

Tomé Morán, J.; Esteban Cava, J.; Bravo Núñez, A.; González González, I.; Ranz Vega, P.; Martín Alcón, S. ForestMap-IA, Digitalización forestal y sensores remotos orientada a fomentar la gestión forestal sostenible

# ForestMap-IA, Digitalización forestal y sensores remotos orientada a fomentar la gestión forestal sostenible

Tomé Morán, José Luis <sup>1</sup> Esteban Cava, Jessica <sup>1</sup> Bravo Núñez, Andrés <sup>1,2</sup> González González, Isabel <sup>1</sup> Ranz Vega, Pedro Pablo <sup>1</sup> Martín Alcón, Santiago <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agresta S. COOP., España

<sup>2</sup> 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](mailto:jltome@agresta.org) [jesteban@agresta.org](mailto:jesteban@agresta.org) [abravo@agresta.org](mailto:abravo@agresta.org) [igonalez@agresta.org](mailto:igonalez@agresta.org)  
[pranz@agresta.org](mailto:pranz@agresta.org) [smalcon@agresta.org](mailto: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 sería 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

# ForestMap-IA, Digitalización forestal y sensores remotos orientada a fomentar la gestión forestal sostenible

Tomé Morán, José Luis <sup>(1)</sup>, Esteban Cava, Jessica <sup>(1)</sup>, Bravo Núñez, Andrés <sup>(1,2)</sup>, González González, Isabel <sup>(1)</sup>, Ranz Vega, Pedro Pablo <sup>(1)</sup>, Martín Alcón, Santiago <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Agresta S. COOP., España.

<sup>(2)</sup> 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 sería 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 transferencia 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 de 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 transferencia 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 transferencia tecnológica práctica 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 de 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 parcela para un radio de 11,3 m (equivalente al pixel de 400 m<sup>2</sup> 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 (González 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 (m <sup>3</sup> /ha)	4,1	57,5	0,50	32,9
N (pies/ha)	91,7	2214	-4,7	32,9
V (m <sup>3</sup> /ha)	16,2	367	-0,03	34,2
IAVC (m <sup>3</sup> /ha·año)	0,8	12,7	0,4	36,7
VSC (m <sup>3</sup> /ha)	12,1	300	-0,1	35,1
VLE (m <sup>3</sup> /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 m<sup>3</sup> 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 geoprocursos 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 transferir 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 (PIES), 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>