

ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE VIVO USANDO IMÁGENES SENTINEL-2 EN PARCELAS FORESTALES DE LA COMUNIDAD VALENCIANA.

ESTIMATION OF THE LIVE FUEL MOISTURE USING SENTINEL-2 IMAGES IN FOREST PLOTS OF THE VALENCIAN COMMUNITY.

Karla Gabriela Freire Quintanilla

E.T.S.I. Geodésica, Cartográfica y Topográfica Universitat Politècnica de València, Camí de Vera, s/n, 46022 València, España, karlit_178@hotmail.com

Recibido: 26 de septiembre de 2019

/Aceptado: 06 de marzo de 2020

RESUMEN

El contenido de agua que tiene la vegetación es un parámetro crítico que afecta la inflamabilidad de la vegetación y el comportamiento del fuego. Dicho parámetro se conoce como humedad del combustible vivo (HCV) y su valor depende de la especie forestal que se esté analizando. Se necesitan estimaciones actualizadas de HCV en las distintas especies forestales para la evaluación del riesgo de incendios forestales. Además, se tiene que estimar la proporción que las especies forestales guardan en cada parcela de muestreo. Sin embargo, el monitoreo detallado y constante de HCV en el campo es costoso y consume mucho tiempo. En el presente trabajo se ha construido un nuevo método de estimación temporal de los valores de HCV en diferentes parcelas forestales de la Comunidad Valenciana. Para ello se utilizaron técnicas de regresión múltiple, usando como predictores diferentes índices de vegetación obtenidos desde enero de 2016 a través de imágenes del satélite Sentinel-2, en un conjunto de píxeles tomados en cada parcela forestal. Dichas parcelas están repartidas por las tres provincias de la Comunidad Valenciana, en las cuales se cuenta con datos mensuales de HCV para las diferentes especies forestales, teniendo en cuenta la proporción que guardan las mismas en la parcela forestal. Los datos de HCV han sido proporcionados por la Dirección de Prevención de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana a través de la empresa pública VAERSA. Para mejorar la precisión de los modelos de regresión de HCV en cada parcela, calculados a partir de los índices de vegetación, se incluyeron variables meteorológicas, extraídas para diferentes periodos de tiempo. Se calculó la estimación del valor de HCV en cada parcela en otros valores de tiempo no usados en la muestra de entrenamiento del modelo de regresión, analizando la capacidad predictiva de los modelos en cada parcela forestal.

Palabras clave: Humedad del combustible vivo; regresión múltiple; Sentinel-2, parcelas forestales; Comunidad Valenciana.

ABSTRACT

The water content in the vegetation is a critical parameter that affects the inflammability of the vegetation as well as its fire behaviour. This parameter is known as live fuel moisture (LFM) and its value depends on the analysed forest species. In order to evaluate the risk of forest fires, updated estimations of LFM are required. Moreover, it is necessary to estimate the proportion that forest species have in each sampling plot. However, detailed and constant monitoring are time and cost intensive. The current research generated a new method, which estimates temporal values of the LFM in various plots,

being located in the Valencian community. Accordingly, multiple regression techniques have been used. The predictors comprise various vegetation indexes, which were generated through the analysis of satellite imagery of each plot obtained by the Sentinel-2 satellite since 2016. These parcels are distributed across three provinces of the Valencian community, in which there have been monthly data of the LFM of the forest species, considering their proportion in the forest parcel. The LFM data have been obtained from the “Dirección de Prevención de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana” through the public enterprise VAERSA. In order to improve the precision of the LFM regression models in each parcel, which were calculated through vegetation indexes, the use of meteorological variables obtained at different time periods was tested. Additionally, the analysis of the predictive capacity of the models in each forest parcel has been achieved by generating the LFM values for each parcel at times different from those employed to build the models.

Keywords: Live fuel moisture; multiple regression, Sentinel-2, forest parcels, Valencian Community.

1. INTRODUCCIÓN

La humedad del combustible vivo es una medida del contenido de agua de la vegetación viva, es un fuerte determinante de la ignición del fuego, la velocidad de propagación y la intensidad (Peterson et al., 2008). Si bien el contenido de humedad de la vegetación muerta puede obtenerse con bastante facilidad a partir de modelos dependientes del clima, ya que los combustibles muertos dependen de la variabilidad atmosférica, estimar el contenido de humedad de la vegetación viva es más complicado porque depende de las propiedades fisiológicas que pueden variar entre las diferentes especies de plantas. Para cuantificar el contenido de humedad de la vegetación viva, la humedad del combustible vivo se define como la relación porcentual de la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco de una muestra de vegetación (Boksoon et al., 2018).

Estudios previos ha determinado metodología para la obtención de la humedad de combustible vivo, por ejemplo el estudio realizado en el trabajo de fin de master denominado “Análisis de la Humedad del Combustible Vivo (HCV) en la Comunitat Valenciana y la influencia de las variables meteorológicas” (Soriano Sancho & Quilez-Moraga, 2017), obteniendo el peligro de incendios forestales según la clasificación de niveles de HCV, bajo: mayor que 120%, moderado: entre 80% y 120%, alto: entre 60% y 80%, y crítico; menor del 60%. La mayor parte de especies en la Comunidad Valenciana presentan valores de humedad que se establecen entre 75-100% un umbral que está por debajo de los incendios más devastadores, aunque este valor depende de la época del año que se considere y también puede variar de un año a otro.

En la actualidad, la cobertura espacial y el muestreo temporal de los datos de HCV están muy limitados ya que el trabajo de campo para las mediciones de HCV requieren mucho esfuerzo. La humedad de combustible vivo se mide de manera manual semanalmente, quincenalmente o mensualmente en un número limitado de sitios de muestreo. Por ejemplo, la Dirección de Prevención de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana a través de la empresa pública VAERSA generalmente toma muestras de HCV en 18 sitios de la Comunidad Valenciana una vez al mes y en diferentes especies forestales, dejando vacíos de datos en áreas donde el clima y las variaciones geofísicas pueden afectar sustancialmente la HCV.

