

## Análisis de la influencia de la especie en la estimación de la humedad de combustible vivo mediante índices espectrales derivados de imágenes Sentinel-2

María A. Arcos, Roberto Edo-Botella, Ángel Balaguer-Beser, Luis Á. Ruiz

Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n 46022-Valencia, España. maar12m@doctor.upv.es, roedbo@cgf.upv.es, abalague@mat.upv.es, laruiz@cgf.upv.es

**Resumen:** El análisis del comportamiento de la Humedad de Combustible Vivo (HCV) es de vital importancia debido a su estrecha relación con el contenido de agua de la vegetación y, por ende, con el grado de inflamabilidad de las especies frente a eventos como incendios forestales. En este trabajo se han analizado valores de HCV tomados en 11 parcelas distribuidas en los términos municipales de Buñol y Llombai, en la provincia de Valencia (España), durante el periodo comprendido entre junio 2020 y junio 2021, con el fin de estudiar la variabilidad de los valores de HCV de las especies mediterráneas presentes y su relación con índices espectrales extraídos de Sentinel-2, junto con otras variables meteorológicas como precipitación y temperatura. Estos parámetros han permitido obtener modelos de regresión lineal múltiple para la estimación de los valores de HCV, teniendo en cuenta la proporción y el número de especies forestales existentes en cada parcela. Para ello se han diferenciado parcelas con una alta proporción de *Pinus halepensis* (FCC>70%) frente a otras con predominio de especies de matorral, demostrando que la precisión de los modelos aumenta en este último grupo de parcelas en las cuales la variabilidad temporal de la HCV es mayor.

**Palabras clave:** humedad de combustible vivo, matorral, *Pinus halepensis*, índices espectrales, Sentinel-2.

### *Analysis of the influence of species on live fuel moisture estimation using spectral indices derived from Sentinel-2 images*

**Abstract:** The analysis of the behavior of live fuel moisture (LFM) is very important due to its close relationship with the water content of the vegetation and, therefore, with the level of flammability of the species against events such as forest fires. In this case, LFM values have been analyzed in 11 plots distributed in the municipalities of Buñol and Llombai, in the province of Valencia (Spain), during the period between June 2020 and June 2021. LFM variability in the Mediterranean species from the area and its relationship with spectral indices extracted from Sentinel-2, together with other meteorological variables such as precipitation and temperature, has been studied for this period of time. These parameters allowed to obtain multiple linear regression models for estimating LFM values, considering the proportion and number of existing forest species in each plot. To this end, plots with a high proportion of *Pinus halepensis* (FCC>70%) have been differentiated from others with a predominance of shrub species, demonstrating that the accuracy of the models increases in this last group of plots in which the temporal variability of HCV is greater.

**Keywords:** live fuel moisture, shrub, *Pinus halepensis*, spectral indices, Sentinel-2.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Humedad de Combustible Vivo (HCV) se calcula como el porcentaje de la masa de agua contenida en una especie vegetal respecto a su peso seco. Estudios anteriores demostraron que algunos índices espectrales junto a datos meteorológicos son una buena combinación para derivar modelos precisos para la estimación del contenido de HCV (Myoung et al., 2018). Los índices derivados de imágenes Sentinel-2 han permitido obtener modelos de estimación de HCV con una resolución espacial de 10 m o 20 m (Marino et al., 2018; Arcos et al., 2021; Costa-Saura et al., 2021). El objetivo de este trabajo es comparar las diferencias en los valores de HCV entre parcelas donde la especie dominante es *Pinus halepensis*, con otras en las cuales dominan las especies de matorral, en lugares de diferente altitud, y analizar la relación entre los valores de HCV en cada uno de estos grupos, con diferentes índices

