



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural

Estudio del comportamiento del fuego mediante la
estimación del contenido de humedad ambiental en el
monte La Vallesa del Mandor

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Montes

AUTOR/A: Pedrajas Garcia, Sandra

Tutor/a: Campo García, Antonio Dámaso del

Director/a Experimental: BLANCO CANO, LAURA

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Título del TFG: Estudio del comportamiento del fuego mediante la estimación del contenido de humedad del combustible en el monte La Vallesa del Mandor.

Resumen: Los incendios son una de las principales perturbaciones naturales que afectan al Mediterráneo y se prevé que el escenario de cambio climático aumente tanto su ocurrencia como su peligrosidad. Esto supone una situación de riesgo para los habitantes de zonas de interfaz urbano-forestal, lugares donde las edificaciones entran en contacto con el monte y, por tanto, el fuego puede propagarse con mayor facilidad a las zonas residenciales en caso de incendio. Una de las formas de reducir el riesgo es mediante estudios del comportamiento del fuego asociado a las condiciones ambientales del monte. Este trabajo tiene como objetivo mapear el comportamiento del fuego a nivel de monte en función de la humedad de los combustibles (Mf) estimada mediante índices satelitales en el monte "La Vallesa". Este monte está configurado por un mosaico de 21 modelos de combustible. Debido a las diferencias estadísticas que presentaban los Mf medidos en campo se han realizado tres modelos de estimación del Mf: uno para pastos y matorral, otro para el combustible vivo del arbolado y otros para el combustible muerto del arbolado. En el estudio se han incluido 12 índices, los cuales han sido calculados a partir de las imágenes de Sentinel-2, siendo el índice GCI el que mejor se ajusta a la humedad del combustible. Estos modelos junto con las ecuaciones de comportamiento del fuego se han implementado en la plataforma Google Earth Engine, obteniendo parámetros como la longitud de llama a escala espacial y temperatura, lo que permite estudiar su variabilidad y dinámica por zona y modelo de combustible. Se ha observado que los modelos de arbolado obtienen unas longitudes de llama mayores. Además, que todos los modelos siguen una misma dinámica en la escala temporal.

Palabras clave: comportamiento del fuego, incendio, contenido de humedad ambiental, interfaz urbano-forestal, modelo de combustible, modelo.

AUTORA: Sandra Pedrajas García

TUTOR: Antonio Dámaso del Campo García

DIRECTORA EXPERIMENTAL: Laura Blanco Cano

Septiembre, 2022

Title of the TFG: Study of the behavior of the fire by estimating the moisture content of the fuel in the La Vallesa del Mandor mountain.

Abstract: Fires are one of the main natural disturbances that affect the Mediterranean and it is expected that the climate change scenario will increase both their occurrence and their danger. This represents a risk situation for the inhabitants of urban-forest interface areas, places where buildings come into contact with the forest and, therefore, the fire can spread more easily to residential areas in the event of a fire. One of the ways to reduce irrigation is through studies of fire behavior associated with the environmental conditions of the mountain. The objective of this work is to map the behavior of the fire at the mountain level as a function of the humidity of the fuels (Mf) estimated by means of satellite indices in the "La Vallesa" mountain. This mount is configured by a mosaic of 21 fuel models. Due to the statistical differences that the Mf measured in the field presented, three Mf estimation models have been carried out: one for grasses and scrub, another for the live fuel of the trees and others for the dead fuel of the trees. In the study, 12 indices have been included, which have been calculated from Sentinel-2 images, with the GCI index being the one that best adjusts to fuel moisture. These models, together with the fire behavior equations, have been implemented in the Google Earth Engine platform, obtaining parameters such as the length of the flame at a spatial and temperature scale, which allows studying its variability and dynamics by zone and fuel model. It has been observed that the woodland models obtain longer flame lengths. In addition, all the models follow the same dynamics on the time scale.

Keywords: fire behavior, fire, environmental moisture content, wildland-urban interface, fuel model, model.

AUTHOR: Sandra Pedrajas García

TUTOR: Antonio Dámaso del Campo García

EXPERIMENTAL DIRECTOR: Laura Blanco Cano

Septemper, 2022

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mi tutor, Antonio del Campo, la oportunidad de realizar este trabajo y todos los conocimientos compartidos.

Agradezco a, mi directora experimental, Laura Blanco, por ser el pilar principal de este TFM, por el tiempo que ha dedicado y por todos los conocimientos que me ha enseñado, especialmente de programación.

Dar gracias también a Fallah, Rim y Imen por su ayuda en el trabajo de campo, sin vosotras no podría haber sido posible este TFM. También doy las gracias a Antonio Molina y Javier Pérez que ayudaron cuando fue necesario.

Por último, agradecer a mis padres y a mi hermano por toda la paciencia, la confianza y el apoyo durante todos los años de universidad.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Objeto y localización.....	4
1.2. Área de estudio	5
1.2.1. Clima y meteorología	5
1.2.2. Edafología/geología.....	7
1.2.3. Vegetación.....	7
1.2.4. Modelos de combustible.....	7
1.3. Antecedentes	8
2. Objetivos	10
3. Material y métodos.....	10
3.1. Recopilación de datos.....	10
3.1.1. Contenido de humedad del combustible (Mf)	10
3.1.1.3. Zona de muestreo.....	12
3.1.2. Índices espectrales	14
3.2. Análisis de datos.....	16
3.2.1. Preparación de los datos.....	16
3.2.2. Análisis exploratorio del contenido de humedad e índices espectrales de los modelos de combustible muestreados	17
3.2.3. Modelización de la humedad del combustible	17
3.2.5. Cartografía del comportamiento del fuego	19
4. Resultados y discusión	22
4.1. Preparación de datos.....	22
4.2. Patrones de contenido de humedad de los modelos de combustible muestreados.....	23
4.2.1. Estadística básica general.....	23
4.2.2. Boxplot MC y Mf.....	24
4.2.3. Estudio de diferencias significativas (Anova)	25
4.3. Modelo y cartografía del contenido de humedad	27
4.3.1. Correlaciones.....	27
4.3.2. Modelo de regresión lineal simple y multiple.....	28
4.4. Cartografía del comportamiento del fuego	33
4.4.1. Visualización	33
4.4.2. Variación temporal	34
4.5. Limitaciones y mejoras.....	35
5. Conclusiones.....	36

6. Bibliografía	37
-----------------------	----

Índice de figuras

Figura 1. Triangulo del fuego. Fuente: elaboración propia	2
Figura 2. Influencia de los modelos de combustibles vivo y muerto en la velocidad de propagación del fuego. Gráfico elaborado con BehavePlus para un modelo de combustible matorral y arbolado joven, en un terreno llano y sin viento. Fuente: Ruíz González, A. D. (2004).	3
Figura 3. Localización del área de estudio. Fuente: elaboración propia.....	5
Figura 4. Climograma de la estación meteorológica de Bétera con datos medias del periodo de 2008 a 2021 . Fuente: elaboración propia	7
Figura 5. Modelos de combustible de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.....	8
Figura 6. Incendios cercanos y en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.	9
Figura 7. Localización puntos de muestreo y ejemplo del área de trabajo. Fuente: elaboración propia	12
Figura 8. Box plot de la humedad del combustible muerto (eje y) vs los modelos de combustible (eje x). Fuente: elaboración propia.	24
Figura 9. Box plot de la humedad del combustible vivo (eje y) vs los modelos de combustible (eje x). Fuente: elaboración propia.	25
Figura 10. Box plot de la humedad del combustible total (eje y) vs los modelos de combustible (eje x). Fuente: elaboración propia.	25
Figura 11. Longitud de llama (l) en la zona de estudio. El color amarillo representa longitudes de llama más bajas y el rojo más elevadas. Fuente: elaboración propia.....	34
Figura 12. Longitud de llama media en el periodo 19/08/2020 al 29/08/2021. Fuente: elaboración propia.	35
Figura 13. Longitud de llama en cada modelo de combustible en el periodo 19/08/2020 al 29/08/2021 . Fuente: elaboración propia.....	35

Índice de tablas

Tabla 1. Datos meteorológicos de la estación meteorológica de Bétera (media de la serie temporal 2008-2021). Fuente: elaboración propia a partir de datos del SIAR.....	6
Tabla 2. Incendios producidos en el Monte de la Vallesa y sus alrededores, especificándose el área que quemó el incendio y cuánto se quemó en el Monte de la Vallesa.	9
Tabla 3. Modelos de combustible y su representación en el monte de la Vallesa y en el área de estudio. Fuente: elaboración propia.....	11
Tabla 4. Clasificación de muestras tomadas. Fuente: elaboración propia.....	13
Tabla 5. Promedio del peso de las muestras tomadas. Fuente: elaboración propia.....	13
Tabla 6. Fórmulas para el cálculo de la humedad de combustible (Andrews,2018).	14
Tabla 7. Índices espectrales utilizados. Fuente: elaboración propia.	16
Tabla 8. Fórmulas de normalización. Fuente: elaboración propia.....	16
Tabla 9. Parámetros de entrada para la estimación de los parámetros de comportamiento del fuego. En la columna GEE se especifica el tipo de variación temporal o espacial que presentan: CET: constante espacial y temporalmente, CT: constante temporalmente, pero variables espacialmente, CE: constante espacialmente, pero variables temporalmente y VET: variables espacialmente y temporalmente, además del tipo de formato que tienen: I: imagen o CI: colección de imágenes.	20
Tabla 10. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de los parámetros de comportamiento del fuego: velocidad de propagación (R , ft/min), el calor por unidad de superficie (HA , Btu/ft ²) y la longitud de la llama (FB , ft). En la columna GEE se especifica en el tipo de variación temporal o espacial que presentan: CET: constante espacial y temporalmente, CT: constante temporalmente, pero variables espacialmente, CE: constante espacialmente, pero variables temporalmente y VET: variables espacialmente y temporalmente, además del tipo de formato que tienen: I: imagen o CI: colección de imágenes.....	21
Tabla 11. Resultados del test de Shapiro-Wilks. Fuente: elaboración propia.	22
Tabla 12. Resultados de estadística básica (3rd Qu: tercer cuartil, 1st qu: primer cuartil, sd: desviación estandar). Fuente: elaboración propia Fuente: elaboración propia.....	23
Tabla 13. Media y desviación estándar del valor de humedad para cada modelo de combustible. Fuente: elaboración propia.....	25
Tabla 14. Test ANOVA entre los modelos de combustible y cada variable analizada. Fuente: elaboración propia.	26
Tabla 15. Valores del p-valor resultantes del test post-hoc que analiza las diferencias del contenido de humedad de los diferentes componentes entre los MC. Los p-valores mayores a 0.05 se interpretan como: no diferencias significativas en el contenido de humedad de la variable entre los modelos analizados.....	27
Tabla 16. Correlaciones entre humedad del combustible de la agrupación matorral-pastizal y los índices espectrales. (Mf.total: humedad del combustible total; Mf.vivo: humedad del combustible vivo; Mf.mto.: humedad del combustible muerto). Fuente: elaboración propia..	28
Tabla 17. Correlaciones entre humedad del combustible de la agrupación arbolado y los índices espectrales. (Mf.total: humedad del combustible total; Mf.vivo: humedad del combustible vivo; Mf.mto.: humedad del combustible muerto). Fuente: elaboración propia.....	28
Tabla 18. Ecuaciones de los modelos lineales simples de la humedad del combustible de la agrupación matorral-pastizal con los respectivos valores de R ² y del error cuadrático medio (RMSE). Fuente: elaboración propia.	28

Tabla 19. Ecuaciones de los modelos lineales simples de la humedad del combustible vivo del arbolado con los respectivos valores de R2 y del error cuadrático medio (RMSE). Fuente: elaboración propia.	29
Tabla 20. Ecuaciones de los modelos lineales simples de la humedad del combustible muerto del arbolado con los respectivos valores de R2 y del error cuadrático medio (RMSE). Fuente: elaboración propia.	29
Tabla 21. Modelos múltiples de la humedad del combustible total de los modelos matorral/pastizal. Fuente: elaboración propia.	30
Tabla 22. Modelos múltiples de la humedad del combustible vivo del arbolado. Fuente: elaboración propia.	31
Tabla 23. Modelos múltiples de la humedad del combustible muerto del arbolado. Fuente: elaboración propia.	31
Tabla 24. Comparación mejores modelos (múltiple y simple) de matorral+pastos. Fuente: elaboración propia.	32
Tabla 25. Comparación mejores modelos de la humedad del combustible muerto (múltiple y simple) del arbolado. Fuente: elaboración propia.	33
Tabla 26. Comparación mejores modelos de la humedad del combustible vivo (múltiple y simple) del arbolado. Fuente: elaboración propia.	33

1. Introducción

Uno de los principales retos en la actualidad es hacer frente al cambio climático y sus consecuencias. Este cambio puede observarse en la tendencia al calentamiento global, en el cual se ha demostrado que la temperatura media mundial ha aumentado 0.8 °C desde 1900 (Hansen et al., 2006). Incluso hay predicciones que sugieren que en 2100 las temperaturas aumentarán entre 4-5°C en partes del Mediterráneo (Christensen et al., 2007). Estos cambios están asociados con el aumento de la frecuencia y magnitud de grandes perturbaciones naturales (Lindner et al., 2010). Las principales perturbaciones de región la mediterránea son la sequía y los incendios forestales (Pausas y Paula, 2012), seguidas de plagas y tormentas con vientos extremos (Vilà-Cabrera et al., 2018).

Históricamente el bosque mediterráneo ha convivido con los incendios, los cuales han moldeado el paisaje y las especies vegetales han evolucionado para adquirir mayor resistencia y resiliencia a estos (Pausas y Paula, 2012). Aunque, actualmente se convertirán en una amenaza aún mayor para la silvicultura mediterránea y el bienestar humano en las zonas rurales (Moriondo et al., 2006). El principal problema reside en el régimen temporal en el que suceden (frecuencia) y en la superficie afectada, siendo aún más alarmante con el desarrollo del cambio climático, donde el aumento de temperatura y las sequías, que provocan una disminución de la humedad de los combustibles, siendo necesaria menos energía para alcanzar el punto de ignición, lo que se ha relacionado en diversos estudios con un mayor porcentaje de superficie quemada (Vallejo y Alloza, 1998). Además de estos aspectos ambientales, es necesario destacar aspectos socioeconómicos que han generado un incremento del combustible disponible en los montes de España, concretamente el fenómeno conocido como despoblación rural (De Castro et al., 2007), que tuvo su gran auge en los años 70s. Con este movimiento, las personas se desplazaban de las zonas rurales a la ciudad, abandonando los campos de cultivo que regentaban; estos campos han sufrido en las últimas décadas una forestación o regeneración natural del bosque, provocando que haya mayor continuidad de combustible disponible además de mayor cantidad.