Un posible enfoque para superar las limitaciones espaciales y temporales de las mediciones manuales de HCV es utilizar índices de vegetación (IVeg) derivados de datos satelitales. Estudios previos demuestran la capacidad de los datos de sensores remotos para la estimación de HCV (Boksoon et al., 2018). Según el tipo de sensor utilizado, se encuentran disponibles diferentes resoluciones espectrales, espaciales y temporales. MODIS es uno de los

sensores ópticos más utilizados debido a su alta resolución temporal, proporcionando información espectral en una resolución espacial aproximada lo que limita su uso en áreas de muestreo a pequeña escala o con vegetación muy heterogénea. Otros autores evaluaron el potencial de los sensores remotos por microondas como una alternativa para la estimación de HCV (Marino et al., 2018). Aun se necesita más investigación para proporcionar modelos operacionales y herramientas para la predicción precisa de HCV.

La nueva generación de sensores SENTINEL-2 proporcionan información espectral con una resolución espacial alta, este satélite transporta un solo instrumento multiespectral (MSI) con 13 canales espectrales. La resolución varía entre 10 y 60 m. Las bandas visible y de infrarrojo cercano (NIR) tienen 10 m de resolución, las bandas de borde rojo de vegetación y las bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR) tienen 20 m de resolución, y el resto de las bandas tienen una resolución de 60 m (Agency, 2015), lo que ofrece la oportunidad de mejorar las estimaciones de HCV para fines operativos, pero solo se ha probado su aplicación en unos pocos trabajos (Marino et al., 2018).

Físicamente, los HCV dependen de índices meteorológicos, la humedad del suelo, la evapotranspiración y la fisiología de las plantas (Soriano Sancho & Quilez-Moraga, 2017). Sin embargo, los IVeg recuperados de las mediciones de sensores remotos satelitales están relacionadas con el verdor de la superficie y la biomasa de la vegetación representada por el índice de área de la hoja verde (LAI), que se ven afectadas y por lo tanto correlacionan con el HCV. Los IVeg y HCV son variables interdependientes con tendencias interanuales similares, lo que insinúa una posible estimación de HCV a partir de IVeg (Argañaraz et al., 2016).

No obstante, también existen diferencias entre ellos, el crecimiento de las plantas requiere no solo de la humedad, sino también de la temperatura y precipitación y estos índices meteorológicos también pueden variar durante el desarrollo de las diferentes especies de plantas. Por tanto, para recuperar la HCV de los datos de IVeg, es necesario realizar una investigación cuidadosa de las características de IVeg utilizando en conjunto los datos de mediciones in situ y satelitales.

El objetivo de este trabajo es valorar la capacidad del satélite Sentinel-2, para la estimación de HCV mediante estudios de modelos de regresión. La investigación se centra en diferentes especies forestales representativas del matorral y arbóreo que se encuentran comúnmente en áreas mediterráneas propensas a incendios, y han sido identificadas como especies indicadoras para la evaluación del riesgo de incendios forestales. Cada especie forestal cuenta con su valor de HCV por lo que es necesario calcular la media ponderada de humedad de combustible vivo de las especies que se encuentran un área específica por medio de diferentes criterios que se tomaran en cuenta a lo largo del presente trabajo.

2. LOCALIZACION DEL ESTUDIO

El presente estudio se realiza en la Comunidad Valenciana, situada en el este de la península Ibérica, cuenta con una superficie de 2.325.500 ha, según el Instituto Cartográfico Valenciano, esta zona cuenta con una superficie forestal de 1.319.517 ha, lo que supone el 57% del territorio total. Esta superficie cuenta con una clasificación de cobertura vegetal definidos por el Plan de Acción Territorial Forestal de la Comunidad Valenciana (PATFOR, 2011), son 23 los ecosistemas forestales (Imagen 1), 10 de los ecosistemas pertenecen a arbolado, 12 a no arbolados y uno a mixto. De los ecosistemas destaca los pinares de *Pinus halepensis* perteneciente al arbolado y la garriga que es una especie arbustiva cuya especie es *Quercus coccifera* perteneciente al no arbolado.

La empresa Valenciana de Aprovechamiento Energético de Residuos, SA (VAERSA) perteneciente a la Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo

Rural, localiza una serie de puntos de muestreo donde se toman muestras combustibles de las especies forestales más representativas de la zona, con el fin de obtener una elevada representatividad respecto al territorio. Se localiza un total de 18 puntos de muestreo (Imagen 1). Estos puntos de muestreo son representativos de la zona en cuanto a especies, estratos de vegetación y estructura del combustible. También se consideró los aspectos climáticos, topográficos y de accesibilidad.

La Tabla 1 muestra las especies que se toma en cada punto de muestreo por VAERSA de enero del 2016 a julio del 2018, la elección de las especies sigue la premisa de representatividad en los ecosistemas forestales, se toma muestras de un total de 19 especies distintas típicas de los montes mediterráneos. Se recoge un total de 125 muestras de vegetación en cada toma de muestra repartidas en los 18 puntos de muestreo, VAERSA recoge la muestra de las especies forestales una vez al mes y en ciertos puntos de muestreo en los meses de verano lo hace quincenalmente.