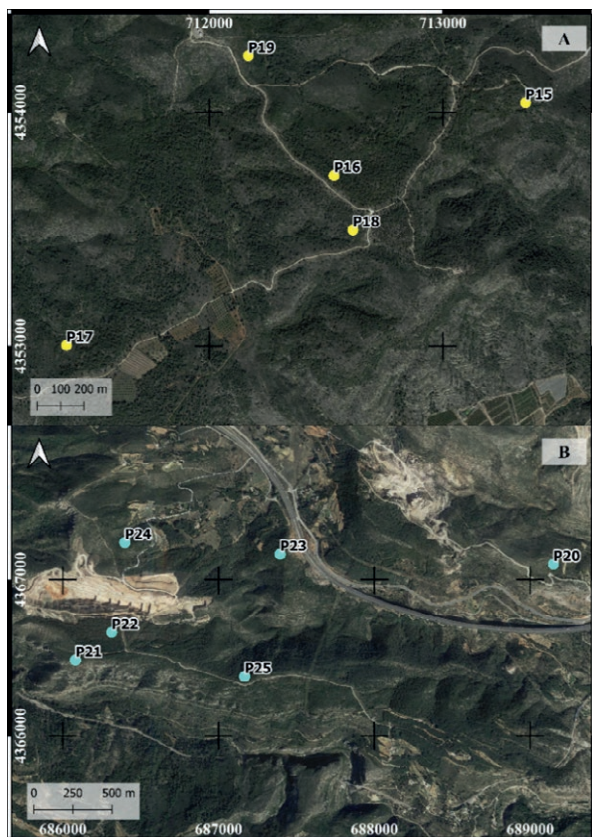
espectrales extraídos de imágenes Sentinel-2, junto con el promedio de la temperatura y la precipitación acumulada en los días previos a la toma de datos de HCV en campo.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Datos del área de estudio

Los datos de HCV usados en este trabajo forman parte de una base de información de la cual se han seleccionado 11 parcelas (desde P15 hasta P25), pertenecientes a los municipios de Llombai y Buñol en la provincia de Valencia (España), para analizar las diferencias en dos sitios con distintas características topográficas y tipos de vegetación. Se han tenido en cuenta los valores de Fracción de Cobertura (FCC) observados en campo de cada una de las especies muestreadas. En la Figura 1 se observa el área de estudio y la situación de las parcelas donde se tomaron las muestras de HCV de las diferentes especies

de estudio. Las mediciones del contenido de HCV se realizaron en un círculo de 30 m de radio alrededor del centro de cada parcela, con una frecuencia de 15 días (una por fecha), obteniendo un total de 26 observaciones de cada especie dominante por parcela durante todo el periodo de estudio (junio 2020 - junio 2021).



**Figura 1.** Parcelas forestales de estudio en los municipios de Llobai (A) y Buñol (B).

La Tabla 1 muestra las especies de matorral dominantes en cada parcela junto con la FCC de la especie *Pinus halepensis*, de la cual se tomaron muestras en las copas de los árboles. En algunas parcelas y fechas no se pudieron recoger muestras debido a las malas condiciones meteorológicas o a problemas en las vías, por lo que el número total de datos por especie en dichas parcelas fue inferior a 26. La pendiente de las parcelas P15, P17, P20 y P25 es fuerte, las parcelas P16, P18, P19, P21 y P24 tienen una pendiente moderada, y las parcelas P22 y P23 presentan una pendiente muy baja. La altitud y la orientación son también variables.

Para comparar el contenido de HCV de las diferentes parcelas de estudio, se consideró una diferenciación de parcelas en función de los valores de FCC de *Pinus halepensis* (Tabla 2), única especie presente en el estrato arbóreo de las parcelas, debido a que su mayor o menor presencia en la parcela puede afectar al desarrollo y comportamiento de las especies de sotobosque.

## 2.2. Metodología

Para la creación de modelos de estimación del HCV se emplearon dos tipos de variables independientes: meteorológicas y espectrales.

**Tabla 1.** Características de las parcelas. FCC representa la fracción de cabida cubierta de la especie *Pinus halepensis*.

P	Pendiente (°)	Orientación (°)	Altitud (m)	FCC	Esp. mat.	n
P15	19,7	suroeste	320	70	Qc, Ro, Em	21
P16	15,4	norte	293	80	Qc, Pl, Em	26
P17	16,6	oeste	233	7	Qc, Ro, Em, Jo	26
P18	10,6	suroeste	290	75	Qc, Ro, Em, Pl, Up	26
P19	12,7	noreste	265	15	Qc, Ro, Em	26
P20	24,4	este	548	20	Qc, Ro, Em, Jo, Up	25
P21	8,7	suroeste	679	0	Qc, Ro, Em, Jo, Up	25
P22	2,6	norte	682	70	Qc, Ro, Jo, Up	25
P23	2,4	norte	643	70	Qc, Ro, Em, Jo	25
P24	14,3	noroeste	678	10	Qc, Ro, Em, Jo	25
P25	23,9	norte	652	70	Qc, Ro, Em, Jo	23

P: Parcela, Esp. mat.: especies de matorral, Em: *Erica multiflora*, Jo: *Juniperus oxycedrus*, Pl: *Pistacia lentiscus*, Qc: *Quercus coccifera*, Ro: *Rosmarinus officinalis*, Up: *Ulex parviflorus*, n: número total de muestras recogidas en campo por parcela y por especie.