La selvicultura preventiva de incendios (SPI) se basa en la prevención de los incendios. La SPI se fundamenta en que la propagación del incendio depende, en gran medida, de la estructura y composición de la vegetación, que determinarán el comportamiento de fuego si el incendio se inicia (Omi, 2015). En este sentido la SPI desarrolla actividades que modifiquen la vegetación en cuanto a: i) reducción de la carga de combustible, ii) discontinuidad vertical, iii) discontinuidad horizontal y los tratamientos más convencionales son: i) Poda: Para interrumpir la continuidad vertical, intentando evitar un incendio de copas; ii) Desbroce: Eliminación de plantas herbáceas y arbustivas para interrumpir la continuidad horizontal y vertical, iii) Claras: Utilizadas para moderar la densidad de combustible mediante la eliminación de pies, iv) Quemadas prescritas: Uso planificado y controlado del fuego para disminuir la densidad del combustible. En definitiva, con la SPI se pretende modificar la densidad de combustible, el único parámetro controlable en el incendio si previamente se han realizado los tratamientos correspondientes, pudiendo así modificar el comportamiento del incendio. En este sentido la planificación de las zonas donde se van a realizar los tratamientos es esencial para la optimización de los trabajos en favor de minimizar el riesgo y la virulencia de un incendio potencial. Esta planificación se plasma en los Planes de Prevención de Incendios Forestales. En el proceso de designación de las zonas a tratar deben priorizarse las zonas que debido a estructura y composición supongan un mayor riesgo. Este riesgo se puede estudiar a través de

la modelización del comportamiento del fuego (Cardil et al., 2021). El modelo clásico y más extendido es el de Rothermel (1972), aunque actualmente se han desarrollado una larga lista de ellos (Pastor et al., 2003). Incluso se han desarrollado programas que permiten hacer este tipo de modelizaciones de forma rápida y sencilla, como por ejemplo: BEHAVE (Rothermel et al., 1986; Andrews, 1986; Andrews y Chase, 1989), FARSITE (Finney, 1998), BehavePlus (Carlton et al., 2001), NEXUS (Scott, 1999) y FFE-FVS (Fire and Fuels Extension to de Forest Vegetation Simulator) (Reinhardt y Crookston, 2003). Todos estos programas de modelización de incendios están basados en la ecuación de propagación de Rothermel (Rothermel, 1972).

El comportamiento del fuego de manera simplificada está condicionado por tres grandes factores: topografía, tiempo atmosférico y combustible, que componen el triángulo del comportamiento del fuego (Figura 1). La topografía afecta directamente a la propagación del fuego, siendo más veloz en pendientes ascendentes y menor velocidad cuando avanza en pendientes descendientes (Pyne et al., 2016). Además, afecta indirectamente, alterando los otros factores del incendio, como el viento, la temperatura y la humedad relativa; a su vez, afectando a la humedad del combustible. La topografía influye sobre la vegetación presente en las laderas, debido a la exposición al sol en función de la orientación, provocando diferencias claras entre laderas de solana y umbría; en la primera de estas predomina una vegetación más seca, con mayor facilidad de convección. En relación al viento, se ve afectada por las grandes pendientes porque el calor transmitido por convección asciende por la ladera desecando y precalentando el material. Además de fenómenos que suceden debido a la combinación viento y topografía, como el efecto chimenea (Pyne et al., 1996). El tiempo atmosférico afecta debido principalmente a la temperatura, humedad y al viento, favoreciendo los incendios cuanto mayor es la temperatura que deseca el combustible. Mientras que el viento ayuda a la propagación y puede provocar cambios direccionales del fuego. El combustible es otro de los factores clave de un incendio, además es el único que puede modificarse mediante la selvicultura preventiva. Sus características, como la altura y la densidad, son importantes para conocer el comportamiento del fuego. Se han estandarizado las características creando distintas clasificaciones de los modelos de combustible; la más conocida es la clasificación de Rothermel de 1972. Es importante diferenciar los distintos tipos de modelos de combustible, ya que tienen asociado un comportamiento de fuego específico. Posteriormente al establecimiento del modelo de combustible, el contenido de humedad del mismo será determinante en la magnitud del comportamiento (Pyne et al., 1996).

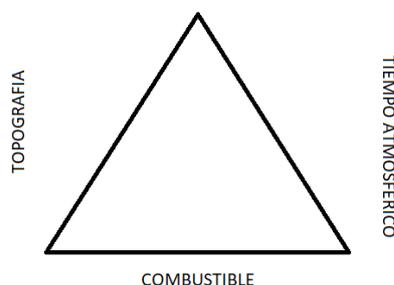


Figura 1. Triángulo del fuego. Fuente: elaboración propia

La humedad del combustible afecta al incendio en cada una de sus fases de desarrollo: ignición, combustión y transmisión. El aumento de temperatura del combustible debido a una fuente de calor debe de alcanzar el punto de ignición para que se produzca la combustión. A mayor porcentaje de humedad, mayor es el calor necesario para llegar a dicho punto. La humedad incrementa la capacidad de calor y la conductividad térmica del combustible (Chandler et al., 1991). La capacidad de calor de un combustible es la resistencia de éste a aumentar su temperatura. Mientras que una mayor conductividad térmica implica mayor capacidad de transmisión de calor hacia las moléculas interiores, por tanto, menor concentración en las moléculas superficiales, lo que conlleva una necesidad mayor de calor para que alcance el punto de ignición la capa superficial y, se produzca la ignición. En conclusión, cuanto mayor es la humedad de combustible, mayor es la resistencia a la ignición y más tiempo requiere. En el proceso de combustión la humedad del combustible afecta igual que en la ignición, pero es importante añadir el efecto del vapor de agua como diluyente de los gases inflamables que se liberan durante la pirolisis (Chandelier et al., 1991). Si los gases se diluyen en exceso en el vapor de agua no pueden inflamarse, impidiendo la combustión del combustible. Por otro lado, la transmisión de calor por radiación se ve reducida por el vapor de agua. Si la transmisión de calor es por conducción, se necesita más calor para mantener la combustión en caso de mayor humedad, a pesar del aumento de conductividad por el aumento de la capacidad de calor, que se ha explicado con anterioridad. Finalmente, se observa como las características del comportamiento del fuego pueden variar en función del contenido de humedad de los combustibles. Este hecho puede observar con el parámetro de velocidad de propagación, el cual disminuye cuando el contenido de humedad aumenta (Figura 2). Otro parámetro como la intensidad del incendio también tiene una relación directa inversa con la humedad (Argañaraz et al., 2018). Debido a que la intensidad está directamente relacionada con la velocidad de propagación y el calor emitido. En el caso de la longitud de la llama sucede lo mismo, ya que ésta depende de la intensidad del fuego, entre otros factores.

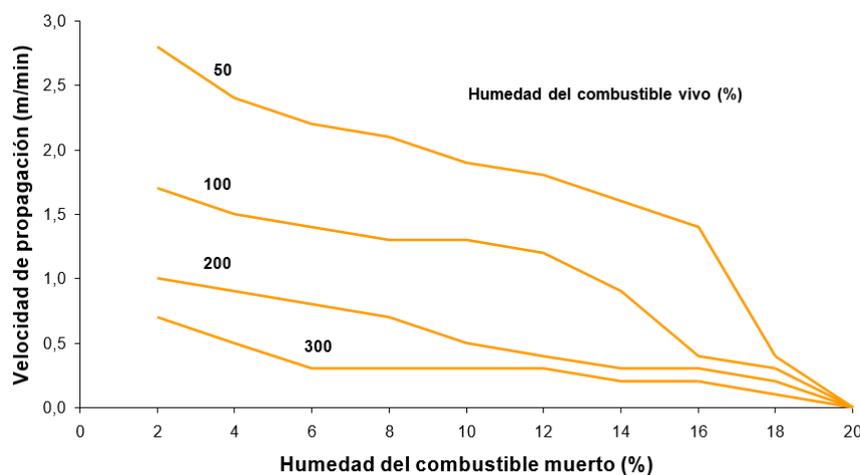


Figura 2. Influencia de los modelos de combustibles vivo y muerto en la velocidad de propagación del fuego. Gráfico elaborado con BehavePlus para un modelo de combustible matorral y arbolado joven, en un terreno llano y sin viento. Fuente: Ruíz González, A. D. (2004).

El contenido de humedad se compone del contenido de humedad del combustible muerto y del vivo. El primero de estos es más sencillo de estimar puesto que puede realizarse de forma directa a partir de características meteorológicas, siendo la humedad relativa la más

generalizada, pues es la forma que mejor refleja el intercambio de vapor de agua entre atmosfera y combustible (Chandler et al., 1991). En cambio, la del combustible vivo supone una mayor dificultad porque también depende de las propiedades fisiológicas de cada especie, que varían en función de su estado vegetativo. Aunque la humedad del combustible muerto también varía en función de las características de las masas, por ejemplo, la altura del dosel y el índice de área foliar afectan, pues con un dosel más alto y denso, el proceso de secado después de la lluvia es más lento. Las diferencias se deben a la variación en el déficit de presión de vapor debajo del dosel. La medición del contenido de humedad del combustible (Mf) puede realizarse mediante métodos directos e indirectos (Alves et al., 2009).

Tradicionalmente, se han utilizado los métodos directos. Estos métodos son más exactos, pero son necesarios los muestreos de campo y un posterior análisis en laboratorio, por tanto, imposibilita realizar la medida directa en campo. Lo que implica un aumento en el esfuerzo de trabajo de campo y limita la obtención espacial de datos, ya que, no es posible abarcar toda el área de estudio, además que la obtención de Mf se alarga en el tiempo. Un método directo es realizar la medición mediante de la humedad por secado en estufa y las técnicas químicas de valoración medidores portátiles de conductividad eléctrica (Chatto et al., 1997). Por otro lado, se puede hacer la estimación del Mf mediante los métodos indirectos. Estos métodos se basan en la estimación de Mf a través de modelos, lo que implica que no son valores tan exactos como los anteriores, aunque se pueden obtener de manera inmediata sin necesidad de estar en el área de estudio. Comúnmente se han utilizado modelos basados en la meteorología, aunque con el desarrollo de las nuevas tecnologías se están desarrollando modelos basados en índices espectrales (Yebra et al., 2008; Marino et al., 2018). El índice más utilizado es el NDVI, que representa el verdor de la vegetación, además es de los primeros índices en utilizarse (Cocero et al., 2004). Otro índice utilizado es el NDII, que representa el contenido de agua, en un estudio fue el índice de los que representan contenido de humedad, que mejores resultados obtuvo en el cálculo de la humedad del combustible (Hurt et al., 2012). Éste es el único utilizado en diversos estudios de mayor antigüedad como el realizado en 2003 en la zona de Montpellier (Roldán et al., 2003). Estos dos índices se han utilizado como únicos índices espectrales en varios estudios, pero en artículos más actuales se han realizado análisis estadísticos para comprobar qué índice espectral se ajustaba más en el cálculo de la humedad (García et al., 2020; Costa-Saura et al., 2021), que a continuación, se comentan. García et al., 2020 comparó la eficacia de distintos índices espectrales calculados mediante los datos de Sentinel para obtener la humedad del combustible vivo (García et al., 2020). Los resultados mostraron que el índice EVI generalmente daba mejores resultados, seguido de los índices NDII, NDVI y VARI, pero obteniendo una diferencia significativa con este último. Costa-Saura et al., 2021 utilizó varios índices espectrales (EVI, NDVI, SAVI, VARI, NDMI) y características meteorológicas para obtener un modelo lineal de la humedad del combustible vivo en zonas con predominancia de matorral en una zona mediterránea. Los resultados de los estudios son variados, por ello, puede afirmarse que no hay un índice generalizado para la modelización de la humedad del combustible.

1.1. Objeto y localización

El objeto de este estudio es la estimación de la humedad del combustible de un monte adyacente a una zona urbana. El Monte se denomina La Vallesa y se localiza, entre los términos municipales de Paterna y Ribarroja del Túria, municipios a las afueras de la ciudad de Valencia, pertenecientes a la comarca de la Horta Sud de la provincia de Valencia (figura 3). Este trabajo se enmarca dentro del contexto de un proyecto de investigación, el proyecto

“Green Urban Actions for Resilient fire Defence of the Interface Area” (GUARDIAN, UIA03-338, <https://proyectoguardian.com/>), que tiene como finalidad aumentar la resiliencia al fuego en una zona del Parc Natural del Túria. Para conseguir su objeto se han realizado durante el proyecto tratamientos selvícolas y se ha diseñado e instalado una serie de cañones, que se usarán para el riego preventivo y de mantenimiento de las zonas que forman las barreras verdes de protección contra incendios del interfaz urbano-forestal, utilizando agua regenerada mediante una ERA (estación regeneradora de agua). Este estudio se sitúa dentro de uno de los objetivos principales del proyecto, puesto que la medición de la humedad del combustible es un factor clave para poder aplicar los riegos preventivos.

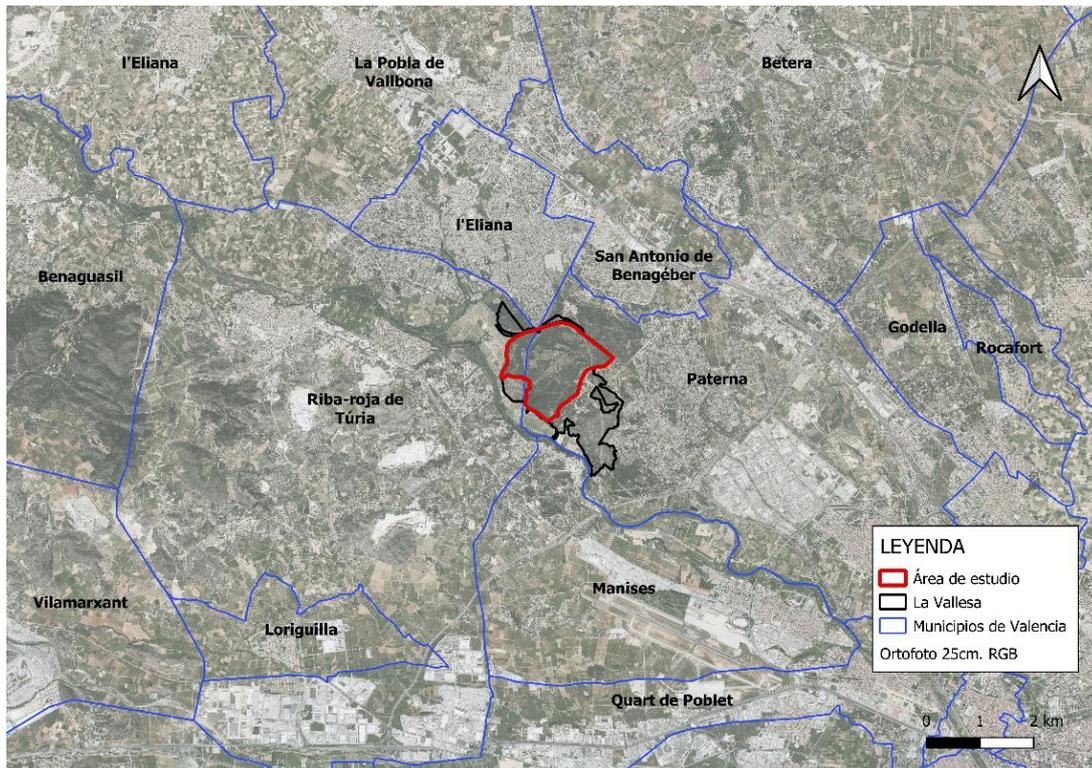


Figura 3. Localización del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

1.2. Área de estudio

El área de estudio se ubica en el monte privado La Vallesa localizado, con una superficie total 194 ha aproximadamente. Este monte colinda con varias urbanizaciones, al este con la Cañada, perteneciente al municipio de Paterna, al sudeste con la Presa, urbanización situada en el TM de Manises y con Valencia la Vella y La Vallesa de Mandor al sudoeste, urbanizaciones del municipio de Ribarroja del Túria. Este tipo de áreas en las que las urbanizaciones entran en contacto con el bosque se denomina interfaz urbano-forestal, que solo por la peligrosidad del bosque a sufrir incendios, hace que área residencial sea más vulnerable y tenga un riesgo mayor de sufrir un incendio y generar situaciones de emergencia grave. Se calcula que, en esta área de estudio, 15000 personas estas afectadas por esta vulnerabilidad.