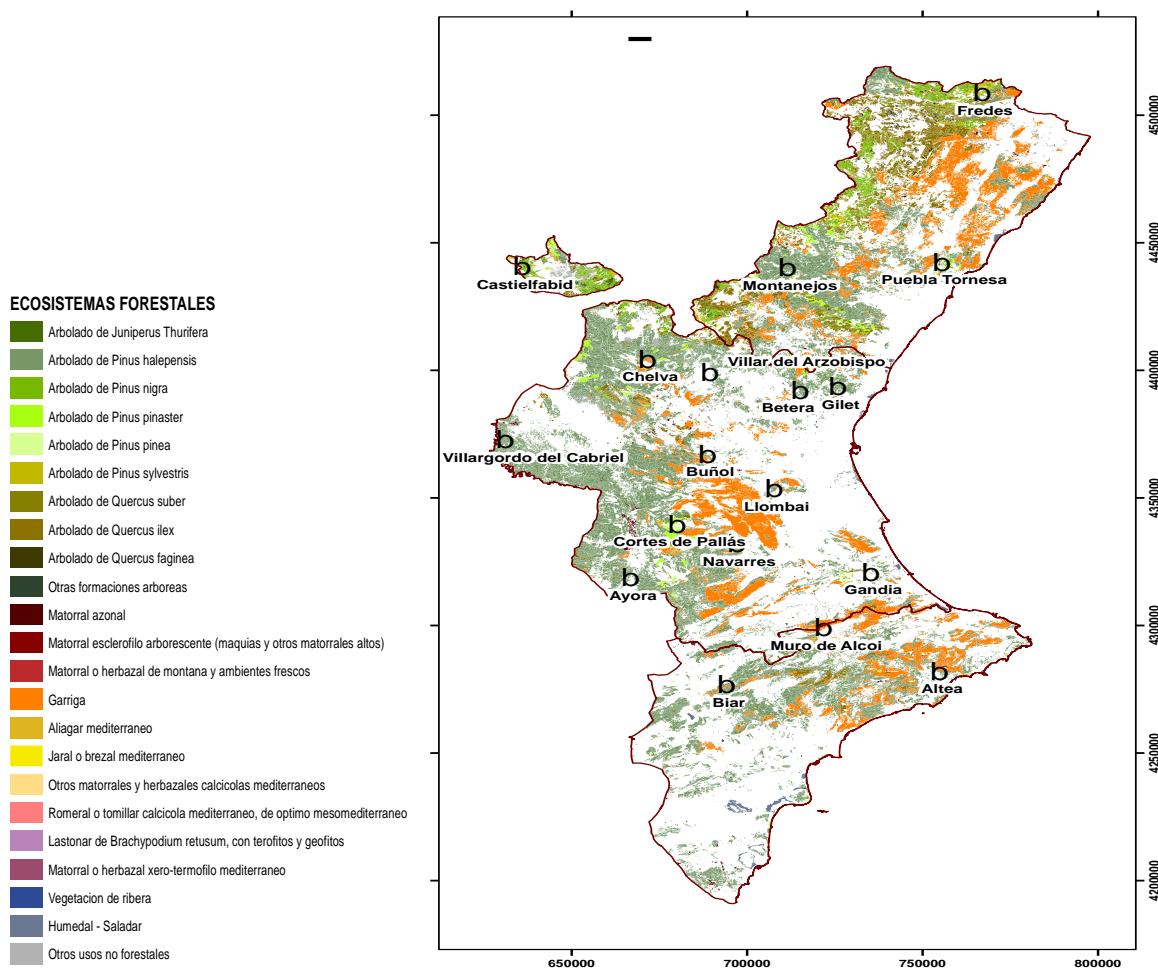


Imagen 1. Ecosistemas forestales de la Comunidad Valenciana y localización de los puntos de muestreo. Fuente: VAERSA

Tabla 1. Especies muestreadas en 18 parcelas de la Comunidad Valenciana.

Fuente: VAERSA.

Nº	Punto de Muestreo	Ph	Qc	Qi	Ro	Up	Em	Ca	Pp	Pn	Ps	Jo	Jc	Jt	Jph	Pl	Cs	St	Au	Ra	Total
1	Fredes			x	x	x				x	x	x			x						7
2	Puebla Tornesa	x	X		x	x	x		x			x				x					8
3	Montanejos	x	X		x	x						x			x	x				x	8
4	Castielfabid			x	x					x			x	x							5
5	Chelva	x	x	x	x	x												x			6
6	Villar del Arzobispo	x	x		x		x					x			x						6
7	Betera	x	x		x	x	x					x				x		x			8
8	Gilet	x	x		x		x					x				x					6
9	Villargordo del Cabriel	x	x		x							x			x			x	x		7
10	Buñol	x	x		x	x	x	x				x					x				8
11	Llombai	x	x		x	x	x					x				x	x				8
12	Cortes de Pallás	x	x	x	x	x		x	x			x									8
13	Navarrés	x	x		x	x	x					x									6
14	Ayora	x	x	x	x	x												x			6
15	Gandia	x	x	x	x	x	x		x							x					8
16	Muro de Alcoi	x	x	x	x	x		x				x				x					8
17	Altea	x	x		x	x	x									x	x				7
18	Biar	x			x	x						x			x						5
	Total	16	15	7	18	14	9	3	3	2	1	13	1	1	5	8	3	4	1	1	125

Nota: correspondencia entre abreviaturas y nombre de las especies: **Ph**(*Pinus halepensis*); **Qc** (*Quercus coccifera*); **Qi**(*Quercus ilex*); **Ro**(*Rosmarinus officinalis*); **Up**(*Ulex parviflorus*); **Em**(*Erica multiflora*); **Ca**(*Cistus albidus*); **Pp**(*Pinus pinaster*); **Pn**(*Pinus nigra*); **Ps**(*Pinus sylvestris*); **Jo**(*Juniperus oxycedrus*); **Jc**(*Juniperus communis*); **Jt**(*Juniperus thurifera*); **Jph**(*Juniperus phoenicea*); **Pl**(*Pistacea lentiscus*); **Cs**(*Ceratonia siliqua*); **St**(*Stipa tenacissima*); **Au**(*Arbutus unedo*); **Ra** (*Rhamnus alaternus*)

3. DATOS Y MÉTODOS

3.1. HUMEDAD DE COMBUSTIBLE VIVO PARA LAS ESPECIES FORESTALES.

El análisis de HCV que contiene cada especie vegetal detallada en la Tabla 1 es primordial, ya que forma parte de los ecosistemas forestales endémicos de la Comunidad Valenciana, mismos que al ser afectados por factores externos como su estado fenológico, variables meteorológicas a más del relieve y el suelo, presentan una mayor o menor deshidratación a lo largo del tiempo, existiendo la probabilidad de que dichas especies presenten características de un componente combustible, considerándose como un parámetro del comportamiento de los incendios forestales. La humedad de combustible vivo varía según la especie forestal y el tiempo en que se realice el muestreo.

El cálculo de la media ponderada de HCV para cada punto de muestreo se realiza a partir de la fracción de cabida cubierta (FCC) es decir la parte de suelo ocupado por la proyección de las copas de la vegetación, siendo diferente para cada punto de muestreo, VAERSA nos ha proporcionado dichos datos para el cálculo de la media ponderada de HCV. La mayoría de las especies forestales tienen una espesura incompleta al ser arbolados y matorrales es decir que no existirá tangencia entre sus copas y la distancia entre ellas será superior al diámetro medio de sus copas.

