

Peña Molina, E.; Guillen Climent, M.; Marino del Amo, E.; Monedero de Andrés, A.; Medina Méndez, G.; Tomé Morán, J.; Ranz Vega, P.; Arellano Pérez, S. Seguimiento de la humedad del combustible vivo mediante imágenes Sentinel-2 en la isla de Tenerife

# Seguimiento de la humedad del combustible vivo mediante imágenes Sentinel-2 en la isla de Tenerife

Peña Molina, Esther <sup>1</sup> Guillen Climent, Maria Luz <sup>1</sup> Marino del Amo, Eva <sup>2</sup> Monedero de Andrés, Ana <sup>3</sup> Medina Méndez, Gustavo Adolfo <sup>3</sup> Tomé Morán, Jose Luis <sup>1</sup> Ranz Vega, Pedro Pablo <sup>1</sup> Arellano Pérez, Stéfano <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agresta S. Coop., España

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Forestales del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (ICIFOR-INIA, CSIC)

<sup>3</sup> 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](mailto:epena@agresta.org) [mguillen@agresta.org](mailto:mguillen@agresta.org) [eva.marino@inia.csic.es](mailto:eva.marino@inia.csic.es) [amonand@gesplan.es](mailto:amonand@gesplan.es) [gmedmen@gesplan.es](mailto:gmedmen@gesplan.es) [jltome@agresta.org](mailto:jltome@agresta.org) [pranz@agresta.org](mailto:pranz@agresta.org) [sarellano@agresta.org](mailto: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


# Seguimiento de la humedad del combustible vivo mediante imágenes Sentinel-2 en la isla de Tenerife

Peña Molina, Esther <sup>(1)</sup>, Guillen Climent, Maria Luz <sup>(1)</sup>, Marino del Amo, Eva <sup>(2)</sup>, Monedero de Andrés, Ana <sup>(3)</sup>, Medina Méndez, Gustavo Adolfo <sup>(3)</sup>, Tomé Morán, Jose Luis <sup>(1)</sup>, Ranz Vega, Pedro Pablo <sup>(1)</sup>, Arellano Pérez, Stéfano <sup>(1)</sup>

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

epeña@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

<sup>(2)</sup> 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

<sup>(3)</sup> 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 (Yebrá *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

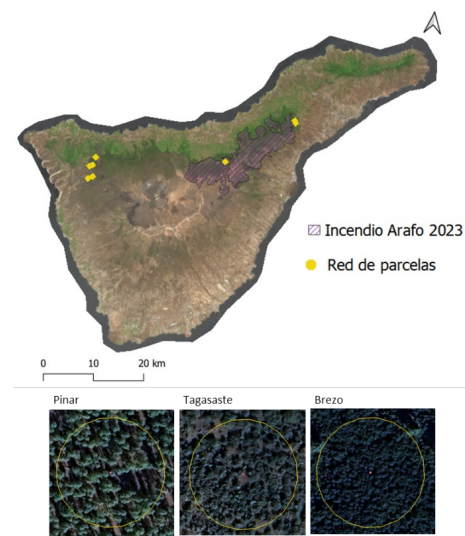
### 2.1. Área de estudio y diseño de muestreo

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

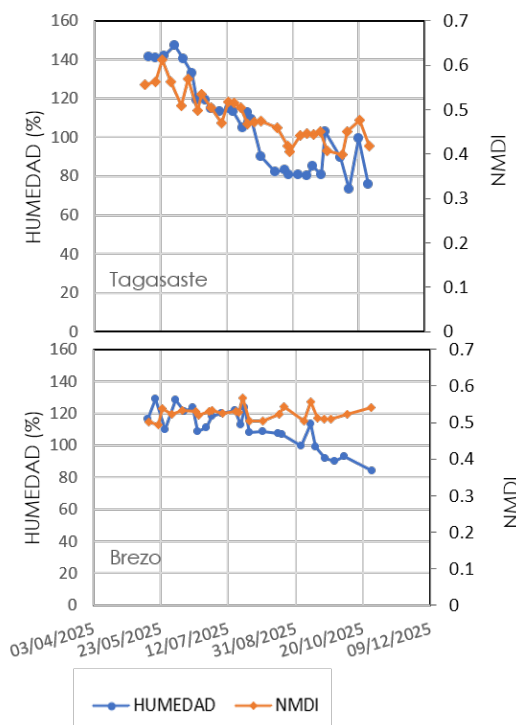
Concretamente, el tagasaste muestra un rango de variación de aproximadamente el 147% en su humedad,

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).

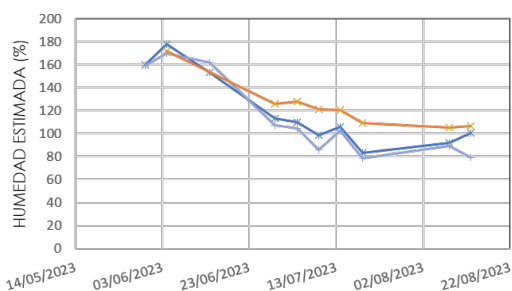
En brezo y pinar el rendimiento es limitado. En el caso del pinar, mejora al modelizarlos en conjunto, obteniendo  $R^2 = 0.44$  con LMM, pero siendo insuficiente para un uso operativo con los datos actuales.

**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 $mtry=10$ . $HCV = -33.66 + 184.06 * NMDI + 626.46 * TCARI + -57.79 * VARI$
Brezo	RLM	0.38; 10.16	$HCV = 51.088 + 139.274 * NDWI + 41.136 * Especie + u + \epsilon$
Pinar conjunto	LMM	0.44; 20.93	
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.