1.2.1. Clima y meteorología

El clima es mediterráneo, es decir, se caracteriza por tener inviernos no muy fríos debido a la suavización de temperatura producida por el mar, mientras que los veranos son secos y

calurosos. La precipitación se caracteriza por su irregularidad; los máximos se producen en otoño y primavera, resaltando el período de gota fría de otoño; en cambio, en verano se produce una fuerte sequía estival. La precipitación acumulada anual es 394.14 ± 102.79 mm y la temperatura media anual 16.62 ± 1.59 °C, datos obtenidos en las parcelas experimentales del monte durante el desarrollo del proyecto GUARDIAN.

Para obtener una serie de datos mayor se consultan los datos meteorológicos la estación del SIAR en Bétera del periodo 2008-2021 (Tabla 1; Figura 4). Se observa que la temperatura media ronda los 16-17 °C, siendo el mes más frío enero, con una temperatura que ronda los 10 °C, mientras que el mes más caluroso con una temperatura media de alrededor de 25 °C, es agosto. La gran mayoría de las precipitaciones se concentran en los meses de septiembre, octubre y noviembre, habiendo años en los que la precipitación de un mes llega a ser el 25% de la precipitación anual, coincidiendo con el fenómeno de gota fría. El índice de Gausson expone que un mes es seco cuando las precipitaciones son menores al doble de la temperatura. En los climogramas puede observarse que los meses de junio, julio y agosto cuadran con esta característica. Respecto a la humedad relativa los valores rondan el 65-70%, con un periodo de menor humedad al final del invierno y principio de primavera y el mayor valor en los meses de otoño. Consultando los datos mensuales de la serie de datos disponibles puede observarse que la humedad relativa media tiende a no bajar del 60%, pero sus datos mínimos rondan el 8% de humedad coincidiendo con el mediodía en días de verano, provocando situaciones de riesgo de incendio mayores.

*Tabla 1. Datos meteorológicos de la estación meteorológica de Bétera (media de la serie temporal 2008-2021).
Fuente: elaboración propia a partir de datos del SIAR.*

Meses	T media (°C)	Precipitación (mm)	EtPMon (mm)
Enero	9.39	35.33	36.85
Febrero	10.1	14.67	50.69
Marzo	12.32	51.75	78.83
Abril	14.78	37.88	100.75
Mayo	18.15	25.35	123.04
Junio	21.09	17.98	147.08
Julio	23.76	9.67	157
Agosto	24.17	16.54	139.2
Septiembre	21.6	44.59	104.85
Octubre	18.11	39.17	72.74
Noviembre	13.98	54.08	50.75
Diciembre	11.09	22.25	39.89
Total/mensual	16.55	369.26	91.81

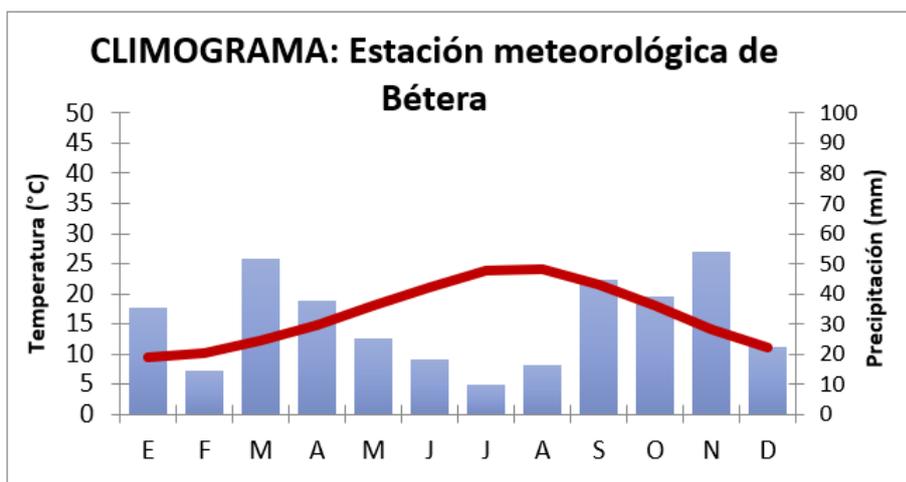


Figura 4. Climograma de la estación meteorológica de Bétera con datos medias del periodo de 2008 a 2021 .
Fuente: elaboración propia

1.2.2. Edafología/geología

La formación rocosa predominante son las margas y calizas. El suelo de la zona de estudio tiene una profundidad estimada de 30 cm, con textura Franco Arenosa y una pedregosidad media de 56.71 ± 8.70 % en volumen.

1.2.3. Vegetación

En relación con la vegetación, hay mosaicos de vegetación forestal y cultivos abandonados. Domina la masa arbórea de *Pinus halepensis*, acompañada de un estrato arbustivo variable de especies como *Quercus coccifera*, *Genista scorpius*, *Salvia rosmarinus*, etc. Los cultivos abandonados son de naranjos, algarrobos y olivos, y en algunos se ha producido una regeneración natural de la especie *Pistacia lentiscus*. La zona destaca por su función de pulmón verde en zona urbanizada, pero además por la conservación del espacio forestal, llegando a verse zonas de pinar con pies de gran envergadura. Además, cabe destacar que abarca una de las poblaciones en mejor estado de albaida sedosa (*Anthyllis lagascana*) a nivel mundial. La diversidad de las formaciones vegetales de la zona de estudio se detalla a continuación en función de cada modelo de combustible.

1.2.4. Modelos de combustible

En el estudio del comportamiento del fuego hay parámetros que están caracterizados según el modelo de combustible, por ello, es muy importante realizar una clasificación adecuada de la zona de estudio. En el ámbito del proyecto GUARDIAN, la empresa Medi XXI ha clasificado la zona de estudio en función de sus modelos de combustible según la clasificación de Scott y Burgan (2005), que puede consultarse en el anejo 1. Para ello se basaron en datos LiDAR, satelitales y muestreos de campo. Finalmente obtuvieron la cartografía de los modelos de combustible, la de la zona de estudio puede consultarse en la Figura 5.

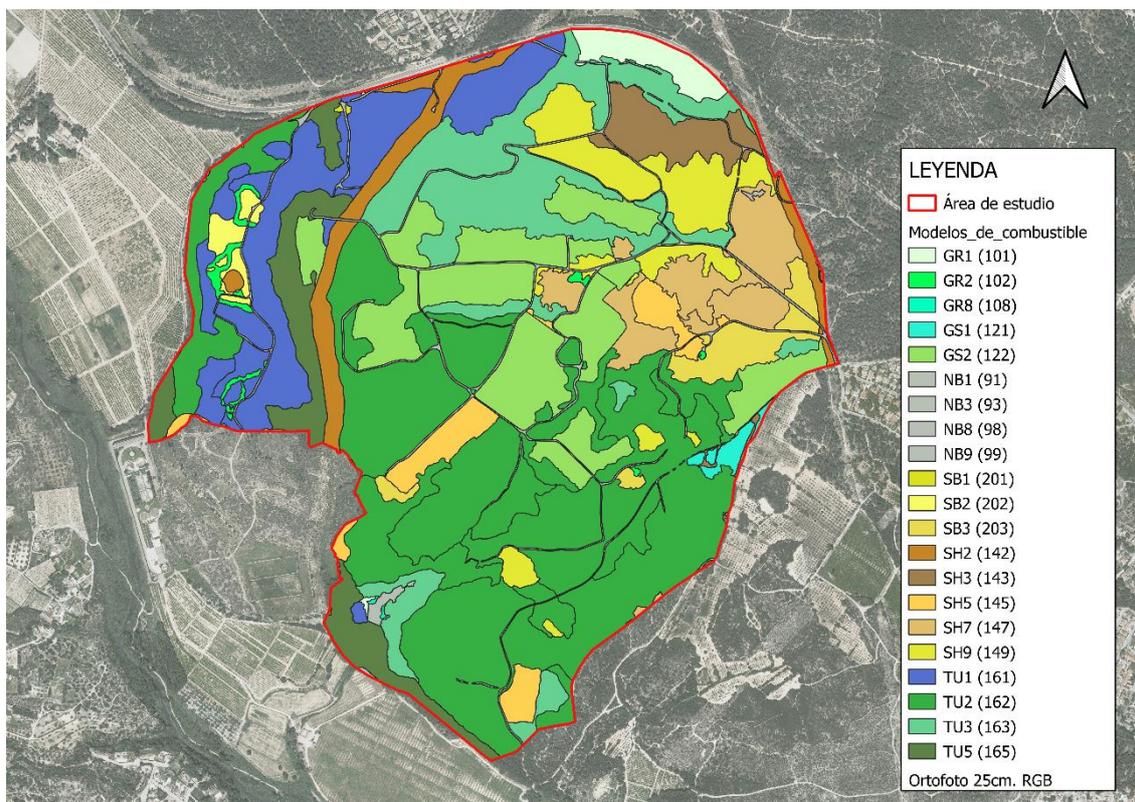


Figura 5. Modelos de combustible de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

1.3. Antecedentes

Una parte importante de la zona de estudio estaba dedicada antiguamente al cultivo de frutales, especialmente de naranjo y almendro. Actualmente esas zonas están en desuso y están en proceso de regeneración natural. En general, las especies arbóreas aún no han alcanzado la zona, pero las especies arbustivas sí han alcanzado los cultivos, aumentando, junto a las herbáceas, la densidad de combustible, pudiendo suponer una mayor continuidad e intensidad de posibles incendios.

En relación a los antecedentes de la zona es necesario estudiar la afección de incendios en el área y en zonas cercanas donde por extinción no afectó, pero podría haberse extendido. La información correspondiente se ha obtenido del *Institut Cartogràfic Valencià*, concretamente de la recopilación de incendios desde el año 1993 hasta la actualidad.

La zona ha sufrido tres incendios de dimensiones considerables en las últimas décadas. Estos sucedieron en los años 1994, 2001 y 2014. Mientras que se produjeron incendios de menor dimensión en zonas cercanas en los años 2003, 2006, 2007, 2008, 2011, 2012, 2015, 2016 y 2017 (Tabla 2; Figura 6).

Tabla 2. Incendios producidos en el Monte de la Vallesa y sus alrededores, especificándose el área que quemó el incendio y cuánto se quemó en el Monte de la Vallesa.

Año	Superficie quemada total (ha)	Superficie quemada zona de estudio (ha)
1994	143.900	89.700
2001	4.500	4.500
2003	0.010	0.010
2006	0.007	0.007
2007	0.204	0.000
2008	0.162/0.070/0.090	0.000
2012	1/0.300	0.000
2014	49.600	19.3
2015	0.306	0.000
2016	0.807	0.000
2017	0.154	0.000

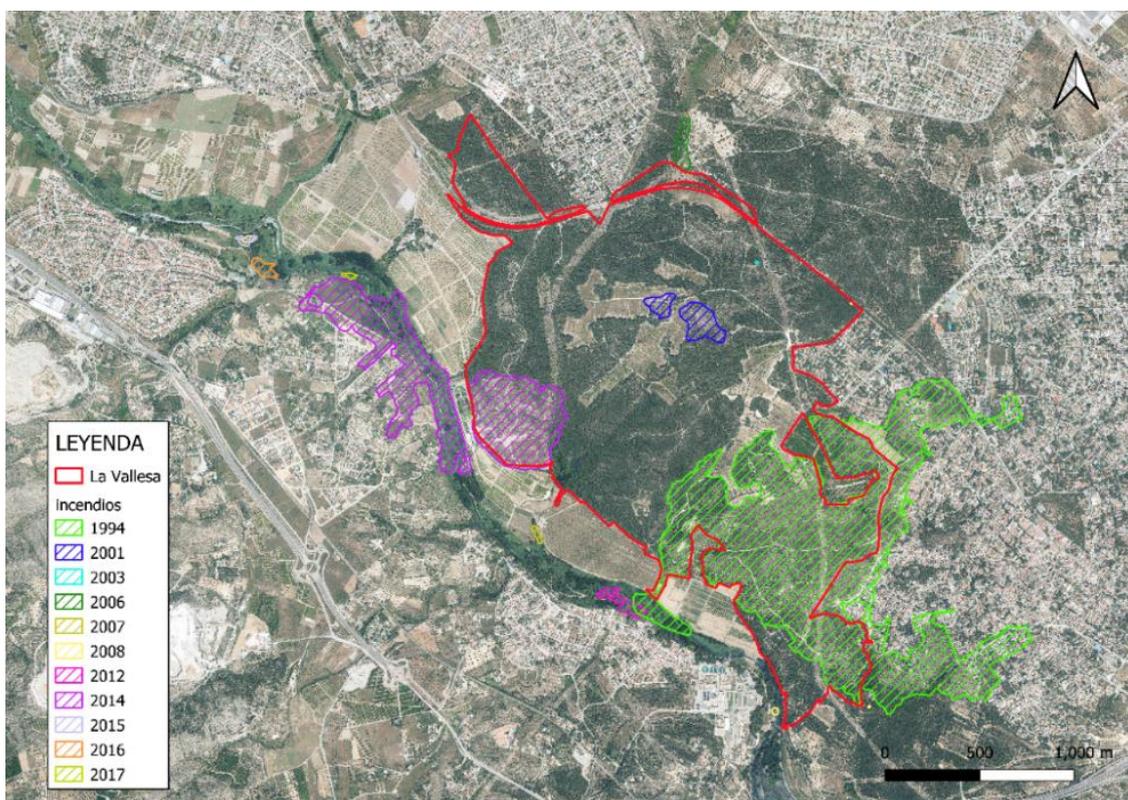


Figura 6. Incendios cercanos y en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

Ante esta situación, se ha desarrollado el proyecto GUARDIAN, comentado con anterioridad. El GUARDIAN está siendo desarrollado por distintas entidades multidisciplinares, el Ayuntamiento de Riba-roja de Túria, Ayuntamiento de Paterna, Hidraqua, Medi XXI, Universidad de Valencia, Universidad Politécnica de Valencia y Cetaqua. Para cumplir con el objetivo se realizan distintas actividades centradas en tres pilares fundamentales:

- Tratamientos selvícolas, con el fin de reducir el combustible disponible.
- Cinturón verde. Selección e introducción de especies más resilientes al fuego.

- Instalación de una red de cañones para llevar a cabo riego preventivo y/o de mantenimiento en las zonas de interfaz urbano forestal.

2. Objetivos

El objeto de este estudio es la estimación del contenido de humedad del combustible (Mf) a través de índices satelitales extraídos de Sentinel-2 para el estudio de la dinámica y evolución del comportamiento de incendio a nivel espacial y temporal de un monte compuesto por 21 modelos de combustible adyacente a una zona urbana, formando una interfaz urbano-forestal. Para ello se han desarrollado los siguientes objetivos específicos:

- Cuantificar el contenido de humedad real del combustible de los modelos de combustible más representativos del monte.
- Identificar el índice espectral o conjunto de índices que mejor se ajuste al contenido de humedad real del combustible.
- Cartografiar el comportamiento del fuego de cada modelo de combustible del monte asociado al contenido de humedad.
- Mostrar la evolución de algunos parámetros del comportamiento del fuego a nivel medio del monte.

3. Material y métodos

El trabajo tiene dos fases principales, la recopilación de datos y su posterior análisis.

3.1. Recopilación de datos

La recopilación de datos tiene como objetivo obtener información sobre la variable dependiente: contenido de humedad del combustible; y de las variables independientes: índices espectrales que se utilizarán en la generación del modelo de humedad del combustible.

3.1.1. Contenido de humedad del combustible (Mf)

El contenido de humedad del combustible se medirá mediante el análisis de muestras tomadas en campo los días de paso del satélite.

3.1.1.1. Selección de los modelos de combustibles (MC) más representativos

En campo se han muestreado el contenido de humedad del combustible de los modelos de combustible (MC) más representativos del área de estudio. No se han muestreado todos los MC debido al tiempo requerido en campo, que debe ceñirse al lapso temporal de paso del satélite, es decir, los muestreos debían hacerse durante la franja horaria que pasaba el satélite Sentinel-2 por la Vallesa, para posteriormente poder relacionarlo con los índices espectrales. Por ello, el trabajo debía hacerse en un horario limitado, restringiendo así el número y zonas de muestreo.