La Imagen 3 muestra la proporción de fracción de cabida cubierta que hay en cada punto de muestreo, hay un gran porcentaje de Ro (*Rosmarinus officinalis*), Ph (*Pinus Halepensis*) y Qc (*Quercus coccifera*) siendo las más predominantes. La obtención de la media ponderada de HCV en cada punto de muestreo y para cada fecha se obtiene a partir de la suma del producto de HCV de cada especie y su FCC esto dividido para la suma de FCC.

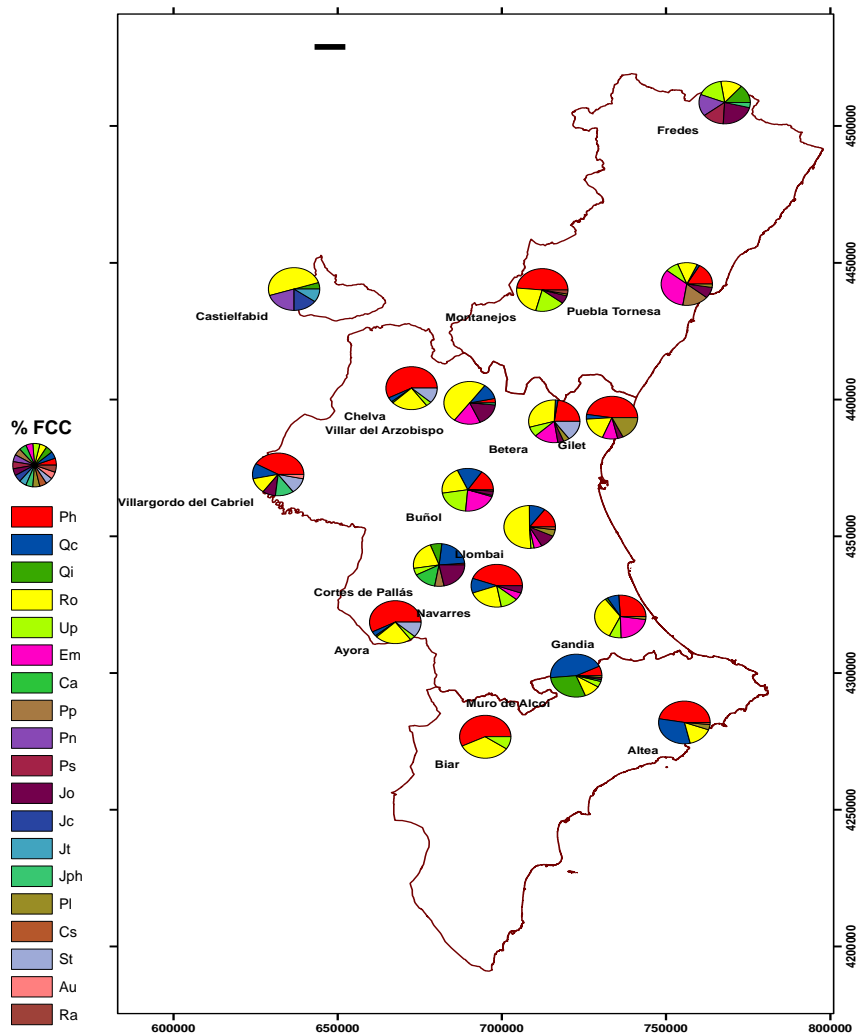


Imagen 2. Porción de FCC de las especies forestales en los puntos de muestreo.

3.2. INDICES DE VEGETACIÓN

Los índices de vegetación (IVeg) son desarrollados con la finalidad de obtener información sobre las características y estado de la vegetación, estos son calculados partiendo de datos espectrales adquiridos desde imágenes satelitales. Los IVeg aprovechan el comportamiento específico radiométrico de la vegetación sana en las diferentes bandas espectrales, especialmente entre el visible y el infrarrojo cercano; el visible perteneciente a la banda roja, muestra los pigmentos de la hoja que absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias afectan en menor fracción al infrarrojo cercano. Estos contrastes son los que aprovecha los IVeg para establecer diferencias en la vegetación, sana y vigorosa, cuando los contrastes son mayores, y vegetación enferma o de baja densidad, cuando los contrastes son menores (Carvacho et al., 2010).

El satélite Sentinel-2 ofrece imágenes de libre disposición, obteniendo series de datos temporales con resoluciones espaciales buenas y densas ampliando su uso en varios campos; por tal razón se realiza la recopilación de imágenes satelitales pertenecientes a la Comunidad Valenciana en el periodo de enero del 2016 a julio del 2018 con el fin de obtener el cálculo de diferentes índices de vegetación en dicho periodo y relacionarlos con la media ponderada de humedad de combustible vivo en 18 puntos de muestreo.

3.2.1. Adquisición de imágenes satelitales.

La descarga de imágenes Sentinel-2 se realizó desde la página web de Copernicus (COPERNICUS, 2018). Al estar los 18 puntos de muestreo distribuidos por toda la Comunidad Valenciana se descargó siete escenas de imágenes satelitales que cubren todos los puntos de muestreo y de cada escena una por cada mes en el periodo de tiempo antes mencionado.

3.2.2. Corrección atmosférica de imágenes satelitales con Sen2cor.

Las imágenes satelitales descargadas pasaran por el software SNAP mediante su extensión SEN2COR el cual pasará a las imágenes del nivel de producto L1C a L2A realizando la corrección atmosférica, del terreno y del cirro de los datos de entrada. Crea imágenes de reflectancia corregidas en el terreno y en el cirro; Grosos ópticos de aerosol adicionales, vapor de agua, mapas de clasificación de escena e indicadores de calidad para las probabilidades de nubes y nieve. El formato del producto de salida es equivalente al Producto de Usuario de Nivel 1C: imágenes JPEG 2000, y se obtiene tres resoluciones diferentes, 60, 20 y 10 m. (European Space Agency, 2018). Como resultado se obtiene unas imágenes más nítidas y con valores de píxel corregidos.

3.2.3. Generación de índices de vegetación.

Una vez procesadas las imágenes satelitales se procede a generar 6 índices de vegetación comúnmente utilizados para estimar HCV por varios autores, la mayor parte de estos índices miden las variaciones de verdor, mismas que pueden estar relacionadas indirectamente con el contenido de agua de la hoja ya que las variaciones de humedad de la vegetación afectan la actividad de la clorofila, la estructura interna de la hoja y el índice de área foliar (LAI) de la vegetación.