**Tabla 2.** Agrupación de las parcelas en función de la FCC de *Pinus halepensis*.

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Llobai FCC > 70%	Buñol FCC > 70%	Llobai FCC < 20%	Buñol FCC < 20%
P15	P22	P17	P20
P16	P23	P19	P21
P18	P25		P24

### 2.2.1 Variables meteorológicas

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) proporcionó los datos diarios de precipitación y temperatura, durante el periodo estudiado, en diferentes estaciones meteorológicas de la Comunitat Valenciana, los cuales fueron interpolados en el centro de las parcelas usando el procedimiento descrito en Costa-Saura et al. (2021). En dichas localizaciones se calcularon los promedios de temperatura ( $t_{60}$ , temperatura promedio en 60 días previos), y valores de precipitación acumulada ( $p_{60}$  y  $p_7$ , en los 60 y 7 días anteriores).

### 2.2.2 Variables espectrales

En el entorno *Google Earth Engine* 14 se calculó el índice de sequía multibanda normalizado (*Normalized Multi-band Drought Index*, NMDI) a partir de imágenes Sentinel-2, cuyos valores permiten conocer las variaciones de verdor y se relacionan con el contenido de agua de la hoja. NMDI<sub>30m</sub> hace referencia a que el índice NMDI está calculado como la media en píxeles de 30 m de resolución que contienen el centro de la parcela de estudio.

Se evaluó el comportamiento de la HCV en los 4 grupos de parcelas descritos en la Tabla 2 frente a las variables meteorológicas y espectrales. Para la definición de los modelos empíricos de predicción de HCV se emplearon, además del índice espectral NMDI, los siguientes: NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*), MCARI (*Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index*) y SLA (*Specific Leaf Area Vegetation Index*).

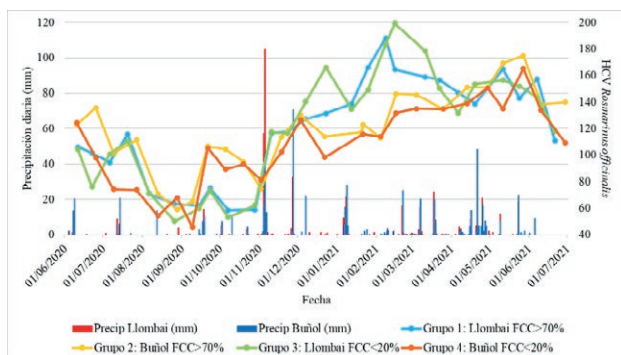


Se obtuvo un modelo de regresión lineal múltiple para cada grupo de parcelas descrito en la Tabla 2, permitiendo que los modelos tuvieran distinto número de variables explicativas estadísticamente significativas. Por este motivo, para comparar la precisión de los modelos en los distintos grupos se usó la  $R^2$  ajustada por los grados de libertad, la cual tiene en cuenta el número de datos y variables para indicar el porcentaje de variación de la HCV explicado por el conjunto de variables independientes elegidas en cada modelo.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Comportamiento de HCV y relación con la precipitación

Se observaron distintos comportamientos de la HCV dependiendo de la zona y el porcentaje en el que se encuentra la especie *Pinus halepensis* (Figura 2). En general, en junio 2020 los valores de HCV comenzaron siendo altos pues las precipitaciones fueron elevadas en la primavera anterior. El verano fue más seco de lo normal, por lo que los valores de humedad descendieron hasta noviembre de 2020, cuando se presentaron nuevamente eventos importantes de precipitación como el del 05/11/2020. En ella se puede observar que la HCV de *Rosmarinus officinalis* en las parcelas de Llombai fue baja en septiembre y octubre, creciendo desde diciembre hasta marzo. En Buñol, la media de HCV en las parcelas con FCC<20 de *Pinus halepensis* presentó valores menores que la media en parcelas con FCC>70.

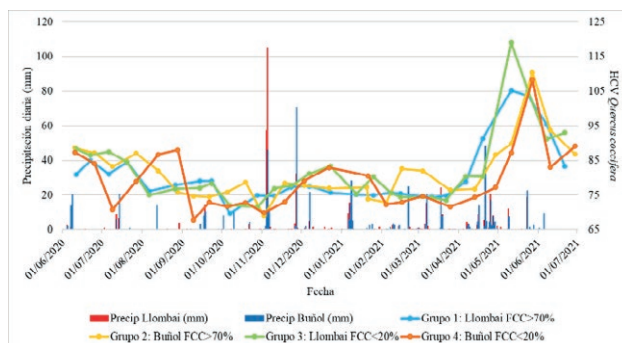


**Figura 2.** Promedio de HCV de *Rosmarinus officinalis* en los grupos de la Tabla 2 y media de valores de precipitación diaria en los municipios de Llombai y Buñol.