La representatividad de los MC ha sido evaluada por la superficie que abarcaban (Tabla 3). Cabe resaltar que en los modelos de matorral se ha descartado el modelo SH9, porque en la superficie total del monte representa una tercera parte en comparación con el resto de los modelos de matorral, además de que algunas de las zonas clasificadas en su momento como SH9 han pasado a cumplir características de los modelos matorral-arbolado (TU). Además, durante el periodo de recogida de muestras, la zona de muestreo correspondiente al SH2 ha

sufrido tratamientos selvícolas consistentes en desbroces de herbáceas y eliminación de matorral que ha transformado el modelo, y, por tanto, no han podido utilizarse los datos medidos. Por último, en los modelos de arbolado se ha medido el TU5 en vez del TU1 porque las características de este último diferían poco con las del TU2 a diferencia del TU5. Se ajustará más a la realidad si se modeliza el TU1 con los datos de TU2 que si se modeliza TU5 con los de TU3. Por ello, para abarcar las mayores diferencias posibles entre los modelos de arbolado se decidió tomar medidas en TU5, porque en estas zonas fue donde iban a realizarse los tratamientos de SPI, cambiando así su estructura; por tanto, se midieron los otros modelos de matorral + arbolado. Por lo que finalmente se han muestreado los MC: GR1, GS1, SH5, TU2, TU3 y TU5.

Tabla 3. Modelos de combustible y su representación en el monte de la Vallesa y en el área de estudio. Fuente: elaboración propia.

	Modelo	Superficie (ha)	Ocupación (%)
No combustible (NB)	NB1	5.027	2.415
	NB3	0.013	0.006
	NB8	0.355	0.171
	NB9	0.113	0.054
Modelos de pastos (GR)	GR-1	2.955	1.420
	GR-2	1.192	0.572
	GR-8	0.055	0.026
Pastizal-matorral (GS)	GS-1	0.970	0.466
	GS-2	23.233	11.161
Matorral (SH)	SH2	7.461	3.584
	SH3	5.415	2.602
	SH5	4.924	2.366
	SH7	16.099	1.824
	SH9	10.736	5.158
Matorral-arbolado (TU)	TU1	19.686	9.457
	TU2	72.396	34.780
	TU3	21.935	10.538
	TU5	9.545	4.585
Restos de madera (SB)	SB1	0.055	0.026
	SB2	1.500	0.721
	SB3	4.488	2.156

3.1.1.2. Periodo de muestreo

El muestreo se planteó para abarcar el máximo número de periodos climáticos del año, incluyendo tres estaciones, el invierno, la primavera y el verano, por lo que se preveía realizar muestreos desde finales de febrero hasta finales de junio. Los días y la frecuencia vienen marcados por el paso del satélite Sentinel-2 sobre la zona de estudio, el cual es cada 5 días. Esto incluso condiciona la hora en la que se debe hacer la extracción de la muestra, que es a las 11:00 (en hora UTC), aunque por logística se hacía la extracción entre las 10:00 y las 12:00, asumiendo una mínima variación real de la humedad de los combustibles en ese lapso.

Finalmente, el muestreo empezó el 24/02/2022 y finalizó el 14/07/2022. Muestreando un total de cinco días: 24/02, 01/03, 09/06, 14/06 y 14/07. Esta reducción de días de muestreo se debe a diversas razones: i) presencia de nubes por una primavera temprana muy lluviosa, ii) logística del equipo de muestreo (fines de semana, COVID, etc.), iii) problemas externos de acceso al área de estudio, que es una finca privada vallada. La previsión y ejecución del muestreo puede observarse en el anejo 2.

3.1.1.3. Zona de muestreo

De cada MC representativo se recogieron muestras del combustible de tres puntos distintos. Estos puntos se sitúan en las parcelas de mayor extensión de cada MC (ver figura 7). En el caso de las parcelas TU5-SH2 y TU3-GS2 se han situado próximas para poder realizar las medidas en el tiempo estimado. El punto marca el centro del muestro desde donde se hace la extracción del combustible en un radio de 10 m. Esta distancia es fundamental para evitar el solapamiento de los píxeles de Sentinel-2, ya que la resolución de este satélite es de 10x10m (ver figura 7).

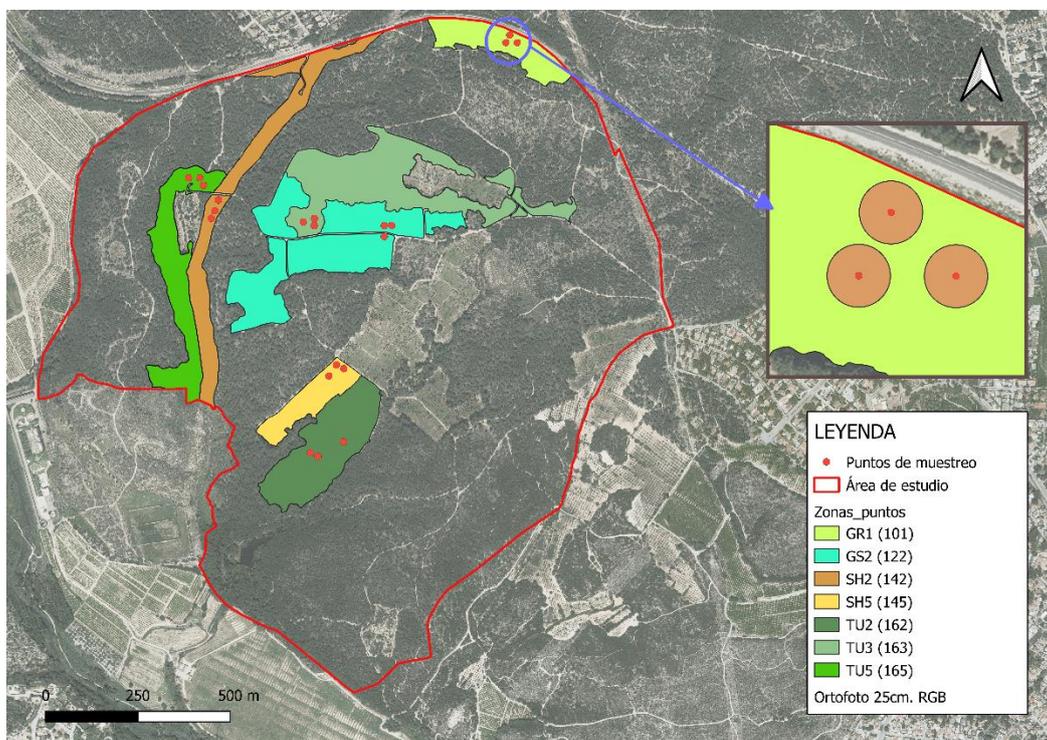


Figura 7. Localización puntos de muestreo y ejemplo del área de trabajo. Fuente: elaboración propia

3.1.1.4. Muestreo y procesado de los diferentes componentes de combustibles.

Como el combustible está formado por los elementos del combustible vivo y muerto, y sus subcomponentes, los cuales tienen diferentes contenidos de agua debido a su forma, composición celular o estado, se tomaron submuestras por separado (Tabla 4). La cantidad de materia a recoger era un “puñado” de cada muestra, que equivaldría al peso recogido en la Tabla 5.

Tabla 4. Clasificación de muestras tomadas. Fuente: elaboración propia.

Combustible vivo	Herbáceo: muestras del estrato herbáceo de la zona.	
	Matorral: muestras del estrato arbustivo	
Combustible muerto	Mantillo (“duff”): materia orgánica parcialmente descompuesta en el suelo.	
	Miscelánea: restos orgánicos de la vegetación, excluyendo las hojas muertas. Forman parte de este grupo las piñas y la corteza.	
	Hojas muertas: muestra de la hojarasca	
	Restos leñosos:	1h: material leñoso de diámetro inferior a 6mm 10h: material leñoso de diámetro comprendido entre 6 y 75 mm 100h: material leñoso de diámetro mayor a 75mm

Tabla 5. Promedio del peso de las muestras tomadas. Fuente: elaboración propia.

Tipo de muestra	Peso (g)
duff	40
1h	15
10h	40
100h	200
miscelánea	35
hojas muertas	10
herbáceo	4
matorral	8

Quando se recogen las muestras, se guardan en bolsas de plástico bien cerradas, para evitar la pérdida de humedad en el transporte a laboratorio. Por ello, y por la dificultad de obtención, los primeros días no se muestreó el 100h. Después se trasladan las muestras al laboratorio. El trabajo de laboratorio consiste en pesar las muestras recién traídas de campo y realizarles el proceso de secado correspondiente en estufa a una temperatura aproximada de 60 °C durante 48h (Caramelle y Clement, 1978). Acabado el proceso de secado, vuelven a pesarse las muestras, obteniendo el peso de la muestra seca, sin el agua libre que tenían. Finalmente se obtiene mediante la humedad relativa, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{humedad relativa} = \frac{\text{muestra húmeda} - \text{muestra seca}}{\text{muestra seca}}$$

Con la humedad de cada variable obtenida se calculan los valores de humedad del combustible vivo, muerto y el total. Para ello se utilizan las fórmulas de Rothermel para cada modelo de combustible (Tabla 6).

Tabla 6. Fórmulas para el cálculo de la humedad de combustible (Andrews, 2018).

MC	Humedad del combustible vivo (Mf.live)	Humedad del combustible muerto (Mf.dead)	Humedad del combustible total (Mf.tot)
GR1	1*herbáceo	0.73*hojas muertas +0.27*1h	1*Mf.dead
GS2	1*matorral	0.51*hojas muertas+0.47*1h +0.03*10h	0.54*Mf.dead+0.46*Mf.live
SH5	herbáceo*0.5+matorral*0.5	0.92*1h+0.08*10h	0.39*Mf.dead+0.61*Mf.live
TU2	herbáceo*0.5+matorral*0.5	0.9*1h+0.1*10h	0.87*Mf.dead+0.13*Mf.live
TU3	1*matorral	0.34*hojas muertas+0.65*1h +0.01*10h	Mf.dead*0.66+Mf.live*0.34
TU5	herbáceo*0.5+matorral*0.5	0.92*1h+0.07*10h+0.01*	0.74*Mf.dead+0.26*Mf.live

3.1.2. Índices espectrales

Los índices espectrales son combinaciones de las bandas espectrales registradas por los satélites de teledetección. Se calculan mediante operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales. Se obtienen unos valores por píxel relacionados con características del medio biótico y abiótico, como pueden ser la humedad del suelo o el índice de área foliar.

En este estudio los índices espectrales se han obtenido a partir de las imágenes satelitales de Sentinel-2 mediante la plataforma de *Google Earth Engine*. Este cálculo y extracción de índices se ha realizado por cada punto y día de muestreo. Debido a que no hay un índice que a priori tenga mejor relación con el contenido de humedad, se han utilizado un total de 13 índices, los cuales son: NDVI, NDII, NBRI, EVI, EVI2, ARVI, SAVI, SIPI, GCI, GLI, RGR, MSI y VARI (Tabla 7).

- El índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) utiliza las bandas espectrales roja y cercana al infrarrojo. El NDVI mide “el verdor”, por ello, es muy utilizado para identificar zonas forestales. Los valores altos de NDVI corresponden a áreas que reflejan más en el espectro del infrarrojo cercano, que corresponde con una vegetación más densa y saludable (Gu, 2019). El rango de valores oscila entre -1 y 1. Cuanto mayor es la densidad y más verde es la vegetación mayor es el valor del índice.

- El Índice Infrarrojo de diferencia normalizada (NDII). Utiliza las bandas de infrarrojo cercano y el de longitud media. Se ha utilizado para medir la humedad en la vegetación. El rango de valores oscila entre -1 y 1. La vegetación verde suele tener un valor de 0.02 a 0.6. El índice de Calcinación Normalizado (NBRI). Utiliza las bandas espectrales de infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, que son sensibles a los cambios en la vegetación, se ha utilizado para detectar áreas quemadas y monitorear la recuperación del ecosistema (Gu, 2019). El rango de valores oscila entre -1 y 1. Donde:

- < -0.25: alto crecimiento de vegetación posterior al incendio.
- -0.25 a -0.1: bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego.

- -0.1 a 0.1: zonas sin quemar.
- 0.1 a 0.27: zonas quemadas con gravedad baja.
- 0.27 a 0.44: zonas quemadas con gravedad moderada-baja.
- 0.44 a 0.66: zonas quemadas con gravedad moderada-alta.
- < 0.66: zonas quemadas con gravedad alta.

- Índice de Vegetación Mejorado (EVI). Es un índice similar al NDVI y puede ser usado para cuantificar el verdor de la vegetación. Sin embargo, EVI corrige algunas condiciones atmosféricas y el ruido de fondo del dosel y es más sensible en áreas con vegetación densa. El rango de valores es de -1 a 1, los valores entre 0.20 a 0.80 representan una vegetación saludable.

- Índice de Vegetación Mejorado 2(EVI2). Mejora del EVI. El rango de valores es de -1 a 1, los valores entre 0.20 a 0.80 representan una vegetación saludable.

- Índice de Clorofila (GCI). Utiliza las bandas infrarroja cercana y verde. Se ha utilizado tradicionalmente para estimar el contenido de clorofila en las hojas de diversas especies de plantas. Su valor oscila en un rango de 0 – 10. Los valores negativos representan masas de agua, los valores de 0 a 1 vegetación enferma y de 2.9 a 9.8: vegetación saludable.

- Índice de hoja verde (GLI). Utiliza las bandas roja, verde y azul. Se utiliza para identificar extensiones de vegetación. Presenta gran sensibilidad a la hora de identificar todos aquellos elementos verdes y oscuro

- Índice de Estrés Hídrico (MSI). Utiliza las bandas infrarrojo cercano y de media distancia. Se utiliza para el análisis de estrés en la vegetación. Los valores más altos del índice indican un mayor estrés hídrico de las plantas y, en inferencia, un menor contenido de humedad del suelo. Los valores de este índice van de 0 a más de 3, siendo el rango común para la vegetación verde de 0.2 a 2 (Welikhe et al., 2017).

- Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI). Se calcula mediante las bandas infrarrojo cercano, roja y azul. Es parecido al NDVI pero corrige errores debido a la dispersión atmosférica. Los valores oscilan en un rango de -1 a 1. Los valores entre 0.20 a 0.80 son en los que oscila la vegetación verde.

- Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). Los valores oscilan en un rango de -1 a 1. Los valores positivos indican presencia de vegetación, siendo mayor cuanto más grande es el valor. Es parecido al NDVI, pero está ajustado para minimizar las influencias del brillo del suelo

- Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura (SIPI). Se calcula mediante las bandas infrarrojo cercano, roja y azul. Es un buen índice para realizar el análisis de la vegetación con la estructura variable del dosel. Estima la relación entre carotenoides y clorofila: el aumento del valor de las señales de la vegetación estresada (EOS, 2019).

- Red Green Ratio (RGR). Se obtiene mediante el uso de las bandas roja y verde. Su valor oscila de 0.1 a 8.0. La vegetación verde saludable suele tener valores que van de 0.7 a 3.

- Índice de resistencia atmosféricamente visible (VARI). Se obtiene mediante el uso de las bandas roja, verde y azul. Su valor oscila de 0.1 a 8.0. La vegetación verde saludable suele tener valores que van de 0.7 a 3.

Tabla 7. Índices espectrales utilizados. Fuente: elaboración propia.