Tabla 2. Índices espectrales usados para estimar HCV con Sentinel-2.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN	FÓRMULA	REFERENCIA
Índice de vegetación normalizado (NDVI)	$NDVI = \frac{NIR - ROJO}{NIR + ROJO}$	(Rouse Jr., 1973)
Índice de vegetación mejorado (EVI)	$EVI = 2.5 \frac{NIR - ROJO}{NIR + 6 * ROJO - 7.5 * AZUL + 1}$	(Huete A. R., 1997)
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	$SAVI = \frac{1.5 * (NIR - ROJO)}{NIR + ROJO + 0.5}$	(Huete A. , 1988)
Índice de diferencia de agua normalizada (NDWI)	$NDWI = \frac{Verde - NIR}{Verde + NIR}$	(McFeeters, 1996)
Índice de resistencia atmosférica visible (VARI)	$NDWI = \frac{Verde - Rojo}{Verde + Rojo - Azul}$	(Tello et al., 2017)
Índice de vegetación verde (VIgreen)	$VIgreen = \frac{Verde - Rojo}{Verde + Rojo}$	(Tucker et al., 1978)

Se procede con la obtención de los 6 índices de vegetación para los 18 puntos de muestreo en análisis, al tener como dato la coordenada de donde se realizó el muestreo de las especies forestales se procede a sacar la media de cada índice de vegetación en un radio de 30 metros es decir se tomarán los nueve píxeles que se encuentren rodeando al punto de muestreo, este proceso se lo realizo mediante el desarrollo de un script en Python.

Los datos calculados de IVeg pertenecen a la fecha de toma del satélite de la imagen, por tal razón, se realiza una interpolación de los datos para obtener los mismos en la fecha de

muestreo en campo por VAERSA.

Los índices de vegetación antes mencionados están relacionados con la media ponderada de HCV, ya que han sido desarrollados con la finalidad de obtener información sobre el estado de la vegetación y las características de la mismas, entregando así la estimación de la calidad y desarrollo de la planta.

3.3. DATOS METEOROLOGICOS

La fenología de las especies forestales depende del estado meteorológico del ecosistema, obteniendo así el desarrollo de las plantas relacionado a los parámetros ambientales. Por tal motivo se realiza la recopilación de datos de variables meteorológicas (precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, levante y punto del rocío), con el fin de relacionarlos con la humedad de combustible vivo y los índices de vegetación.

Para ello se hace uso de los datos meteorológicos de las estaciones cercanas a los 18 puntos de muestreo, dichos datos se recopilan de las estaciones pertenecientes a entidades gestoras: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA).

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se estima los valores de HCV a lo largo del tiempo usando los perfiles temporales de los índices de vegetación derivados de las imágenes satelitales Sentinel-2. Se utiliza la regresión múltiple para evaluar el potencial de cada índice de vegetación para la estimación de HCV en cada punto de muestreo, analizando así el rendimiento de la información espectral derivada de Sentinel-2.

Las métricas de evaluación de los modelos generados para cada punto de muestreo incluyen los coeficientes de determinación (R^2), el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE). El valor R^2 ajustado se utiliza para comparar la bondad de ajuste entre modelos con diferentes variables de entrada.

A partir de los datos mensuales de dieciocho puntos de muestreo repartidos homogéneamente en la Comunidad Valenciana desde enero del 2016 a julio del 2018 se calcula el modelo de regresión múltiple para cada uno de los puntos de muestreo considerando como variable dependiente la humedad de combustible vivo y como variables independientes los índices de vegetación y sus respectivos polinomios de segundo grado con el fin de mejorar los modelos, la variable cuadrática hace que el modelo mejore, mostrando que su variable es estadísticamente significativa.

Dicho análisis también se desarrolla con las variables meteorológicas con el fin de mejorar la bondad de ajuste y obtener mejores resultados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. ANÁLISIS ENTRE LA MEDIA PONDERADA DE LA HUMEDAD DE COMBUSTIBLE VIVO Y LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN.

Al modelar la relación existente entre la media ponderada de HCV de las especies forestales más representativas de la Comunidad Valenciana y los índices de vegetación correspondientes a los 18 puntos de muestreo, se obtiene cuáles son las variables independientes es decir índices de vegetación que están relacionadas con la variable dependiente (HCV) obteniendo un proceso estadístico para estimar la relación entre ellas. Los valores R^2 ajustada se utilizaron para evaluar la bondad del ajuste para las parcelas muestreadas, este estadístico

redujo el efecto de variables explicativas adicionales que inflan automáticamente la métrica R^2 . Se alcanzó los modelos para cada punto de muestreo obteniendo los mejores resultados de R^2 ajustada para Gandia (55.31%), Gilet (55.42%), Castielfabid (57.36%) y Muela Cortes (65.83%), este último con el R^2 ajustada mayor se debe a que en dicho punto de muestreo cuenta con menos observaciones y la variación depende de menos factores. Los valores de R^2 ajustada no son tan altos por lo que las estimaciones no se ajustan bien a las variables reales en cada punto de muestreo. Los modelos que menos explican a las variables reales son Ayora y Alcoy con un 11.50 y 11.76% respectivamente, además en el punto de muestreo Chelva no se obtuvo ningún modelo estadísticamente significativo.

Los índices de vegetación NDVI y NDWI son los predictores que aparecen en una gran cantidad de los modelos calculados, el modelo del punto de muestreo Gandia es el que abarca más variables de índices de vegetación y es uno de los modelos que explica mejor a la variable real.

La Imagen 3 muestra los resultados de R^2 ajustada para los modelos de regresión lineal múltiple calculados para relacionar la media ponderada de HCV y las variables de índices de vegetación.

