

## Influencia de la fracción de cabida cubierta de las especies forestales en la estimación del contenido de humedad de combustible vivo usando técnicas de teledetección

María A. Arcos, 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, abalague@mat.upv.es, laruiz@cgf.upv.es

**Resumen:** La humedad del combustible vivo (HCV) es un factor muy importante para definir modelos de predicción de incendios, debido a que el contenido de agua de la vegetación afecta a su inflamabilidad y al comportamiento del fuego. En este trabajo se han calculado modelos de predicción de los valores de la media ponderada de HCV, calculada en campo considerando los pesos definidos por la fracción de cabida cubierta (FCC) de las especies presentes en cinco parcelas de bosques mediterráneos, ubicadas en la provincia de Valencia (España), con muestras tomadas quincenalmente entre los meses desde junio 2020 hasta mayo 2021. Se han aplicado modelos de regresión lineal múltiple usando como variables predictoras diferentes índices espectrales calculados con datos de los satélites Sentinel-2 junto a datos meteorológicos obtenidos de los observatorios de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de España. Los modelos de regresión en cada parcela individual han alcanzado una R-cuadrado ajustada entre 51,9% y 69,2%. Al considerar la variación espacio-temporal con todas las parcelas juntas, la R-cuadrado ajustada ha sido igual a 50,8%, con dos variables espectrales y dos índices meteorológicos.

**Palabras clave:** humedad de combustible vivo, bosques mediterráneos, Sentinel-2, índices espectrales, fracción de cabida cubierta (FCC).

### *Influence of the canopy cover by forest species on live fuel moisture content estimation using remote sensing techniques*

**Abstract:** Live fuel moisture (LFM) is a very important factor in defining fire prediction models because the water content of vegetation affects its flammability and fire behavior. In this work, prediction models have been calculated for the values of the weighted mean of HCV, calculated in the field considering the weights defined by the fraction of canopy cover (FCC) of the species present in five plots of Mediterranean forests, located in the province of Valencia (Spain), with samples taken fortnightly between the months of June 2020 and May 2021. Multiple linear regression models have been applied using different spectral indices as predictor variables calculated with data from the Sentinel-2 satellites together with meteorological data obtained from the observatories of the State Meteorological Agency (AEMET) of Spain. Regression models on each individual plot have achieved an adjusted R-squared between 51.9% and 69.2%. When considering the spatio-temporal variation with all the plots together, the adjusted R-squared was equal to 50.8%, with two spectral variables and two meteorological indices.

**Keywords:** live fuel moisture, Mediterranean forests, Sentinel-2, spectral indices, canopy cover.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la predicción del contenido de la Humedad de Combustible Vivo (HCV) de la vegetación intervienen variables morfológicas, espectrales y meteorológicas, entre otras (Yebra et al., 2013). La información espectral se ha utilizado con éxito en la estimación del contenido de HCV mediante índices de vegetación provenientes de imágenes satelitales de distintos sensores como MODIS (Myoung et al., 2018) o Sentinel-2 (Marino et al., 2020), entre otros. De forma adicional, considerar información sobre las características propias de la zona de estudio, así como de la vegetación (Jia et al., 2018), junto a algunos índices extraídos de datos meteorológicos puede mejorar la capacidad predictiva de los modelos (Costa-Saura et al., 2021). En Arcos et al. (2021), se describieron modelos

empíricos de predicción del contenido de HCV para la especie *Rosmarinus officinalis* usando datos espectrales obtenidos de Sentinel-2, junto con valores puntuales de precipitación acumulada y promedios de temperatura. El objetivo de este trabajo es extender dicha metodología para obtener modelos de predicción de la media ponderada de los valores de la HCV, entendiendo que la misma se calcula usando como pesos los valores de la Fracción de Cabida Cubierta (FCC) de las especies forestales predominantes en cada localización. En concreto, se busca analizar la influencia de las FCC en la bondad de los modelos obtenidos, tomando en cuenta dos ventanas de trabajo (10 m y 30 m) y dos escenarios distintos: análisis por parcela y por conjunto de parcelas.