En cuanto a *Quercus coccifera* (Figura 3), varía muy poco durante todo el año salvo en mayo y junio de 2021, lo cual puede deberse a los eventos de precipitación presentados a finales de mayo e inicio de junio.

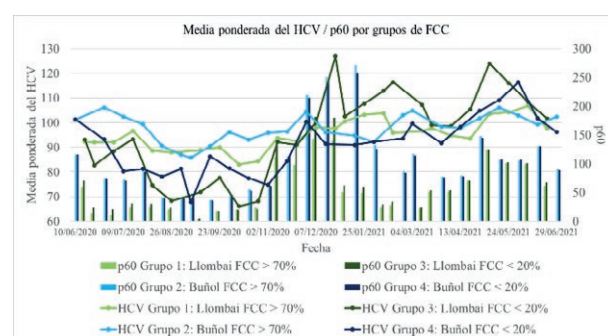
En la especie *Rosmarinus officinalis*, los picos de HCV ocurrieron a los pocos días de las precipitaciones y se mantuvieron altos desde enero a junio, principalmente en las parcelas de Buñol. Dicho periodo coincidió con los meses más lluviosos. En el caso de *Quercus coccifera*, en las parcelas de Buñol se observó que el contenido de HCV se incrementó de forma inmediata tras las precipitaciones, pero de forma más lenta.

Al evaluar la precipitación acumulada en los 60 días anteriores a la toma de HCV en campo (p60), se observó



**Figura 3.** Promedio de HCV de *Quercus coccifera* en los grupos de la Tabla 2 y valores de precipitación.

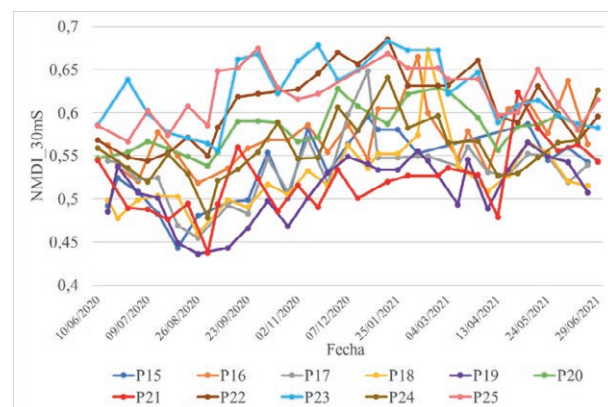
que guardan relación con los valores de la media ponderada de HCV, teniendo en cuenta todas las especies forestales presentes en cada parcela (Figura 4).



**Figura 4.** Variación de la media ponderada de HCV, calculada usando la FCC de cada especie, con respecto a la variable p60 durante el periodo de estudio. Las curvas muestran los promedios de los valores de HCV en cada grupo y las barras los promedios de p60 en dichos grupos.

#### 3.2. Relación entre HCV ponderada y NMDI

La relación entre la HCV y el índice NDMI\_30mS varía dependiendo de las características de la parcela. La Figura 5 muestra la variación temporal de los valores de NDMI\_30mS en todas las parcelas de estudio. Las parcelas del grupo 2 son las que tienen valores de NDMI\_30mS más



**Figura 5.** Variación del índice NDMI\_30mS durante el periodo de estudio en todas las parcelas.

altos, especialmente en verano de 2020, comportamiento coincidente con los valores de la media ponderada de HCV de ese grupo en la Figura 4. En cambio, los valores más bajos se dan en el grupo 3. La mayor correlación entre los valores de HCV y el índice NMDI\_30mS se alcanza en las parcelas del grupo 3 y la más baja en las parcelas del grupo 2. En las dos parcelas del grupo 3, el coeficiente de correlación entre la media ponderada de HCV y NMDI\_30mS es superior a 0,7.

### 3.3. Modelo empírico de predicción de HCV

Se obtuvieron modelos con un número de variables (espectrales y meteorológicas) entre 2 y 4 para predecir la media ponderada de HCV en cada sitio, alcanzando como R<sup>2</sup> ajustada más alta la correspondiente al grupo 3, con un 72,9% con 4 variables (Tabla 3). Sin embargo, el grupo 2 presentó una R<sup>2</sup> ajustada por debajo del 30% (empleando tanto dos como tres variables). El ajuste es más modesto a medida que aumenta la proporción de especies de arbolado en las parcelas y estas se encuentran a mayor altitud. En este caso, los valores observados de HCV sufren menos cambios a nivel temporal que los predichos usando variables espectrales y meteorológicas. Como se observa en la Tabla 3, las variables espectrales que forman parte de los modelos son: NMDI\_30mS, NDMI\_30mS, MCARI\_30mS y SLA\_30mS (descritas anteriormente) y las de carácter meteorológico: t60, p60 y p7.

