Labrador, Javier
Padial-Iglesias, Mario
Páez, Francisco C.
Pampanoni, Valerio

Pancorbo, Jose Luis
Papadakis, Dimitri
Pardos, Marta
Pariente Migoya, Alejandro
Pascual de la Torre, Luis
Paskeviciute-Kidron, Agne
Pavon, Laura Recuero
Pecci, Antonio
Pellón de Pablo, Erica
Peña, José Manuel
Peña Molina, Esther
Peón, Juanjo
Peón Garcia, Juan J.
Peón Garcia, Juan José
Pereira, Inés
Pereira Rezende, Segundo Durval
Pereira Rodríguez, Inés
Perez, Fernado
Pérez, José María
Pérez Cabello, Fernando
Pérez Cayeiro, María Luisa
Pérez Grau, Francisco Javier
Pérez Montiel, Jhonny
Pérez Montiel, Jhonny I.
Pérez Pablos, Sergio
Pérez Porras, Fernando
Pérez-Blanco, C. Dionisio
Pérez-Cabello, Fernando
Pérez-Martínez, Waldo
Pérez-Méndez, Néstor
Pérez-Porras, Fernando
Perrino, Adriana
Pesado, Pedro Javier Fernandez
Pesquer, Lluís
Pettinari, M. Lucrecia
Peña, José Manuel
Pfitzer-López, Daniel
Pimentel, Rafael
Pipia, Luca
Pons Fernández, Xavier
Poray, Chris
Portabella, Marcos
Pro Muñoz, Carmen
Proud, Simon
Pubill Fondevila, David
Puchol Sola, Guillermo
Pugh, Thomas A. M.
Pugni Stanek, Tomás
Pugni-Stanek, Tomás
Puppo, Lucía

Q

Quemada, Miguel
Quirós, Elia
Quiros, Elia
Quirós Rosado, Elia

R

Ramos, Ramón
Ramos Fernández, Lia
Ranz Vega, Pedro Pablo
Raya-Sereno, M.Dolores
Raya-Sereno, María Dolores
Redondo, Alejandro
Remeses, Tomas
Ricarte, Beatriz
Rivera, Daniela
Roca Mora, Mar
Roces-Díaz, José V.
Rodes Blanco, Marina
Rodrigo-Comino, Jesús
Rodrigues Mimbrero, Marcos
Rodríguez, Esteban
Rodríguez, Indira
Rodríguez Álvarez, Indira
Rodríguez Esparragón, Dionisio
Rodríguez Galiano, Víctor
Rodríguez Galiano, Víctor Francisco
Rodríguez Mayoral, Javier
Rodriguez Puerta, Francisco
Rodríguez Ramírez, Antonio
Rodríguez-Alija, Alfonso
Rodríguez-Galiano, Víctor
Rodriguez-Galiano, Victor
Rojas-Briceño, Nilton B.
Rolo, Víctor
Rolo Romero, Víctor
Román, Alejandro
Román, Roberto

Román Diez, Roberto
Román Vázquez, Alejandro
Román-Cascón, Carlos
Romero, Gabriela P.
Romero, Jose
Romero, Ramiro
Romero Medina, Santiago Patricio
Romero Vivó, Mario
Rosado, Belén
Rubio, Constanza
Rubio, Contanza
Ruiz, Luis Á.
Ruiz, Luis Ángel
Ruiz, Magdalena
Ruiz Fernández, Luis
Ruiz Sebastián, Arnau
Ruiz-Benito, Paloma
Ruiz-Sebastian, Arnau
Ruiz-Verdú, Antonio
Ruíz-Verdú, Antonio