## 2. DATOS Y ÁREA DE ESTUDIO

En la Figura 1, se ilustra la ubicación de las cinco parcelas (P34, P35, P38, P39 y P42) donde se muestrearon diferentes especies de las que se midieron los valores de HCV para ser analizados en el presente estudio. Las parcelas seleccionadas para este trabajo se ubican en los municipios de Barx, Quatretonda y Pinet, en la provincia de Valencia (España), y forman parte de una campaña de muestreo más amplia. Se tomaron las muestras de campo considerando parcelas circulares de 30 m de radio, cuyas especies de estudio se pesaron en húmedo y en seco para obtener mediante esta diferencia los valores de HCV(%). La periodicidad de la toma de muestras en cada parcela fue de 15 días (una muestra por especie y por fecha), obteniendo un total de 22 o 23 mediciones por parcela y por especie (ver Tabla 1) durante todo el periodo de estudio (junio 2020-mayo 2021). Se calculó posteriormente un único valor de HCV por parcela y fecha definido como la media ponderada de los valores de HCV de todas las especies presentes en la misma, usando como pesos las FCC que aparecen en la Tabla 2. Dichas FCC fueron definidas mediante visitas de campo por parte del personal encargado de recoger las muestras.



**Figura 1.** Localización de las parcelas de estudio con una ampliación en la zona marcada en amarillo.

Las parcelas en estudio se encuentran a una elevación entre 523 y 574 msnm. Su pendiente es fuerte en unos casos (P35, P38, P39 y P42) y moderada en otros (P34), con orientaciones variadas (Tabla 1).

## 3. METODOLOGÍA

En este trabajo se proponen modelos de regresión lineal múltiple para explicar el contenido de HCV que sean capaces de contemplar los cambios espacio-temporales de la zona de estudio. Se consideraron para estos modelos variables espectrales y meteorológicas.

**Tabla 1.** Características de las parcelas: *n* es el número total de muestras recogidas en campo por parcela y por especie.

Punto	Altitud (m)	Pendiente (°)	Orientación	n
P34	566	8,5	Sur	22
P35	574	22,5	Este	22
P38	523	15,5	Norte	23
P39	540	23,9	Norte	23
P42	537	17,1	Sur	23

**Tabla 2.** Fracción de cabida cubierta de las especies por parcela.

Especie	Fracción de Cabida Cubierta (FCC)				
	P34	P35	P38	P39	P42
<i>Cistus ladanifer</i>	20	5			
<i>Erica multiflora</i>		10		10	
<i>Pinus halepensis</i>			30		60
<i>Pinus pinaster</i>					40
<i>Pistacia lentiscus</i>			20	10	10
<i>Quercus coccifera</i>	30	60		30	70
<i>Quercus ilex</i>	20	20	30	50	
<i>Rosmarinus officinalis</i>		30	5		5
<i>Ulex parviflorus</i>	30			5	
Total	100	125	85	105	185

### 3.1. Obtención de variables explicativas

#### 3.1.1. Índices Espectrales

Se trabajó con los índices de vegetación derivados de Sentinel-2, obtenidos en el entorno de *Google Earth Engine* 14 empleando dos ventanas de trabajo, 10 m o 30 m. Dada la resolución espacial de Sentinel 2, se trabajó con cada índice a la máxima resolución posible, remuestreando a 10 m las bandas con resolución de 20 m. Se consideraron los siguientes índices: *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Enhanced Vegetation Index* (EVI), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), *Normalized Difference Water Index* (NDWI), *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI), *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI), *Normalized Multi-band Drought Index* (NMDI), *Ratio Vegetation Index* (RVI), *Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index* (TCARI) y *Optimized Soil Adjusted Vegetation Index* (OSAVI). Estas variables espectrales se eligieron en base a los resultados obtenidos en anteriores estudios sobre modelos empíricos de predicción de HCV (Costa-Saura et al., 2021; Arcos et al., 2021).

#### 3.1.2. Variables meteorológicas

Los datos meteorológicos fueron facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET). Las variables que se emplearon para modelar la HCV fueron: datos diarios de precipitación, temperatura media, velocidad del viento y evapotranspiración, provenientes de tres estaciones meteorológicas del municipio de Barx. Los valores fueron interpolados en cada una de las ubicaciones al tamaño del píxel de Sentinel-2 usando el procedimiento descrito en Costa-Saura et al. (2021). Además, los valores diarios meteorológicos interpolados se usaron para calcular: p30 y p60 (precipitación acumulada en los 30 y 60 días

precedentes), t30 y t60 (promedio de las temperaturas medias diarias en los 30 y 60 días previos), w7 (promedio de la velocidad del viento en las rachas máximas de los 7 días anteriores), pet7 y pet15 (promedio de la evapotranspiración potencial en 7 y 15 días previos).

### 3.2. Análisis de varianza (ANOVA)

Mediante un estudio de ANOVA simple se analizaron las diferencias y similitudes de los valores de HCV entre las distintas parcelas de estudio, usando un intervalo alrededor de las medias calculado con el procedimiento LSD de Fisher.