**Tabla 3.** Modelos de predicción de HCV.

Grupo	Modelo	R <sup>2</sup> ajustada	Nro. Variab.
3	$HCV = 51 - 137,4 \cdot NDMI_{30mS} + 194,6 \cdot NMDI_{30mS} + 0,08 \cdot p60 - 2,5 \cdot t60$	72,9	4
4	$HCV = 90,4 + 956,1 \cdot MCARI_{30mS} + 0,1 \cdot p7 - 1,7 \cdot t60$	54,1	3
1	$HCV = 121,6 - 9,6 \cdot SLA_{30mS} + 0,04 \cdot p60 - 0,9 \cdot t60$	45,5	3
2	$HCV = 123,8 - 43,6 \cdot NDMI_{30mS} - 0,8 \cdot t60$	25,4	2

## 4. CONCLUSIONES

En las parcelas donde hay una FCC >70% de estrato arbóreo de *Pinus halepensis*, se observó que esta especie tiene efecto dominante sobre el resto (matorral), reduciendo las variaciones de la humedad tras las precipitaciones. La cantidad de precipitación en un sólo día influye menos en la variación de HCV que el volumen de precipitación acumulado o el promedio de la temperatura en días previos.

Se evidenció la relación entre la media ponderada de la HCV y NMDI en las parcelas donde hay baja presencia de *Pinus halepensis*. Cuando la FCC de dicha especie es superior al 70%, la relación suele ser más baja. En Llombai se observó una mayor relación de la HCV con la información espectral, mientras que en Buñol está mejor definida por las características meteorológicas.

Las variables espectrales son capaces de representar los cambios de HCV a nivel espacial y temporal (incluso en parcelas situadas en zonas próximas) pero para mejorar

el ajuste es conveniente usar la información proporcionada por la precipitación y temperatura.

## 5. AGRADECIMIENTOS

M<sup>a</sup> Alicia Arcos agradece la ayuda recibida por la Universitat Politècnica de València mediante un contrato predoctoral financiado en la convocatoria, PAID-01-19, subprograma 1. Roberto Edo agradece a la Generalitat Valenciana y al Fondo Social Europeo la ayuda EDGJID/2021/122 recibida en el marco del Sistema Nacional de Garantía Juvenil. Este trabajo ha sido financiado a través de un convenio de colaboración entre la empresa Red Eléctrica de España S.A.U. y la Universitat Politècnica de València (2020-2023). Los autores agradecen a la Empresa Pública VAERSA y a la Direcció General de Prevenció d'Incendis Forestals de la Generalitat Valenciana por proporcionar los datos de medición de HCV en campo y los datos meteorológicos a través de la AEMET.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Arcos, M., Balaguer-Beser, Á., Ruiz, L.A. 2021. Modelos empíricos de predicción del contenido de humedad del combustible vivo mediante índices espectrales de Sentinel-2 y datos meteorológicos. En *Observación de la Tierra, Cartografía y Aplicaciones medioambientales. III Congreso en Ingeniería Geomática*, pp. 239-247, Valencia, España.
- Costa-Saura, J.M., Balaguer-Beser, Á., Ruiz, L.A., Pardo-Pascual, J.E., Soriano-Sancho, J.L. 2021. Empirical Models for Spatio-Temporal Live Fuel Moisture Content Estimation in Mixed Mediterranean Vegetation Areas Using Sentinel-2 Indices and Meteorological Data. *Remote Sensing*, 13(18), 3726.
- Marino, E., Guillén-Climent, M., Algeet, N., Tomé, J.L., Hernando, C. 2018. Estimation of live fuel moisture content of shrubland using MODIS and Sentinel-2 Images. In *Advances in Forest Fire Research 2018. VIII International Conference on Forest Fire Research*, pp. 218-226. Ed. by D. X. Viegas. Coimbra, Portugal.
- Myoung, B., Kim, S.H., Nghiem, S.V., Jia, S., Whitney, K., Kafatos, M.C. 2018. Estimating Live Fuel Moisture from MODIS Satellite Data for Wildfire Danger Assessment in Southern California USA. *Remote Sensing*, 10(1), 87.