ÍNDICE	FÓRMULA	Rango de valores	Bibliografía
NDVI	$(NIR - RED) / (NIR + RED)$	-1 a 1	Tucker, C.J. et al., 1979
NDII	$(NIR - MidIR) / (NIR + MidIR)$	-1 a 1	Hardinsky, M.A. et al., 1983
NBRI	$NBRI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	-1 a 1	Key, C.H. et al., 2002
EVI	$G * ((NIR - R) / (NIR + C1 * R - C2 * B + L))$	-1 a 1	Huete, A.R., 1999
EVI2	$2.4 * ((NIR - RED) / (NIR + RED + 1))$	-1 a 1	Miura, T. et al., 2008
GCI	$(NIR) / (Green) - 1$	0 a 10	Merton, R.N. et al., 1998
GLI	$((GREEN - RED) + (GREEN - BLUE)) / ((2 * GREEN) + RED + BLUE)$	0 a 255	Gobron, N. et al., 2000
MSI	$MidIR / NIR$	0 a 3	Hunt, E., 1989
ARVI	$(NIR - (2 * RED) + BLUE) / (NIR + (2 * RED) + BLUE)$	-1 a 1	Huete, A.R. et al., 1994
SAVI	$((NIR - R) / (NIR + R + L)) * (1 + L)$	-1 a 1	Huete, A.R., 1988
SIPI	$(NIR - Blue) / (NIR - Red)$	0 a 2	Penuelas J. et al., 1995
RGR	$RED / GREEN$	0.1 a 8	Gamon, J.A. et al., 1999

3.2. Análisis de datos

Obtenidos los datos de humedad y el valor de los índices se proceden a analizar los datos.

3.2.1. Preparación de los datos

3.2.1.1. Escalado y normalización

En primer lugar, se hace un escalado de todos los parámetros que entran en juego en la calibración del modelo, el nuevo rango que se ha dado a las variables es de 1 a 10, este proceso se ha realizado con la función rescale de Rstudio. Con los datos escalados obtenidos se hace una evaluación para ver si son paramétricos o no paramétricos. Para ello, se va a realizar el test de Shapiro-Wilk. Mediante la función "Shapiro.test" de Rstudio. El test de Shapiro-Wilks plantea la hipótesis nula que una muestra proviene de una distribución normal. Se establece un nivel de significancia de 0.05, y tenemos una hipótesis alternativa que sostiene que la distribución no es normal.

En los resultados si el p-valor es mayor a 0.05 es normal, y si no, no hay normalidad en los datos. Una vez estudiada la normalidad, si hay variables no paramétricas, deben convertirse. Para ello, se utilizan las siguientes formulas (tabla 9).

Tabla 8. Fórmulas de normalización. Fuente: elaboración propia.

Valor de lambda	Transformación
-2	$1/y^2$
-1	$1/y$
-0.5	$1/y^{0.5}$
0	$\log(y)$
0.5	$Y^{0.5}$
1	Ninguna

2	Y ²
---	----------------

Para obtener lambda se ha utilizado la función “powertransform” de Rstudio. Antes de poder utilizar la herramienta, se han tenido que escalar las variables de 1 a 10, porque la función de Rstudio solo admite valores mayores a 0, y había índices con valores menores. Las fórmulas solo se han aplicado si el p-valor era menor a 0.05.

3.2.2. Análisis exploratorio del contenido de humedad e índices espectrales de los modelos de combustible muestreados

3.2.2.1. Estadística básica

Obtenidos los datos normalizados se procede a realizar un análisis de estadística básica. Para ello, se ha utilizado la función *summary* de Rstudio. Se han obtenido los valores mínimos, máximos, la media y la desviación estándar de cada variable.

3.2.2.2. Boxplot y valores atípicos

Se obtiene el boxplot (diagrama de caja y bigotes) de los modelos de combustible para la humedad del combustible, tanto la del vivo, como la del muerto y la total. Este tipo de gráficos permite identificar valores atípicos y comparar distribuciones. Además de conocer de una forma cómoda y rápida como el 50% de los valores centrales se distribuyen.

3.2.2.3. Estudio de diferencias significativas

Para estudiar si hay diferencias significativas entre los modelos de combustible según cada variable, se ha utilizado el análisis de la varianza (ANOVA), que se ha obtenido mediante la función *aov* de Rstudio (R 4.1.2). Este análisis compara las varianzas entre las medias (o el promedio) de diferentes grupos. Si el valor obtenido de p-valor es menor a 0.05 es que hay diferencias significativas entre las medias. Si las medias son significativamente distintas, se realiza el test post-hoc, que determina entre qué grupos específicos existen diferencias estadísticamente significativas mediante pruebas de comparación múltiple post hoc. Para ello, se utiliza la función “TukeyHSD” de Rstudio. Si el valor obtenido de p-valor es menor a 0.05 es que hay diferencias significativas.

3.2.3. Modelización de la humedad del combustible

El modelo de humedad de combustible se ha generado utilizando un modelo de regresión lineal, metodología con buenos resultados en distintos estudios (Roldan et al, 2003; Chuvieco, 2008). Se calculan dos tipos de este modelo:

- Modelo de regresión lineal simple o univariable: está compuesto por una variable dependiente y una variable independiente.

$$y = \alpha + \beta_1 * x_1$$

- Modelo de regresión lineal múltiple o multivariable: está compuesto por una variable dependiente y más de una variable independiente.

$$y = \alpha + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \dots + \beta_n * x_n$$

Donde: y : variable dependiente; α : ordenada en el origen (constante); β : pendiente de la recta (constante); x : variable independiente.

3.2.3.1. Correlaciones

El primer paso es realizar un análisis de las correlaciones, para poder identificar los índices más relacionados con la humedad de combustible y , posteriormente usarlos en el modelo. Además de obtener las correlaciones entre índices para evitar sobreestimaciones. Las correlaciones realizadas se han hecho mediante el método de Pearson, utilizando la función `cor.test` de Rstudio (V 4.1.2).

El rango de valores de la correlación es -1 a 1, donde:

- El valor 1 significa una perfecta asociación de rango.
- El valor 0 significa que no hay asociación de rangos.
- El valor -1 significa que hay una asociación negativa de los rangos.

Los valores de correlación se comparan con las directrices de Cohen (Cohen, 1988). Estas directrices exponen que:

- Una correlación ≤ 0.1 representa una asociación débil entre las variables estudiadas.
- Una correlación ≈ 0.3 representa una asociación moderada.
- Una correlación ≥ 0.5 representa una correlación alta.

3.2.3.2. Calibración de los modelos de regresión lineal simple

Estos modelos son los más comunes en la bibliografía consultada. Se calcula un modelo por cada índice espectral, que será la variable independiente. Posteriormente se obtiene el valor de R^2 , que refleja la variación de la variable de respuesta que explica su relación con la variable predictora, y así conocer qué índice da resultados más ajustados a la realidad. Con la R^2 calculada, se calculan los valores predichos para poder calcular el error cuadrático medio (RMSE), que compara los valores predichos (generados con el modelo) con los observados (generados con las medidas de campo). La fórmula de dicho error es:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

Donde,

- \hat{y} : valores predichos
- y : valores observados
- n : números de mediciones

Los modelos se escogerán en función del resultado obtenido de R^2 y RMSE.

3.2.3.3. Calibración de los modelos de regresión lineal múltiple

Se han calibrado diferentes modelos a través de dos metodologías diferentes: i) selección de modelo manual, ii) selección modelo paso a paso por AIC (Akaike Information Criteria). Con el método manual se generan modelos múltiples mediante la combinación de varios índices espectrales, se marcaron dos criterios a seguir para la combinación de índices: i) los índices

incluidos deben tener una alta correlación con el Mf y ii) los índices deben ser independientes por lo que la correlación entre ellos debe ser baja. Las de igual combinación son limitadas porque la correlación entre índices suele ser mayor a 0.7. La selección del modelo paso a paso por AIC, se realizó a través de la función stepAIC de Rstudio del paquete MASS, que da la selección de variables en un modelo de regresión, dando al final la mejor opción de todos los modelos analizados. De igual modo que en los modelos simples, todos los posibles modelos se evaluaron a través de los parámetros R^2 y el RMSE.

3.2.5. Cartografía del comportamiento del fuego

El último paso es cartografiar el comportamiento del fuego, es importante cartografiarlo para poder prevenir incendios mediante riegos prescritos, utilizando los cañones instalados en las zonas de interfaz urbano-forestal. Además de poder prevenir el incendio, también puede usarse la cartografía para la extinción de un posible incendio, porque se han obtenido los valores de los parámetros que regulan el comportamiento del fuego, por lo tanto, se tiene una idea previa de como el incendio va a comportarse.

Conocer el comportamiento del fuego a nivel de monte ayuda a detectar zonas de especial peligrosidad, lo que permite poder definir qué zonas necesitan un tratamiento de forma prioritaria. El comportamiento del fuego se define generalmente en términos de ignición, desarrollo de la llama, propagación del fuego y otros fenómenos relacionados. En este estudio se ha modelado el comportamiento del fuego de superficie a través de ecuaciones empíricas y quasi-empíricas clásicas donde los componentes más relevantes son la velocidad de propagación (Rothermel, 1972; Albini 1976a), el calor por unidad de superficie (Andrews and Rothermel, 1982) y la longitud de la llama (Byram, 1959). Estos parámetros son la base de las tablas de las características del comportamiento del fuego de superficie y de copas, las cual evalúan el método de extinción preferente y por la peligrosidad del fuego (Andrews, 2011). Estos modelos junto con la definición, extracción y/o estimación de sus variables de entrada se han implementado en Google Earth Engine (GEE, <https://earthengine.google.com/>).

Los parámetros de entrada a estos modelos se categorizan en tres grandes grupos:

- i) Partículas del combustible, que son las propiedades intrínsecas de las partículas de combustible para un ecosistema particular.
- ii) Conjunto del combustible, relacionadas las características intrínsecas del modelo de combustible.
- iii) Situación ambiental, que caracterizan el contenido de humedad del combustible, la meteorología y la topografía.

Los parámetros específicos se pueden observar en la Tabla 9. La distribución y variación temporal y espacial de estos parámetros tiene gran relevancia a la hora de introducirlas en la plataforma GEE, debido a que las entradas que son constantes temporalmente tendrán un formato de imagen y las entradas que son variables en el tiempo necesitarán un formato de colección de imágenes. Las variables que representan las partículas del combustible son constantes espacial y temporalmente, y sus valores se han obtenido de Andrews (2018), siendo: $h = 8.000 \text{ Btu/lb}$, $ST = 0.0555 \text{ lb}_{\text{mineral}}/\text{lb}_{\text{madera}}$, $Se = 0.010 (\text{lb}_{\text{mineral}} - \text{lb}_{\text{silice}})/\text{lb}_{\text{madera}}$ y $pp = 32 \text{ lb/ft}^3$. Por otro lado, los valores de conjunto del combustible son parámetros que varían espacialmente, pero se mantienen constantes temporalmente, debido a que sus valores están asociados al modelo de combustible. Estos valores se pueden encontrar en el anexo III y se han tomado de Andrews (2018). Por último, la situación ambiental, el contenido de humedad varía tanto temporalmente como espacialmente y su estimación viene dada por las ecuaciones

desarrolladas en la Tabla 6. Por otro lado, la velocidad del viento se ha asumido que es la misma en toda el área de estudio, por lo que solo varía temporalmente y su dato es extraído de una estación meteorológica instalada en una parcela experimental situada dentro del área de estudio y la pendiente varía espacialmente según la topografía del terreno, este dato se extrajo a través de métodos LiDAR.

Tabla 9. Parámetros de entrada para la estimación de los parámetros de comportamiento del fuego. En la columna GEE se especifica el tipo de variación temporal o espacial que presentan: CET: constante espacial y temporalmente, CT: constante temporalmente, pero variables espacialmente, CE: constante espacialmente, pero variables temporalmente y VET: variables espacialmente y temporalmente, además del tipo de formato que tienen: I: imagen o CI: colección de imágenes.

Tipo	Parámetro	Símbolo	GEE
Partículas del combustible	Contenido de calor (Btu/lb)	h	CET I
	Contenido total de minerales (fracción)	ST	CET I
	Contenido efectivo de minerales (fracción)	Se	CET I
	Densidad de las partículas secadas al horno (lb/ft ³)	pp	CET I
Conjunto del combustible	Relación superficie-área-volumen (ft ² /ft ³)	σ	CT I
	Carga de combustible seca en el horno (lb/ft ²)	Wo	CT I
	Profundidad del lecho de combustible (ft)	δ	CT I
	Humedad del combustible muerto de la extinción (fracción)	Mx	CT I
Situación ambiental	Contenido de humedad (fracción)	Mf	VET CI
	Velocidad del viento a media altura de la llama (ft/min).	U	CE CI
	Pendiente (fraction)	tan φ	CT I

El modelo de combustible obtenido está normalizado, para incluir el modelo en el cálculo del comportamiento de fuego deben obtenerse los valores reales, para ello, se ha obtenido una ecuación que relaciona los parámetros reales (calculados a partir de datos de campo) y los normalizados, con esta función se convertirán los datos de los índices espectrales utilizados (variable independiente) y los de la humedad (variable dependiente) en valores reales.

A continuación, estos parámetros de entrada sirven para calcular los parámetros definitivos que permitirán modelizar el comportamiento potencial del fuego, utilizando para ello las ecuaciones recogidas de la Tabla 10. Los resultados más relevantes son los parámetros anteriormente mencionados: velocidad de propagación (R , ft/min), el calor por unidad de superficie (H_A , Btu/ft²) y la longitud de la llama (F_B , ft). Específicamente, R es la relación entre el flujo de calor recibido de la fuente y el calor necesario para la ignición del conjunto de combustibles que se está estudiando, H_A es la cantidad de energía calorífica liberada por unidad de superficie en el frente de la llama y F_B es la distancia desde la llama media hasta el centro del frente de la llama en la base del del fuego. Cabe destacar que F_B se calcula a partir de la intensidad de la línea de fuego (I_B , Btu/ft/s), el cual, es el producto de R y H_A (Albini, 1976a). Eso hace que recoja información combinada de ambos parámetros, por lo cual se le prestará mayor atención. Al igual que con los parámetros de entrada, estos cálculos y

resultados obtenidos están implementados en GEE por lo que tienen asociado un formato y una variabilidad temporal y espacial.

Tabla 10. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de los parámetros de comportamiento del fuego: velocidad de propagación (R , ft/min), el calor por unidad de superficie (H_A , Btu/ft²) y la longitud de la llama (F_B , ft). En la columna GEE se especifica en el tipo de variación temporal o espacial que presentan: CET: constante espacial y temporalmente, CT: constante temporalmente, pero variables espacialmente, CE: constante espacialmente, pero variables temporalmente y VET: variables espacialmente y temporalmente, además del tipo de formato que tienen: I: imagen o CI: colección de imágenes.