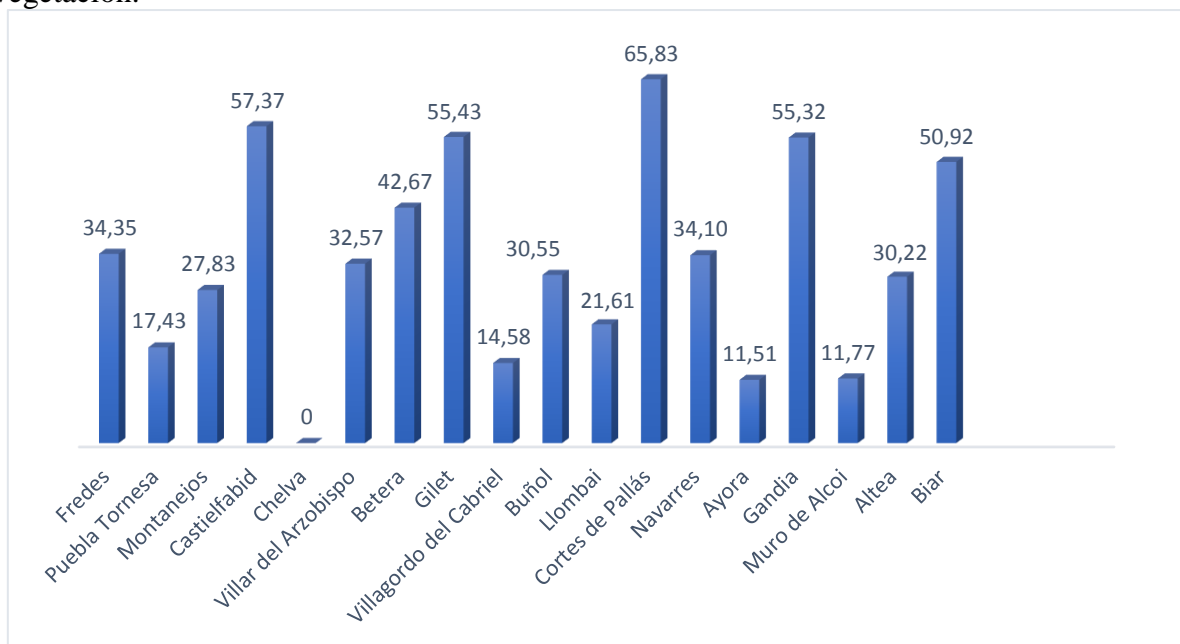


Imagen 3. Gráfica de resultados de R^2 ajustada para los modelos relacionados entre HCV e IVeg.

En el modelo del punto de muestreo Castielfabid se obtiene un R^2 ajustada de 57.37%, la Imagen 4 muestra los datos estimados por el modelo, en su mayoría se ajustan a la tendencia de los datos reales. La estimación del dato de HCV para julio del 2017 es el único que difiere de la tendencia, este desfase se debe a que los índices de vegetación cambian de una manera considerable en comparación con las otras fechas de muestreo perteneciendo este a verano, entregándonos así el modelo calculado un dato fuera de rango.

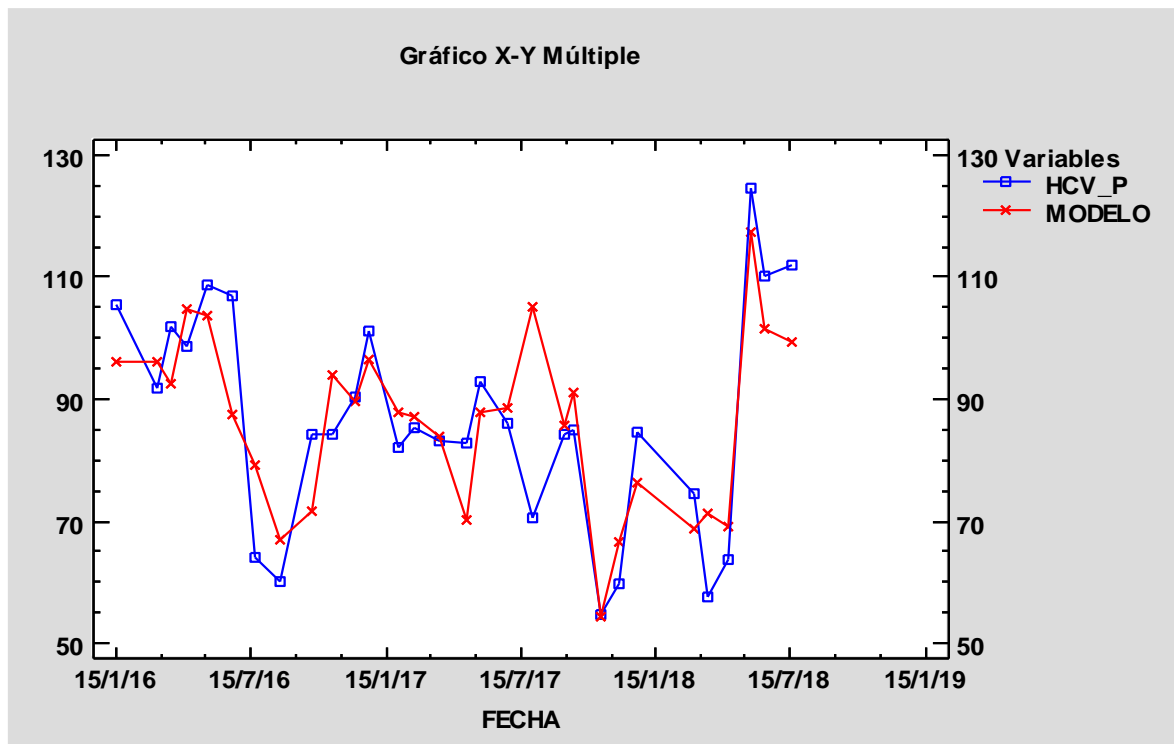


Imagen 4. Gráfica ajuste del modelo para índices de vegetación en el punto de muestreo Castielfabid.

4.2. ANÁLISIS ENTRE LA MEDIA PONDERADA DE LA HUMEDAD DE COMBUSTIBLE VIVO Y LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN MÁS LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.

Al modelar la relación existente entre la media ponderada de HCV, los índices de vegetación y las variables meteorológicas correspondientes a los 18 puntos de muestreo, se observa que en todos los casos el R^2 ajustada son mayores al 90% a excepción de Villargordo de Cabriel y Puebla Tornesa, con R^2 ajustada de 56.95% y 84.20% respectivamente. Los valores de la bondad de ajuste son altos por lo que las estimaciones se ajustan bien a las variables reales en cada punto de muestreo a excepción de Villargordo de Cabriel.