### 3.3. Regresión lineal múltiple

En la construcción de modelos intervinieron variables explicativas espectrales y meteorológicas. La selección de variables se hizo con el procedimiento “paso a paso hacia adelante”.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análisis de datos de campo

En la Figura 2 se observa el comportamiento de la HCV de cada una de las especies de las parcelas de estudio durante el periodo comprendido entre junio 2020 hasta mayo 2021.

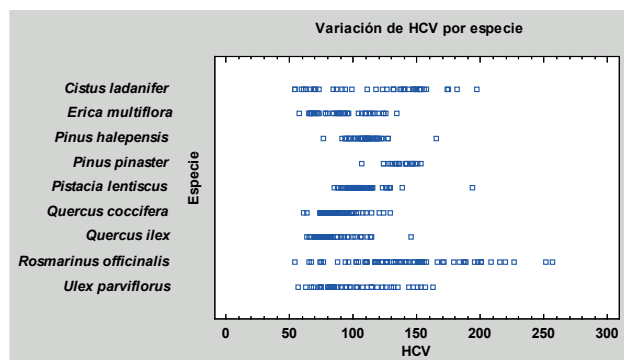


Figura 2. Variación de la HCV por especie en el periodo de junio 2020 a mayo 2021.

Dentro de las especies con mayor variabilidad de HCV destacan *Rosmarinus officinalis* y *Cistus ladanifer*. El caso de *Rosmarinus officinalis* se observó también en un estudio anterior realizado por Costa-Saura et al. (2021). Por otro lado, la especie que muestra menor variación de HCV es *Pinus pinaster*, su media es mayor que la de otras especies como *Quercus coccifera* o *Quercus ilex*.

En cuanto a la Figura 3, se puede observar la variación temporal de los valores de la media ponderada de HCV (69-137) en cada una de las parcelas durante todo el tiempo de estudio. Los valores con menor variación temporal se observan en la parcela P42, mientras que los cambios mayores se hacen evidentes en la P34 y P35 (valores bajos en verano y altos en primavera). La presencia de las especies con mayor variabilidad de HCV es el factor que permite que las curvas muestren un marcado carácter estacional a lo largo del periodo de estudio.

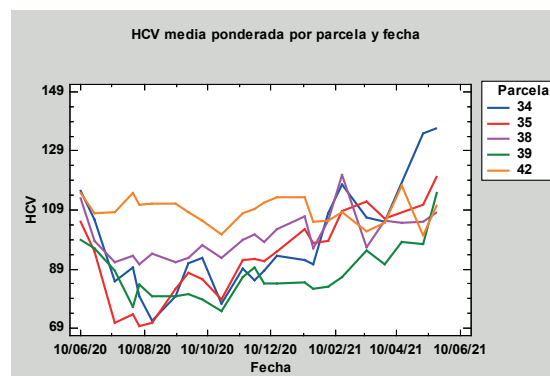


Figura 3. Media ponderada de HCV en todas las especies de cada parcela por fecha.

En la P35, que contiene *Rosmarinus officinalis* (con alta variación) existe también *Quercus coccifera* (FCC: 60) que toma valores menos altos y con menor variación, lo que hace que la media ponderada baje. Este comportamiento también se observa en las parcelas con una importante presencia de la especie *Quercus ilex*.

### 4.2. ANOVA Simple

En la Figura 4 se observa que los intervalos LSD de Fisher para el promedio de las medias ponderadas de HCV en las parcelas 34, 35 y 38 están parcialmente solapados y los promedios no son significativamente distintos. Sin embargo, al analizar todas las parcelas a la vez sí se encontraron diferencias entre la parcela 42 y el resto, debido a la mayor presencia de especies de arbolado distintas de *Quercus ilex*.

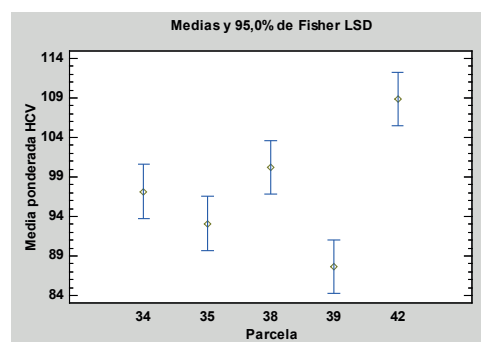


Figura 4. Gráfica de medias de HCV por parcela.