Elemento	Ecuación	Fuente	GEE
Velocidad de propagación (ft/min)	$R = \frac{I_R \xi (1 + \phi_W + \phi_S)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}$	[1]	VET CI
Intensidad de reacción (Btu/ft ² - min)	$I_R = \Gamma' w_n h \eta_M \eta_s$	[1]	VET CI
Velocidad óptima de reacción (min ⁻¹)	$\Gamma' = \Gamma'_{max} (\beta / \beta_{op})^A \exp[A(1 - \beta / \beta_{op})]$	[1]	CT I
Parámetro de cambio de ecuación de Albini a Rothemel	$A = 133 \sigma^{-0.7913}$	[2]	CT I
Máximo velocidad de reacción (min ⁻¹)	$\Gamma'_{max} = \sigma^{1.5} (495 + 0.0594 \sigma^{1.5})^{-1}$	[1]	CT I
Optimum packing ratio	$\beta_{op} = 3.348 \sigma^{-0.8189}$	[1]	CT I
Packing ratio	$\beta = \rho_b / \rho_p$	[1]	CT I
Densidad aparente seca del horno (lb/ft ³)	$\rho_b = w_o / \delta$	[1]	CT I
Carga neta de combustible (lb/ft ²)	$w_n = w_o (1 - S_T)$	[2]	CT I
Coefficiente de amortiguación de la humedad	$\eta_M = 1 - 2.59 r_M + 5.11 (r_M)^2 - 3.52 (r_M)^3$	[1]	VET CI
	$r_M = M_f / M_x \text{ (max = 1.0)}$	[1]	VET CI
Coefficiente de amortiguación del mineral	$\eta_s = 0.174 S_e^{-0.19} \text{ (max = 1.0)}$	[2]	CET I
Ratio del flujo de propagación	$\xi = (192 + 0.2595 \sigma)^{-1} \exp[(0.792 + 0.681 \sigma^{0.5})(\beta + 0.1)]$	[1]	CT I
Factor viento	$\phi_W = C U^B (\beta / \beta_{op})^{-E}$	[1]	VET CI
Factor cálculo del viento C	$C = 7.47 \exp(-0.133 \sigma^{0.55})$	[1]	CT I
Factor cálculo del viento B	$B = 0.02526 \sigma^{0.54}$	[1]	CT I
Factor cálculo del viento E	$E = 0.71 \exp(-3.59 \times 10^{-4} \sigma)$	[1]	CT I

Pendiente	$\phi_s = 5.275\beta^{-0.3}(\tan \phi)^2$	[1]	CT I
Valor del calentamiento efectivo	$\varepsilon = \exp(-138/\sigma)$	[1]	CT I
Calor de preignición (Btu/lb)	$Q_{ig} = 250 + 1116M_f$	[1]	VET CI
Tiempo de permanencia (min)	$t_r = 384/\sigma$	[3]	CT I
Calor por unidad de superficie (Btu/ft ²)	$H_A = I_R t_r$	[4]	VET CI
Intensidad de la línea de fuego (Btu/ft/s)	$I_B = H_A R / 60$ $I_B = I_R t_r R / 60$	[2] [5]	VET CI
Longitud de llama (ft)	$F_B = 0.45I_B^{0.46}$	[5]	VET CI

^aFuente: [1] = Rothermel (1972); [2] = Albini (1976a); [3] = Anderson (1969); [4] = Andrews and Rothermel (1982); [5] = Byram (1959)

Finalmente, se obtendrá un mapa y una gráfica para el parámetro de longitud de llama (F_B , ft).

4. Resultados y discusión

4.1. Preparación de datos

El estudio de normalidad mediante Shapiro-Wilks ha dado como resultado que los índices NDVI, NDII, NBRI y ARVI, es decir 4 de los 12 son normales por lo que no necesitan transformación. Por otro lado, el Mf y sus componentes son no normales, por lo que todos han necesitado ser normalizados (Tabla 11). Al realizar las transformaciones nos aseguramos que podemos continuar con métodos paramétricos para el desarrollo y calibración del modelo.

Tabla 11. Resultados del test de Shapiro-Wilks. Fuente: elaboración propia.

Índice	p-value	Valor lambda	p-value (lambda)	Formula a aplicar en normalización
NDVI	0.0011	0.9191	0.7123	ninguna
NDII	0.1713	0.9081	0.2798	ninguna ya es paramétrica
NBRI	0.0278	0.8993	0.6682	ninguna
EVI	0.0012	0.5228	0.0118	$Y^{0.5}$
GCI	0.0000	0.3121	0.0001	$Y^{0.5}$
EVI2	0.0000	0.3020	0.0001	$Y^{0.5}$
GLI	0.0080	0.4716	0.0101	$Y^{0.5}$
MSI	0.0224	0.4868	0.0070	$Y^{0.5}$
ARVI	0.0029	0.7758	0.2831	ninguna
SAVI	0.0249	0.6312	0.0599	$Y^{0.5}$
SIPI	0.0000	-0.4581	5.55E-15	$1/Y^{0.5}$
RGR	0.0003	0.4788	0.0265	$Y^{0.5}$
VARI	0.0003	-0.1566	0.0456	$Y^{0.5}$
Mf total	1.71E-14	-0.2150	3.46E-14	log(y)

Mf vivo	2.14E-13	-0.1854	3.34E-15	log(y)
Mf muerto	2.20E-16	-0.1556	3.46E-15	log(y)
Duff	0.00000	-3.4717	2.22E-16	1/Y ²
1h	2.20E-16	-2.1176	2.22E-16	1/Y ²
10h	2.58E-16	-2.3771	2.22E-16	1/Y ²
100h	3.50E-05	-0.5849	4.15E-06	1/Y ^{0.5}
Miscelanea	3.35E-10	-1.3129	2.22E-16	1/Y ²
hojas muertas	8.83E-15	-1.9279	2.22E-16	1/Y ²
Herbáceo	2.09E-12	-0.7874	2.22E-16	1/Y
Matorral	1.09E-15	-1.2669	2.22E-16	1/Y ²

4.2. Patrones de contenido de humedad de los modelos de combustible muestreados

4.2.1. Estadística básica general

En este apartado se exponen los valores mínimos, máximos, la media, la desviación estándar de cada variable, el primer y tercer cuartil de cada variable (Tabla 12). Como cabe esperar, se observa que el combustible vivo tiene un mayor porcentaje de agua, y además que la variación de la humedad es mayor (1.628 ± 1.250) que el combustible muerto (0.231 ± 0.570). Por otro lado, se ha observado una tendencia de pérdida de humedad del combustible vivo desde el comienzo del muestreo en febrero hasta la última etapa de muestreo con el verano. Este puede ser un indicio del estrés hídrico que sufre la vegetación en el periodo seco. Por, otro lado, los índices espectrales que representan la salud de la vegetación en relación con su verdor (p.e. EVI y GCI) han dado como resultado valores promedios que representan vegetación sana, pero en el límite de los valores mínimos aceptables (0.20 y 2.9). Los índices con mayor desviación estándar (MSI y GCI) suelen usarse para monitorear estrés de la vegetación por falta de agua (López y Caselles, 1991; Gitelson et al., 1996). Concretamente el MSI, es un índice específico del estrés hídrico cuyo rango va de 0 a 3, siendo 0.906 ± 0.230 el valor de medio del área de estudio, lo que le posiciona en una zona poco favorable. En resumen, estos resultados muestran el estrés hídrico y a la falta de hidratación del combustible vivo y muerto.

Tabla 12. Resultados de estadística básica (3rd Qu: tercer cuartil, 1st qu: primer cuartil, sd: desviación estándar). Fuente: elaboración propia Fuente: elaboración propia.

	mínimo	máximo	mediana	media	3rd Qu	1st Qu	sd
mf.muerto	0.006	4.284	0.088	0.231	0.183	0.055	0.570
mf.vivo	0.609	7.649	1.271	1.628	1.948	0.935	1.250
mf.total	0.007	4.625	0.421	0.582	0.728	0.272	0.640
NDII	-0.153	0.317	0.052	0.058	0.159	-0.066	0.130
NBRI	-0.017	0.547	0.278	0.263	0.371	0.110	0.150
NDVI	0.260	0.803	0.568	0.521	0.637	0.365	0.160
EVI	0.175	0.517	0.285	0.282	0.304	0.242	0.070
GCI	1.076	4.826	2.411	2.460	2.695	1.664	0.940
EVI2	0.078	0.211	0.114	0.117	0.122	0.102	0.030
GLI	-0.019	0.355	0.115	0.111	0.179	0.017	0.090

MSI	0.551	1.362	0.901	0.906	1.088	0.698	0.230
ARVI	0.057	0.658	0.374	0.322	0.447	0.150	0.170
SAVI	0.179	0.481	0.287	0.283	0.312	0.246	0.060
SIPI	1.049	1.673	1.133	1.241	1.412	1.090	0.190
RGR	0.610	1.402	0.951	1.019	1.248	0.841	0.220
VARI	0.258	0.318	0.279	0.276	0.305	-0.157	0.070

4.2.2. Boxplot MC y Mf

En este apartado se adjunta el diagrama de caja y bigotes de los modelos de combustible frente a la humedad del combustible, tanto la del muerto (Figura 8), como la del vivo (Figura 9) y la total (Figura 10). Además, se presenta una tabla donde se observa la media y la desviación estándar de la humedad para cada modelo de combustible (Tabla 13). Pueden observarse *outliers*, es decir, un valor que es numéricamente distante del resto de los datos. No todos los que aparentan serlo son *outliers*, pero sí lo son los dos valores del TU2 y un valor del TU5.

La humedad del combustible muerto es considerablemente mayor en los modelos de arbolado (TU). Esto puede explicarse por la cobertura arbórea, que disminuye la temperatura y disminuye la fuerza y velocidad del viento, factores claves en el proceso de desecado de los combustibles. La humedad del combustible vivo, en cambio, es bastante parecida en todos los modelos, exceptuando el modelo de pastizal (GR1), esta diferencia puede deberse principalmente a la diferencia de especies herbáceas presentes en los modelos: mientras que en el resto de las modelos había una clara dominancia de gramíneas de carácter xérico, en la zona de pastos también había especies de hoja ancha con mayor contenido de humedad; algunas pertenecen a la familia Asteraceae. Además, la competencia en el pastizal por los recursos de agua era menor. La desviación estándar es elevada al compararla con el resto de modelos de combustible, dado que el componente herbáceo en el pastizal está al descubierto, mientras que el resto de modelos tienen una cubierta de matorral y árboles, que permite regular algunos parámetros como la temperatura y el viento.

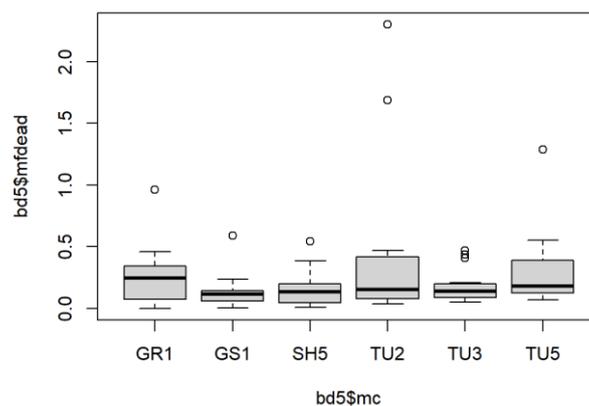


Figura 8. Box plot de la humedad del combustible muerto (eje y) vs los modelos de combustible (eje x). Fuente: elaboración propia.

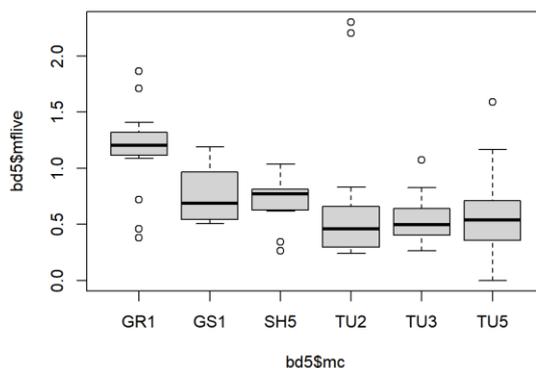


Figura 9. Box plot de la humedad del combustible vivo (eje y) vs los modelos de combustible (eje x). Fuente: elaboración propia.

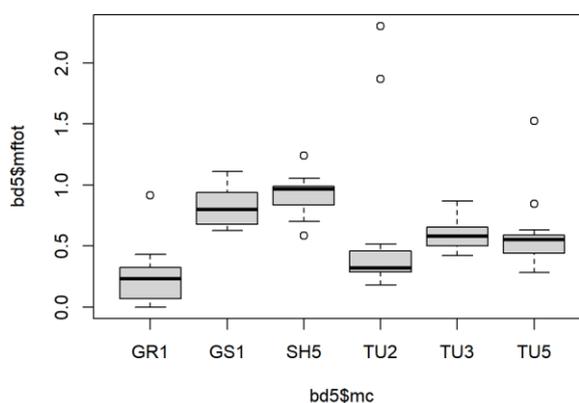


Figura 10. Box plot de la humedad del combustible total (eje y) vs los modelos de combustible (eje x). Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Media y desviación estándar del valor de humedad para cada modelo de combustible. Fuente: elaboración propia.

Modelos	Media			Desviación estándar		
	Mf muerto	Mf vivo	Mf tot	Mf muerto	Mf vivo	Mf tot
GR1	0.1639	2.3639	0.1639	0.1927	1.0509	0.1927
GS1	0.0769	1.3792	0.6760	0.0917	0.4486	0.2001
SH5	0.0958	1.2460	0.7974	0.0933	0.3061	0.2015
TU2	0.5194	1.7247	0.6761	1.1646	2.2714	1.2858
TU3	0.1056	1.0258	0.4184	0.0869	0.3356	0.1127
TU5	0.2155	1.1593	0.4609	0.3046	0.7776	0.4019

4.2.3. Estudio de diferencias significativas (Anova)

El ANOVA entre los modelos de combustible y cada variable ha dado los valores de p-valor que se observan en la Tabla 14. Los valores muestran que hay variables que no se diferencian entre los distintos modelos de combustible, tales como: 100h, hojas muertas, duff y mf.dead. Todas estas variables son de combustible muerto, que como ya se ha comentado es muy variable a las condiciones meteorológicas. El área de estudio es de pocas hectáreas y, por tanto, la variación de las condiciones meteorológicas es uniforme. Esto puede explicar por qué

las variables de los combustibles muertos no varían tanto entre modelos de combustible. En cambio, la humedad del combustible vivo es más dependiente de las características de cada especie y del parche suelo-vegetación, por ello, la variabilidad es mayor. Además, el p-valor es menor en el caso de las especies herbáceas, que coincide con una mayor variabilidad de especies entre modelos, mientras que las especies de matorral principales (*Genista scorpius*, *Salvia rosmarinus*, *Pistacia lentiscus*) eran constantes en todos los modelos de combustible estudiados.

Tabla 14. Test ANOVA entre los modelos de combustible y cada variable analizada. Fuente: elaboración propia.

VARIABLE	P VALUE	VARIABLE	P VALUE
Mf TOT	0.000	NBRI	0.000
Mf vivo	0.000	NDVI	0.000
Mf muerto	0.154	EVI	0.000
duff	0.333	GCI	0.000
1h	0.041	EVI2	0.000
10h	0.035	GLI	0.000
100h	0.794	MSI	0.000
miscelánea	0.01	ARVI	0.000
hojas muertas	0.167	SAVI	0.000
herbáceo	0.000	SIPI	0.000
matorral	0.077	RGR	0.000
NDII	0.000		

A continuación, se realiza el test post-hoc, donde se comparan los modelos entre sí en función de cada variable, y se estudian las posibles agrupaciones que no son significativamente diferentes (Tabla 15). En el caso de la humedad del combustible muerto podrían agruparse todos los modelos de combustible, debido a que no hay diferencias significativas, pero, es necesario destacar que el modelo de combustible TU2 tiene valores más bajos en relación con los pastos y matorrales. Analizando el ANOVA de los modelos de combustible con la humedad del combustible vivo, pueden agruparse los MC en dos grupos distintos. Estos son:

- Pastizales: estaría incluido el único modelo que representa este grupo, que es el GR1.
- Matorral + arbolado: se agrupan el resto de los modelos de combustible, puesto que los p-valores son siempre mayores a 0.05, exceptuando la comparación de TU2 con SH5. Es decir, el arbolado tiene más humedad que el matorral, pues éste mantiene menos pies de arbolado en los antiguos cultivos, y, por ello, mantiene menor humedad.