Las variables predictoras que contribuyen significativamente a los modelos pertenecen al grupo de índices de vegetación y a las meteorológicas en los 18 puntos de muestreo. Siendo las variables meteorológicas las que contribuyen significativamente y existiendo por lo menos una variable de índice de vegetación como es el caso de Villargordo de Cabriel y Muro de Alcoi.

La Imagen 5 muestra los resultados de R^2 ajustada para los modelos de regresión lineal múltiple calculados para relacionar la media ponderada de HCV y las variables de índices de vegetación más las variables meteorológicas. El mejor modelo en este caso es el obtenido para el punto de muestreo Betera el cual llega a un R-cuadrada ajustada de 99.998%, el cual se ajusta con 20 variables predictoras, 2 pertenecientes a índices de vegetación (EVI y VIgreen) y 18 variables meteorológicas (P3, P7, P15, P30, P60, Tmax7, Tmax15, Tmax30, Tmedia3, Tmedia7, Tmedia15, HRmax3, HRmax7, HRmax15, HRmin3, HRmin7, HRmin15, Vmax3) pertenecientes al grupo de precipitación, temperatura, humedad relativa y viento.

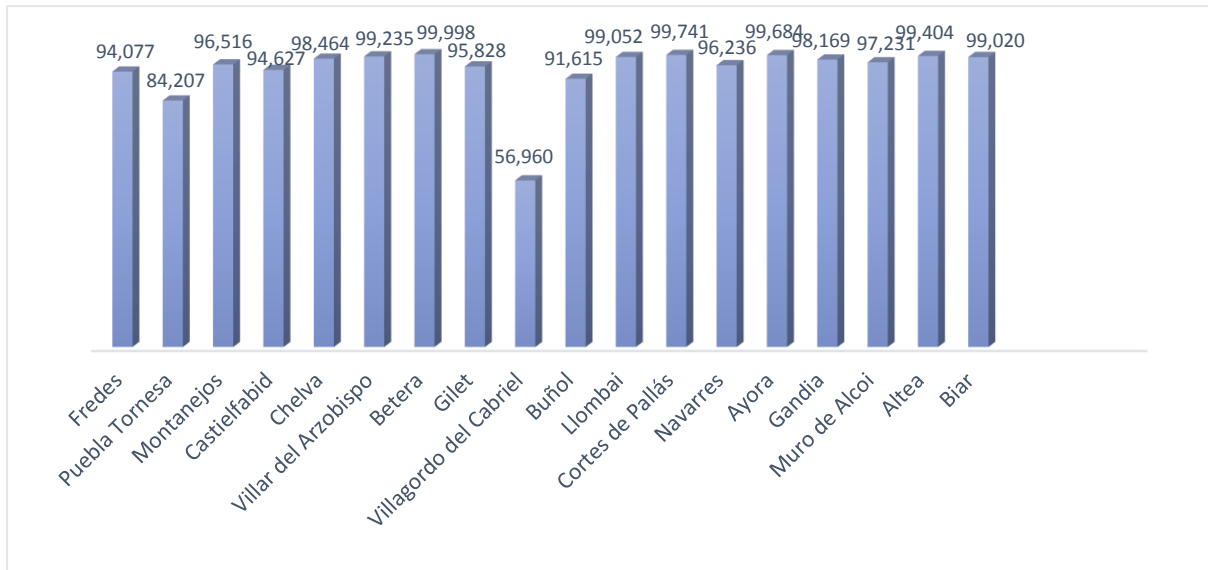


Imagen 5. Gráfica de resultados de R-cuadrada ajustada para los modelos relacionados entre HCV, IV y variables meteorológicas.

En el modelo del punto de muestreo Chelva entre HCV e IVeg no obtuvo ningún modelo estadísticamente significativo, al incluir en los análisis variables meteorológicas vuelven a ingresar todas las variables independientes y hace que los datos de índices de vegetación sean significativos y aporten al modelo. En la Imagen 6 se observa como en los meses de verano del 2016 se producen oscilaciones entre las medidas de HCV ya que los muestreos se realizaban dos veces por mes existiendo diferencias entre ellas, el modelo se logró ajustar con un R^2 ajustada de 98.46%, a pesar de las oscilaciones el modelo en los meses de julio, julio y agosto del 2016, se adapta a los valores ya que las variables meteorológicas actúan de la misma manera para dichas fechas, la precipitación acumulada para los últimos tres días sube y baja al igual que la HCV y de la misma manera las temperaturas máximas y medias, teniendo una relación muy importante entre las variables.

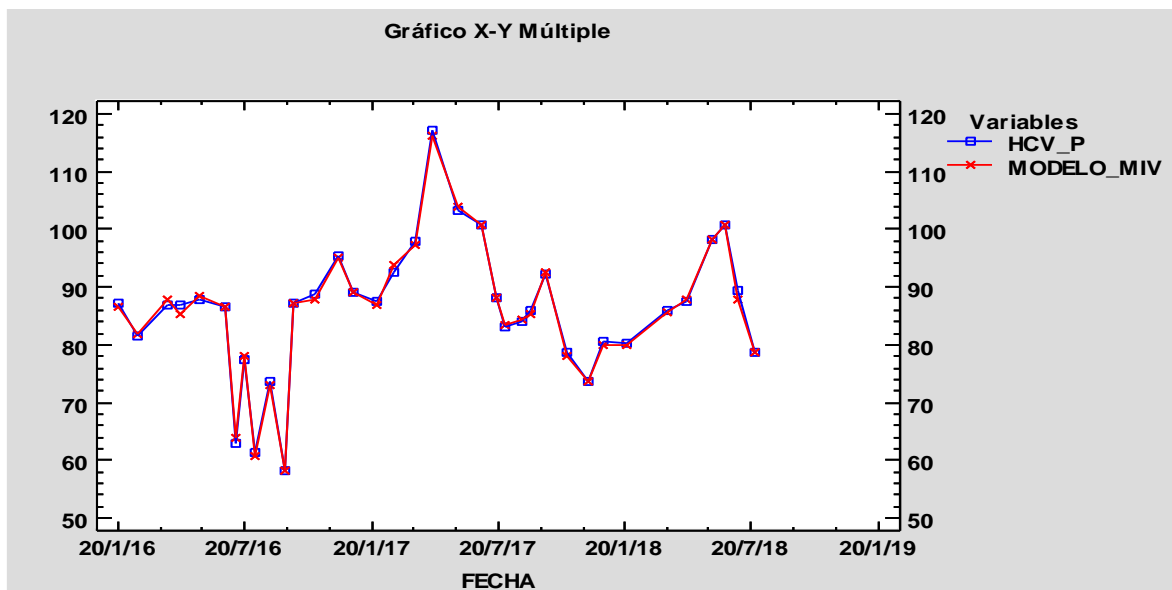


Imagen 6. Gráfica ajuste del modelo con índices de vegetación y variables meteorológicas en el punto de muestro Chelva.