S

Sabin, Pablo
Sagués Carracedo, Ana
Salinas González, Daniel
Salvador Esteban, Raquel
San Bautista, Alberto
San Juan, Raúl
Sánchez, David
Sánchez, Juan Manuel
Sanchez Alcaraz, Marta
Sánchez-Labrador, Roberto
Sánchez-Ruiz, Sergio
Sánchez-Virosta, Alvaro
Sánchez-Virosta, Álvaro
Sánchez-Zapero, Jorge
Santana de Almeida, Vaniele
Santos da Silva, Diego
Sanz Cano, Judit
Sarro Trigueros, Roberto
Schauman, Santiago A.
Schifano, Luca
Scognamiglio Torres, Fernando
Segura-Garcia, Carlota
Serra Ruiz, Pere
Serrano Reina, Jose Antonio
Sharaf, Nora
Sicre-González, Pablo
Sierra, Sergio
Silva López, Jhonsy Omar
Simeón, Rubén
Simó-Martí, Marina
Skokovic, Drazen
Skokovic Jovanovic, Drazen
Sobrino, José A.
Sobrino, José Antonio
Sobrino Rodriguez, José A
Sobrino-Gómez, Álvaro
Sohrabi, Hormoz
Solano-Romero, Erika
Sòria, Guillem
Soria, Juan Miguel
Sòria-Perpinyà, Xavier
Soriano Sancho, José Luis
Sousa, Ana
Stanek, Tomas Luis Pugni
Stoffelen, Ad
Suárez-Seoane, Susana

T

Tamés Noriega, Agustín
Tapia, Felipe
Tarazona Coronel, Yonatan
Tardà, Anna
Tarin Mestre, Javier
Tarquis, Ana M.
Tarrazó-Serrano, Daniel
Tatiana Vilani, Maricéia
Teijido-Murias, Iyán
Tejedor Álvarez, Begoña
Tejedor Ávarez, Begoña
Tenjo, Carolina
Tevar, Juan Miguel Oñate
Tijerín-Triviño, Julián
Toledano, Carlos
Toledano Olmeda, Carlos
Tomé, José Luis
Tomé, Jose Luis

Tomé Morán, Jose Luis
Tomé Morán, José Luis
Torralba, Jesús
Torres, Carlos
Torres Sánchez, Jorge
Torres-Sánchez, Jorge
Torres-Vázquez, Miguel Ángel
Tovar Sánchez, Antonio
Tovar-Sánchez, Antonio
Turiel, Antonio
Turiel Martínez, Antonio
Turpo, Efraín

U

Uris, Antonio

V

Valdiviezo Espinoza, Juan
Valencia Alzate, Juan Ramón
Valenzuela, Pablo
Valenzuela-Jara, Joaquin
Valero-Jorge, Alexey
Vallés Iborra, M.
van der Werff, Harald
van Wittenberghe, Shari
Vargas, Víctor Manuel
Vayreda, Jordi
Vázquez, Águeda
Vázquez Piqué, Javier
Vázquez-Piqué, Javier
Velasco, Ayanta
Verdú López, Concepción
Verger, Aleixandre
Vicente, Eduardo
Vidal-Urriza, María A.
Vignudelli, Stefano
Viguria Jiménez, Antidio
Vilà-Cabrera, Albert
Villanueva, Anastasio J.
Villegas, Dolors
Villegas Ranera, Olmo

W

Weldemariam, Elias Cherenet

X

Xanxo, Roc
Xanxo Prilló, Roc

Y

Yohannes, Tinebeb

Z

Zambrano, Zahylis
Zarco-Tejada, Pablo J.
Zavala, Miguel A.
Zeinali, laya
Zoffoli, Maria Laura



AET CÁCERES 2026

Teledetección Multidisciplinar: Miradas Diversas, Soluciones Comunes

esri España
THE SCIENCE OF WHERE

AVT

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE TRANSPORTES Y MOVILIDAD SOSTENIBLE
INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL

Interreg
España - Portugal
RAT_EOS_PC

SM GEODIM
MODELOS DE INFORMACIÓN DE LA TIERRA

MDPI

Alianza Observa

PRO-LITE TECHNOLOGY

esa

DIPUTACIÓN DE CÁCERES
ÁREA DE CULTURA Y DEPORTES

AYUNTAMIENTO DE cáceres

Invisual
Especializados en Comunicación, Divulgación y Cultura Científica

uex
Universidad de Extremadura

AET

in+dehesa
Instituto de Investigación de la Dehesa