Por último, en el caso del análisis de los MC con la humedad del combustible total, según los resultados, no hay diferencias significativas entre los distintos MC de pastos y matorral, puesto que el p-valor es siempre mayor a 0.05; pero sí hay una diferencia entre pastos y arbolado. A pesar, de que el p-valor es más elevado al comparar matorral con el arbolado que al hacerlo con los pastos, se agrupan los modelos de combustible de pastos y matorral, puesto que en la obtención de modelos esta agrupación daba mejores resultados. Finalmente, la agrupación de modelos es la siguiente:

- Agrupación matorral/pastizal: incluirá los modelos de combustible de matorral, pastos y matorral acompañado de pastos (GR1, GS1 y SH5).
- Agrupación arbolada: se incluirán los tres modelos de arbolado analizados (TU2, TU3 y TU5).

Tabla 14. Valores del p-valor resultantes del test post-hoc que analiza las diferencias del contenido de humedad de los diferentes componentes entre los MC. Los p-valores mayores a 0.05 se interpretan como: no diferencias significativas en el contenido de humedad de la variable de la variable de los modelos analizados.

	matorral	Mf_muerto	Mf_vivo	Mf_total	duff	1h	10h	100h	miscelánea	hojas muertas	herbáceo
GS1-GR1	0.989	0.906	0.065	0.637	-	0.664	0.984	-	-	0.617	0.202
SH5-GR1	1.000	0.974	0.018	0.501	-	1.000	0.870	-	-	0.923	0.271
TU2-GR1	0.999	0.721	0.013	0.044	-	0.916	0.241	-	-	1.000	0.002
TU3-GR1	0.246	0.991	0.001	0.044	-	0.996	0.382	-	-	0.797	0.001
TU5-GR1	0.867	0.998	0.001	0.043	-	0.540	0.047	-	-	1.000	0.001
SH5-GS1	0.995	1.000	0.997	0.956	-	0.806	0.996	0.907	1.000	0.270	1.000
TU2-GS1	0.926	0.154	0.992	0.224	-	0.135	0.522	1.000	0.113	0.596	0.537
TU3-GS1	0.064	0.998	0.656	0.321	-	0.349	0.717	0.930	0.218	0.960	0.391
TU5-GS1	0.505	0.680	0.782	0.328	-	0.023	0.128	1.000	0.060	0.583	0.420
TU2-SH5	0.998	0.264	1.000	0.030	0.479	0.814	0.824	0.877	0.130	0.929	0.437
TU3-SH5	0.207	1.000	0.902	0.051	0.561	0.976	0.941	0.999	0.246	0.219	0.304
TU5-SH5	0.825	0.834	0.961	0.053	0.294	0.388	0.333	0.927	0.070	0.939	0.329
TU3-TU2	0.438	0.343	0.936	1.000	0.993	0.996	1.000	0.892	0.876	0.763	1.000
TU5-TU2	0.971	0.928	0.979	1.000	0.896	0.982	0.965	1.000	0.927	1.000	1.000
TU5-TU3	0.890	0.900	1.000	1.000	0.763	0.840	0.874	0.951	0.413	0.744	1.000

4.3. Modelo y cartografía del contenido de humedad

4.3.1. Correlaciones

A continuación, van a analizarse qué índices espectrales están más relacionados con los valores obtenidos de humedad de los combustibles (vivos, muertos y total), de las agrupaciones obtenidas en el apartado anterior: i) matorral/pastizal (Tabla 16) y ii) arbolado: muerto y vivo (Tabla 17).

En relación con la agrupación de pastizal/matorral se observa que las correlaciones son más elevadas al comparar los índices con la humedad del combustible total que con la del vivo y el muerto por separado. La total tiene, en general, una correlación alta con todos los índices espectrales (exceptuando GLI, RGR y VARI) (tabla 15). Todos los índices con peores resultados tienen una característica en común y es que no utilizan la banda del infrarrojo para su cálculo. El VARI ya había obtenido peores resultados frente a otros índices en el estudio de García et al. (2020). En este mismo estudio, el NDVI fue el que mejores resultados obtuvo. Resaltan los índices NDVI y GCI en la correlación de la humedad total. La mayor correlación de la humedad del combustible muerto y vivo se produce con los índices EVI2 y GCI respectivamente; ambos índices miden el verdor de la hoja y son muy parecidos al NDVI, además el EVI2 ha corregido errores de cálculo del NDVI. Por otro lado, en el caso de arbolado, la mayor correlación de los índices se produce con la humedad de los combustibles muertos (tabla 16), y el mejor resultado es del índice GCI, seguido por el ARVI, que es con diferencia el que mayor correlación tiene con la humedad del combustible total. Por su lado, la humedad del vivo se correlaciona

mejor con el NDVI. En conclusión, los índices con mejores resultados son los que analizan el verdor de las hojas, resaltando el NDVI, ARVI, EVI2 y GCI.

Por otro lado, de manera general se observa una mayor correlación de la humedad del combustible muerto con los índices espectrales. Esto concuerda con lo comentado en la introducción de este trabajo. La humedad del combustible vivo es más difícil de calcular, puesto que es más independiente de las condiciones meteorológicas, y es más dependiente de las características fisiológicas de cada especie. Razón que, también puede dar lugar a errores al haber una variabilidad de especies que las muestras de campo no han podido abarcar en su totalidad.

Tabla 15. Correlaciones entre humedad del combustible de la agrupación matorral-pastizal y los índices espectrales. (Mf.total: humedad del combustible total; Mf.vivo: humedad del combustible vivo; Mf.mto.: humedad del combustible muerto). Fuente: elaboración propia.

	NDII	NDVI	NBRI	EVI	EVI2	GCI	GLI	MSI	ARVI	SAVI	SIPI	RGR	VARI
Mf total	0.5551	0.6147	0.5725	0.5774	0.5973	0.6243	0.4921	-0.5484	0.5917	0.5732	0.5648	-0.4291	0.4011
Mf vivo	-0.2025	-0.1400	-0.1481	-0.1414	-0.1342	-0.2372	-0.0842	0.2067	-0.1488	-0.1598	-0.1604	0.1393	-0.0281
Mf mto.	-0.1916	-0.1426	-0.2061	-0.2052	-0.2042	-0.1871	-0.1067	0.1746	-0.1485	-0.2070	-0.1628	0.1366	-0.0948

Tabla 16. Correlaciones entre humedad del combustible de la agrupación arbolado y los índices espectrales. (Mf.total: humedad del combustible total; Mf.vivo: humedad del combustible vivo; Mf.mto.: humedad del combustible muerto). Fuente: elaboración propia.

	NDII	NDVI	NBRI	EVI	EVI2	GCI	GLI	MSI	ARVI	SAVI	SIPI	RGR	VARI
Mf total	0.1604	0.2783	0.1683	0.2239	0.2663	0.1365	0.2387	-0.1841	0.3161	0.2793	0.1985	-0.1743	0.1969
Mf vivo	-0.2678	-0.0277	-0.2703	-0.1100	-0.0604	-0.3999	0.0329	0.3372	-0.1290	-0.0824	-0.1996	0.0436	-0.0190
Mf mto.	0.7013	0.7003	0.7259	0.6124	0.6779	0.8425	0.5703	-0.7529	0.8360	0.7359	0.5538	-0.4684	0.4518

4.3.2. Modelo de regresión lineal simple y múltiple

4.3.2.1. Calibración Modelo de regresión lineal simple

Estos modelos son los más extendidos como ya se ha comentado, además evitan la sobreestimación de datos que puede conllevar usar un modelo múltiple. Se han analizado todos los modelos viables, es decir, con cada uno de los índices espectrales calculados.

- Modelo pastizal y matorral: en este modelo las R² rondan el 0.3 (Tabla 18), siendo la más elevada la del índice GCI (0.390), que además es uno de los índices con menor error (0.275).

Tabla 17. Ecuaciones de los modelos lineales simples de la humedad del combustible de la agrupación matorral-pastizal con los respectivos valores de R² y del error cuadrático medio (RMSE). Fuente: elaboración propia.

Índice	Ecuación	R ²	RMSE
GCI	$y = -0.298 + 0.569 \cdot \text{GCI}$	0.390	0.275
NDVI	$y = 0.2342 + 0.1184 \cdot \text{NDVI}$	0.378	0.291
EVI2	$y = -0.073 + 0.387 \cdot \text{EVI2}$	0.357	0.302
ARVI	$y = 0.254 + 0.129 \cdot \text{ARVI}$	0.350	0.291

NDII	$y = 0.173 + 0.125 * NDII$	0.308	0.279
NBRI	$y = 0.175 + 0.123 * NBRI$	0.328	0.280
EVI	$y = -0.051 + 0.379 * EVI$	0.333	0.287
GLI	$y = -0.118 + 0.489 * GLI$	0.242	0.269
MSI	$y = 1.908 - 0.516 * MSI$	0.301	0.304
SAVI	$y = 0.305 + 0.089 * SAVI$	0.329	0.284
SIPI	$y = -0.135 + 1.662 * SIPI$	0.319	0.290
RGR	$y = 2.094 - 0.519 * RGR$	0.184	0.317
VARI	$y = 0.082 + 0.356 * VARI$	0.161	0.325

- Modelo de arbolado: como ya se ha comentado en este caso se obtienen por separado los modelos de la humedad del combustible muerto y del vivo. Para obtener mejores resultados se han eliminado los *outliers*.
 - Humedad del combustible vivo: La humedad del combustible no tiene buenas correlaciones con los índices, siendo la gran mayoría menores a 0.3. Los modelos con mejores resultados han obtenido R^2 de valores muy bajos, siendo la mejor 0.16. Es necesario destacar, que el peso de la humedad del combustible vivo en el cálculo de la humedad total es mucho menor a la del combustible muerto, por tanto, el error cometido no será tan excesivo.

Tabla 18. Ecuaciones de los modelos lineales simples de la humedad del combustible vivo del arbolado con los respectivos valores de R^2 y del error cuadrático medio (RMSE). Fuente: elaboración propia.

Índice	Ecuación	R^2	RMSE
NDII	$y = 0.782 - 0.039 * NDII$	0.072	0.453
NDVI	$y = 0.543 - 0.004 * NDVI$	0.001	0.457
NBRI	$y = 0.837 - 0.0443 * NBRI$	0.073	0.457
EVI	$y = 0.870 - 0.170 * EVI$	0.012	0.446
EVI2	$y = 0.677 - 0.082 * EVI2$	0.004	0.453
GCI	$y = 1.070 - 0.240 * GCI$	0.160	0.453
GLI	$y = 0.451 + 0.026 * GLI$	0.001	0.448
MSI	$y = 0.161 + 0.211 * MSI$	0.114	0.457
ARVI	$y = 0.663 - 0.022 * ARVI$	0.017	0.456
SAVI	$y = 0.631 - 0.025 * SAVI$	0.007	0.060
SIPI	$y = 0.927 - 0.501 * SIPI$	0.040	0.059
RGR	$y = 0.446 + 0.036 * RGR$	0.002	0.227
VARI	$y = 0.562 - 0.018 * VARI$	3.0E-04	0.285

- Humedad del combustible muerto: La humedad del combustible muerto tiene una correlación muy elevada con gran parte de los índices, dando lugar a modelos con una R^2 bastante elevada (Tabla 20). Se escoge como mejor opción el índice que mejor se ajusta a la realidad y menor error tiene, el GCI.

Tabla 20. Ecuaciones de los modelos lineales simples de la humedad del combustible muerto del arbolado con los respectivos valores de R^2 y del error cuadrático medio (RMSE). Fuente: elaboración propia.

Índice	Ecuación	R^2	RMSE
NDII	$y = -0.256 + 0.067 * NDII$	0.492	0.472

NDVI	$y = -0.294 + 0.070 * NDVI$	0.490	0.467
NBRI	$y = -0.364 + 0.078 * NBRI$	0.527	0.471
EVI	$y = -1.091 + 0.616 * EVI$	0.375	0.472
EVI2	$y = -0.993 + 0.602 * EVI2$	0.460	0.476
GCI	$y = -0.562 + 0.330 * GCI$	0.710	0.483
GLI	$y = -0.500 + 0.291 * GLI$	0.325	0.458
MSI	$y = 0.715 - 0.307 * MSI$	0.567	0.482
ARVI	$y = -0.431 + 0.093 * ARVI$	0.699	0.482
SAVI	$y = -0.482 + 0.144 * SAVI$	0.542	0.480
SIPI	$y = -0.546 + 0.906 * SIPI$	0.307	0.462
RGR	$y = 0.673 - 0.253 * RGR$	0.219	0.451
VARI	$y = -0.548 + 0.283 * VARI$	0.204	0.453

En los tres modelos a desarrollar (humedad del combustible muerto y vivo del arbolado, y humedad del combustible total del matorral/pastizal) la mejor opción es el índice GCI. Este índice no es común en el ámbito forestal, a diferencia de en la agricultura. A pesar de ello, se incluyó en formato de prueba y ha sido el que mejores resultados ha aportado.

4.3.2.2. Calibración del modelo de regresión lineal múltiple

1. Creación de modelos según la correlación entre los índices

Se han analizado las correlaciones entre índices espectrales y se han generado una serie de modelos. A continuación, se exponen los modelos con mejores resultados (mayor R^2 y menor RMSE).

- Modelos de matorral-pastizal.

Se calcula la humedad del combustible total. Las combinaciones de índices posibles son pocas porque las correlaciones entre ellos son muy elevadas y gran parte de las posibles son con índices con baja correlación con la humedad del combustible, por tanto, dan resultados con valor bajo de R^2 . Hay dos opciones con mejores resultados utilizando el índice EVI (ver Tabla 21).

Tabla 19. Modelos múltiples de la humedad del combustible total de los modelos matorral/pastizal. Fuente: elaboración propia.

Índices usados	Correlación	Ecuación	R^2	RMSE
EVI+GCI	0.445	$y = -0.290 + 0.426 * GCI + 0.124 * EVI$	0.400	0.279
EVI+GLI	0.448	$y = 0.117 - 0.387 * GLI + 0.618 * EVI$	0.352	0.451

- Modelos de arbolado
 - Humedad del combustible vivo (Mf_{live}): los mejores resultados se han obtenido combinando dos índices, y todas las combinaciones contienen el índice GCI, que es el índice con mayor correlación con Mf_{live} (ver tabla 22).

Tabla 20. Modelos múltiples de la humedad del combustible vivo del arbolado. Fuente: elaboración propia.

Índices usados	Correlación	Ecuación	R ²	RMSE
GCI + EVI	0.470	$y = 0.841 - 0.264 * GCI + 0.135 * EVI$	0.166	0.463
SIPI + GCI	0.467	$y = 1.116 - 0.232 * GCI - 0.778 * SIPI$	0.161	0.813
RGR + GCI	-0.453	$y = 1.389 - 0.278 * GCI - 0.125 * RGR$	0.179	0.458

- Humedad del combustible muerto ($M_{f_{dead}}$): los mejores resultados se han obtenido combinando dos índices.

Tabla 21. Modelos múltiples de la humedad del combustible muerto del arbolado. Fuente: elaboración propia.

Índices usados	Correlación	Ecuación	R ²	RMSE
NDVI+MSI	-0.486	$y = 0.262 + 0.0430 * NDVI - 0.219 * MSI$	0.707	0.999
GCI + RGR	-0.453	$y = -0.368 + 0.307 * GCI - 0.076 * RGR$	0.726	0.486
GCI + SIPI	0.467	$y = -0.782 + 0.291 * GCI + 0.376 * SIPI$	0.753	0.483

2. Selección del modelo paso a paso por AIC

- Modelos matorral y pastizal. Se ha obtenido el siguiente modelo:
 - Fórmula: $M_{f_{tot}} = 1.3829 - 0.1207 * NDII + 0.1282 * NDVI - 0.2335 * GCI - 0.4957 * MSI + 0.2084 * RGR$
 - R²: 0.6292

Los valores de correlación son muy altos, por tanto, probablemente este sobreestimando datos. Por lo tanto, no es una opción viable este modelo obtenido mediante stepAIC.