### 4.3. Regresión Múltiple

Se construyeron modelos de regresión lineal múltiple para cada parcela por separado y también uno de forma conjunta usando dos ventanas, de 10 m y 30 m, para el cálculo de los índices espectrales. La Tabla 3 muestra los modelos de predicción para la ventana de 30 m, los cuales usan entre 2 y 4 variables (espectrales y meteorológicas), obteniendo la  $R^2$  ajustada más alta para la parcela 39, con un 69,2% y dos variables explicativas (TCARI\_30mS y t30). El valor de la  $R^2$  ajustada más baja se obtuvo en la parcela 34, con ventana de 10 m, con valor de 45,8% y las variables TCARI\_10mS, t30 y w7, es decir, 1 espectral y 2 meteorológicas (temperatura y humedad). En el modelo

de 30 m, este valor de  $R^2$  ajustada asciende a 53,6%, con esas mismas variables predictoras (Tabla 3).

**Tabla 3.** Modelos de predicción con ventana de 30 m.

P	Modelo 30 m	$R^2$	Nro. Variab.
P34	$HCV = 53,7 + 597,3*TCARI_{30mS} - 1,8*t30 + 3,3*w7$	53,6	4
P35	$HCV = 111,9 + 468,3*TCARI_{30mS} - 0,1*p30 - 2,9*t30$	68,5	3
P38	$HCV = 28,9 - 328,7*TCARI_{30mS} - 6,1*RVI_{30mS} + 248*OSAVI_{30mS} + 0,1*p60$	58,1	4
P39	$HCV = 84,6 + 351,9*TCARI_{30mS} - 1,2*t30$	69,2	2
P42	$HCV = 132,2 - 48,4*NMDI_{30mS} + 0,03*p60 - 4,7*pet7 + 5,4*pet15$	51,9	4
T	$HCV = 83,8 + 74*NMDI_{30mS} + 374,9*TCARI_{30mS} - 0,05*p30 - 1,5*t60$	50,8	4

\*P: Parcela, \*T: Todas las parcelas, \*La  $R^2$  es la ajustada.

En los modelos de todas las parcelas intervinieron tanto variables espectrales como meteorológicas y se pudo notar que en la mayoría de los casos estaban presentes TCARI y NMDI, índices que contienen información sobre la reflectancia del verde y se relacionan con la humedad de la vegetación. En cuanto a las variables meteorológicas, p60 y t30 se encuentran en la mayoría de los modelos, aunque en la parcela 42 también se usa la evapotranspiración potencial. Por su parte, en la parcela 34 interviene el promedio de la velocidad de viento (w7).

Por otro lado, cuando el análisis se hizo considerando todas las parcelas en su conjunto, los valores de  $R^2$  ajustada que se alcanzaron fueron: 49,6% (10 m) y 50,8% (30 m), usando las variables TCARI, NDMI, p30 y t60.

## 5. CONCLUSIONES

Los valores de la  $R^2$  ajustada para los modelos que usan variables espectrales calculadas en una ventana de 30 m son similares a los que usan un solo píxel de Sentinel-2 (10 m) y, por tanto, se podría trabajar con ambos tamaños de ventana. Los modelos de HCV mejoran al considerar la composición de especies en cada parcela, disminuyendo los valores de  $R^2$  ajustada cuando se consideran todas las parcelas juntas debido a las marcadas diferencias que hay entre proporciones de especies entre unas parcelas y otras, así como entre los tipos de estrato presentes (e.g., ver parcelas 34 y 42 en Tabla 2). De acuerdo con la proporción de las especies en cada una de las parcelas de estudio, las que presentaron un modelo de estimación de HCV más preciso fueron las que tenían una gran proporción en *Quercus coccifera* o *Quercus ilex*, junto con otras especies de matorral (P35 y P39).

En cuanto a las variables de tipo meteorológico, se verifica cómo la precipitación y la temperatura aportan información relevante a los modelos a nivel temporal, y en menor medida a nivel espacial, dado que, al estar las parcelas muy próximas entre sí, la variabilidad de las variables meteorológicas entre las parcelas es pequeña.

## 6. AGRADECIMIENTOS

M<sup>a</sup> Alicia Arcos agradece la ayuda recibida por la Universitat Politècnica de València mediante contrato predoctoral financiado en la convocatoria, PAID-01-19, subprograma 1. 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 de AEMET.

## 7. 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. Tercer 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. 1(18), 3726.
- 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), 2251.
- 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.
- Jia, S., Kim, S.H., Nghiem, S.V., Cho, W., Kafatos, M.C. 2018. Estimating Live Fuel Moisture in Southern California Using Remote Sensing Vegetation Water Content Proxies. En *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 5887-5890, Valencia, Spain.
- Yebra, M., Dennison, P.E., Chuvieco, E., Riaño, D., Zylstra, P., Hunt Jr, E.R., Danson, F.M., Qi, Y., 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.