4.3. ESTIMACIÓN DEL VALOR DE LA MEDIA PONDERADA DE HCV CON LOS MODELOS DE REGRESIÓN UTILIZANDO EL INTERVALO DE CONFIANZA.

Una vez que se ha realizado el análisis y se ha generado los modelos de regresión lineal múltiple, es posible predecir la media ponderada de HCV, es importante recalcar que toda predicción tiene asociado un error y por lo tanto un intervalo de confianza considerándolo del 95%. Se comprobó que los HCV están dentro del intervalo de confianza de cada modelo generado; de los 18 puntos de muestreo, Fredes, Montanejos y Castielfabid son los modelos que a pesar de tener un R cuadrada ajustada mayor a 90% dos de sus valores de HCV no ingresan en el rango de intervalo de confianza y Puebla Tornesa y Villargordo del Cabriel al tener una bondad de ajuste menor al 90% tiene más datos de HCV que no ingresan al rango. Con este análisis el modelo que no se lo considera bueno pertenece al punto de muestreo Villargordo del Cabriel ya que tiene un R^2 ajustada de 56% y la mitad de los valores de HCV se quedan fuera del rango de confianza del modelo generado.

5. CONCLUSIONES

El muestreo temporal de los datos de HCV está muy limitado por el trabajo de medición en campo. Para superar las limitaciones espaciales y temporales se han utilizado índices de vegetación derivados del sensor Sentinel-2 y variables meteorológicas pertenecientes a estaciones cercanas a los puntos de muestreo.

Los índices de vegetación están relacionados con el verdor de la superficie y la biomasa de la vegetación, por lo tanto, se correlacionó con HCV. La HCV también depende físicamente de la humedad, temperatura y precipitaciones, siendo variables meteorológicas que varían durante el desarrollo de la planta. Fue necesario añadir al estudio dichas variables y analizar la relación en conjunto con los índices de vegetación, obteniendo mejores modelos para la estimación, con R^2 ajustadas mayores al 90% en todos los puntos de muestreo a excepción de Villargordo y Puebla Tornesa con una bondad de ajuste de 56 y 84% respectivamente. Las variables predictoras al relacionarse entre sí hacen que contribuyan de una manera significativa a los modelos.

Las variables de índices de vegetación más influyentes en los modelos son NDVI y EVI siendo los que mejor estiman la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, sin embargo, los otros cuatro índices también contribuyen a las regresiones aportando por lo menos a un punto de muestreo. Las variables meteorológicas precipitación, temperatura, humedad relativa y viento son los predictores que más contribuyen a los modelos; son pocos los puntos de muestreo (Montanejos, Puebla Tornesa, Buñol, Muro de Alcoi, Altea y Biar) en que las variables de levante y punto del rocío aportan significativamente siendo las variables que menos relación tiene con el HCV.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio es parte de una investigación más amplia realizada dentro del marco del proyecto Análisis de la humedad del combustible vivo en la Comunitat Valenciana, de la empresa VAERSA con la autorización de la Generalitat Valenciana y la colaboración mantenida con la Dirección General de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana. La participación del Dr. Ángel Antonio Balaguer Beser como apoyo desde la Universitat Politècnica de Valencia y José Luis Soriano Sancho de la empresa VAERSA.

REFERENCIAS

- Argañaraz, J., Landi, M. A., Bravo, S. J., Gavier-Pizarro, G. I., Scavuzzo, C. M., IEEE, & Bellis, L. M. (2016). Estimation of Live Fuel Moisture Content From MODIS Images for Fire Danger Assessment in Southern Gran Chaco. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(12)(DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2575366), 5339-5349.
- Boksoon, M., Seung Hee, K., Shenyue, J., Kristen, W., & Menas C, K. (2018). Estimating Live Fuel Moisture from MODIS Satellite Data for Wildfire Danger Assessment in Southern California USA. *Remote Sensing*, 10(1), 87-107.
- Carvacho Bart, L., & Sánchez Martínez, M. (2010). Comparacion de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos.*, 728-737.
- COPERNICUS, E. (2018). *Copernicus Open Access Hub*. Obtenido de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
- Huete, A. R. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59 (3), 440-451.
- Marino, E., Guillén, C., Nur, A., Tomé, J., & Hernando, C. (19 de 11 de 2018). Estimation of live fuel moisture content of shrubland using MODIS and Sentinel-2 images. *Advances in Forest Fire Research*, 2018-226.
- 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(7), 1425–1432.
- PATFOR. (2011). *Conselleria de Agricultura Medio Ambiente, Cambio Climatico y Desarrollo Rural*. Obtenido de Plan de Acción Territorial Forestal de la Comunitat Valenciana : <http://www.agroambient.gva.es/es/web/medio-natural/patfor>
- Peterson, S. H., Roberts, D. A., & Dennisin, P. E. (2008). Mapping live fuel moisture with MODIS data: A multiple regression approach. *Remote Sensing of Environment* 112, 4272–4284.
- Rouse Jr., J. (1973). *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation*. Maryland: Goddard Space Flight Center.
- Soriano Sancho, J., & Quilez-Moraga, R. (21 de 06 de 2017). Análisis de la humedad del combustible vivo en la Comunitat Valenciana. *Actas del 7º Congreso Forestal Español.* , (págs. ISBN: 978-84-941695-2-6). Cáceres (España).
- Tello, J., Gómez-Báguena, R., & Casterad, M. (2017). Comparación y ajuste en zonas agrícolas de índices de vegetación derivados de. *Nuevas plataformas y sensores de teledetección. XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección.*, 81-84.
- Tucker, C., Falkowski, M., Gessler, P., Morgan, P., & Hudak, A. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.