- Modelo de combustible de arbolado. Se ha obtenido el siguiente modelo:
 - Fórmula: $M_{f_{vivo}} = -16.0380 + 0.2750 * NBRI - 0.3154 * NDVI - 1.7548 * GCI + 1.4849 * MSI + 1.0559 * ARVI + 3.8423 * RGR + 1.4765 * VARI$
 - R²: 0.4294

La combinación no es viable porque tienen una correlación alta (ver anejo 4), pero se obtienen ideas de combinaciones entre modelos, que sí tienen una correlación moderada.

- Fórmula: $M_{f_{muerto}} = -3.9660 + 4.9710 * EVI - -4.74810 * EVI2 + 0.7721 * GCI - 0.1511 * MSI + 0.2044 * ARVI - 1.5759 * SIPI + 0.7848 * RGR$
- R²: 0.8735

La combinación no es viable porque tienen una correlación alta entre índices (ver anejo 4), pero se obtienen ideas de combinaciones entre modelos, que sí tienen una correlación moderada.

4.3.2.3. Comparación entre modelos y selección de modelo final

Con todos los modelos desarrollados y, analizando sus resultados de R^2 y de RMSE, se llega a las siguientes conclusiones:

- Los modelos de stepAIC son útiles para ver posibles combinaciones entre índices, pero los resultados no son prácticos, ya que tiende a usar un número elevado de índices correlacionados entre sí, conlleva una sobreestimación de valores.
- El modelo de matorral/pastizal tiene unos resultados con una R^2 no muy elevados, rondando el 0.4. Al comparar los modelos simples con los múltiples se observa que la variación de R^2 es casi nula (ver Tabla 24). Al aumentar tan solo 0.01 el valor de R^2 entre el mejor modelo simple y el mejor múltiple; se ha decidido utilizar el simple para poder evitar la autocorrelación de las variables independientes. La correlación de ambos es media (0.445).
- El modelo de arbolado tiene unos resultados muy distintos si se comparan los resultados de la humedad del combustible muerto y del vivo. El primero de estos, obtiene unos modelos que se ajustan mejor a la realidad (valor de R^2 máximo > 0.7), mientras que los valores de R^2 de los modelos de la humedad del combustible no alcanzan el 0.2.
- El mejor resultado del modelo de humedad del combustible muerto se obtiene con un modelo múltiple, concretamente el que usa los índices espectrales GCI y RGR, pero la diferencia no es muy considerable (tabla 25), es tan solo 0.016, y además el RMSE es mayor en el modelo múltiple. Para evitar ese error y el posible por la autocorrelación de las variables independientes (-0.453), se ha decidido utilizar el modelo generado con GCI.
- El mejor resultado del modelo de humedad del combustible vivo se obtiene con un modelo múltiple, concretamente el que usa los índices espectrales GCI y RGR, pero la diferencia no es muy considerable (tabla 26), al igual que en los modelos del resto de humedades, es tan solo 0.019 y además, el RMSE es ligeramente mayor en el modelo múltiple. Para evitar ese error y el posible por la autocorrelación entre índices (-0.453), se ha decidido utilizar el modelo generado con GCI.
- El índice con mejores resultados en la zona de estudio ha sido el GCI, como se podía intuir al observar la correlación de este índice con los resultados de humedad obtenidos a partir de los datos de campo (anejo 4). Es un resultado esperado si se analizan las correlaciones de los índices con la humedad, pero antes de realizar todo el estudio no era la opción esperada, puesto que no hay bibliografía de su uso en el ámbito forestal en relación a la humedad del combustible. Sin embargo, sí aparece en otros estudios, por ejemplo, en el stock de carbono de un bosque de ribera (Fernandes, et al., 2020).

Tabla 22. Comparación mejores modelos (múltiple y simple) de matorral/pastizal. Fuente: elaboración propia.

Índices	Ecuación	R^2	RMSE
GCI	$y = -0.298 + 0.569 \cdot \text{GCI}$	0.390	0.275
GCI + EVI	$y = -0.290 + 0.426 \cdot \text{GCI} + 0.124 \cdot \text{EVI}$	0.400	0.279

Tabla 23. Comparación mejores modelos de la humedad del combustible muerto (múltiple y simple) del arbolado. Fuente: elaboración propia.

Índices	Ecuación	R ²	RMSE
GCI	$y = -0.56232 + 0.33020 * GCI$	0.710	0.414
GCI + RGR	$y = -0.368 + 0.307 * GCI - 0.076 * RGR$	0.726	0.486

Tabla 24. Comparación mejores modelos de la humedad del combustible vivo (múltiple y simple) del arbolado. Fuente: elaboración propia.

Índices	Ecuación	R ²	RMSE
GCI	$y = 1.389 - 0.278 * GCI - 0.125 * RGR$	0.179	0.458
GCI + RGR	$y = -0.368 + 0.307 * GCI - 0.076 * RGR$	0.726	0.486

4.4. Cartografía del comportamiento del fuego

La implementación de las ecuaciones de comportamiento del fuego se ha traducido en un total de 500 líneas de código. Finalmente, este código es capaz de estimar para cada imagen de Sentinel-2 el contenido de humedad y por consiguiente el comportamiento del fuego asociado. Aunque se ha hecho el cálculo y la visualización de todos los parámetros intermedios, sólo se van a presentar aquí el parámetro de la longitud de la llama (FB, ft), que es dependiente del valor de la velocidad de propagación (R , ft/min) y el calor por unidad de superficie (Ha, Btu/ft²). Además, para acotar el estudio solo se presentará el periodo de tiempo de 19/08/2020 al 29/08/2021, aunque el código es capaz de hacerlo en cualquier otro periodo. Dada la potencialidad de este script y los múltiples resultados que podría dar solo se va a presentar:

- Visualización de los valores medios de todo el periodo en el mote.
- La variación temporal del valor medio de los parámetros.

La conversión de los parámetros utilizados en los modelos de combustible se ha realizado con las siguientes formulas:

- $GCI_{EN} = 0.6281 + 0.5651 * GCI_R$
- $Mf.total_R = -0.1026 + 0.9489 * Mf.total_{EN}$
- $Mf.muerto_R = -0.016 + 0.9489 * Mf.muerto_{EN}$
- $Mf.vivo_R = -0.0976 + 2.021 * Mf.vivo_{EN}$

Los valores de R² de las ecuaciones son en todos los casos mayores a 0.9.

4.4.1. Visualización

La longitud de llama (figura 11) es mayor en las zonas con modelo de combustible TU5, SH9 y SB3. Los valores eran esperables, por su parte, el SB3 tiene como principal propagador del fuego a restos moderados de árboles derribados, combustible muerto que cuenta generalmente con humedades mucha más bajas que el vivo; en la zona este modelo se ha asociado a zonas donde hay pies rotos y tumbados debido a causas naturales. El modelo TU5 tiene una carga alta de combustible y, además, hay una gran densidad de matorral, que favorecerá el aumento de la longitud de llama. El SH9 corresponde a zonas de matorral de

carga muy alta. El principal propagador del fuego es el matorral leñoso y los restos de matorral presentes en la hojarasca, la altura del matorral está en un rango de 1.2 a 1.8 metros, característica que favorece una mayor longitud de llama.

Los modelos GS2 y SH2 resaltan por tener una menor longitud de llama. El GS2 es un modelo de pastizal-matorral seco de carga moderada, en la zona de estudio se ha asociado a campos abandonados donde el matorral ya predomina sobre el pasto. Los matorrales tienen una altura aproximada de 0,30 a 1 metro. El resultado no es el más esperado por sus características, la longitud de llama esperada sería media. En cambio, el SH2 si tienen características que dan lugar a longitudes de llama bajas al estar compuesto por matorral más húmedo y la altura de estos no ser elevada.

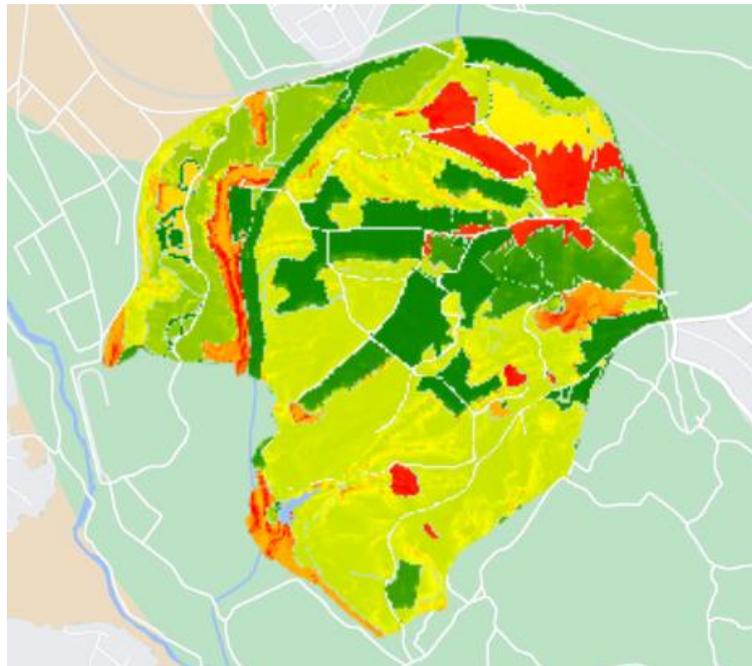


Figura 11. Longitud de llama en la zona de estudio. El color verde representa longitudes de llama más bajas, el amarillo medias y el rojo más elevadas. Fuente: elaboración propia.

4.4.2. Variación temporal

En la Figura 12 se observan los valores de longitud de llama de la media de todos los modelos de combustible en el periodo estudiado. Los valores tienen un rango de 1,5 a 4 metros. En general, los valores máximos se obtienen en los meses de junio a septiembre, coincidiendo con la desecación que se produce en verano; en diciembre se produce un pico alto, a pesar de la menor humedad, este modelo se basa en distintos parámetros, por ello, este pico puede explicarse con otro parámetro, como puede ser el viento. Por otro lado, hay un periodo con valores bajos en octubre, que coinciden con la época de gota fría.

En la figura 13 se muestran los valores de longitud de llama de cada modelo de combustible. En general todos los índices siguen la misma dinámica en la escala temporal, que se ha explicado con anterioridad. Se observa que el modelo TU5 tiene valores claramente

superiores al resto de modelos, el TU5 es un modelo de arbolado donde el principal propagador del fuego es la hojarasca de bosque con matorral, la carga de combustible es muy alta. Por otro lado, los modelos TU3 y TU2 tienen una longitud de llama de 2 a 3,5 metros, ambos modelos de arbolado se caracterizan por tener una carga moderada de hojarasca con pastizal y matorral. El resto de los modelos (SH2, GS1, GS2 y GR1) tienen una longitud de llama que no suele superar el metro. Los modelos de matorral se caracterizan por tener una carga de combustible media o baja, compuesta por pastizal y matorral en el caso de los modelos GS, y el SH2 no tiene pastizal y la altura de los matorrales ronda los 30 cm.

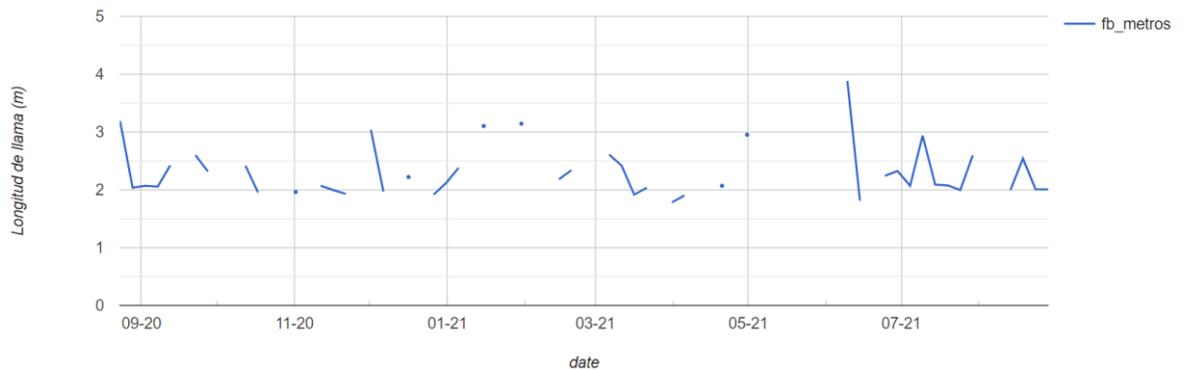


Figura 12. Longitud de llama media en el periodo 19/08/2020 al 29/08/2021. Fuente: elaboración propia.

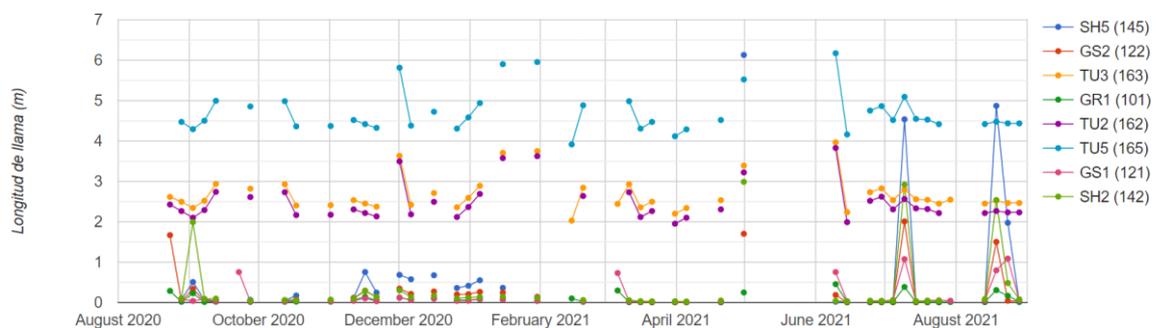


Figura 13. Longitud de llama en cada modelo de combustible en el periodo 19/08/2020 al 29/08/2021. Fuente: elaboración propia

4.5. Limitaciones y mejoras

El trabajo realizado ha tenido resultados aceptables en la modelización de la humedad del combustible, obteniendo valores de R^2 dentro de los rangos normales de los artículos consultados. A pesar de ello, para ajustarse más a la realidad, sería conveniente disponer de una serie de datos de datos de campo más larga.

Como posible mejora podrían haberse realizado modelos multivariantes con el mejor índice espectral, pero incluyendo también como variable independiente datos meteorológicos, concretamente de temperatura y humedad relativa. En distintos estudios se han obtenido muy

buenos resultados al combinar índice espectral con temperatura obteniendo un valor de R^2 mayor a 0.8 (Chuvieco et al., 2004; Costa Saura et al., 2021).

Otra variable explicativa del contenido de humedad podría ser la fenología, principalmente es interesante de cada a los pastizales y matorrales los cuales en la época de primavera desarrollan una capa, que pasa de ser inexistente a tener una altura de 1m aproximadamente. Este tipo de efecto se podría estudiar a través de índices específicos o la aplicación de tecnologías RADAR, las cuales son capaces de detectar la estructura.

5. Conclusiones

Los datos tomados en campo muestran la variabilidad de la humedad en la escala temporal, además de las diferencias existentes entre modelos de combustible que, a su vez, sufren una variación distinta, debido a sus características intrínsecas.

Respecto a los índices espectrales, se ha comprobado que los más utilizados en la literatura, pueden no ser los más apropiados para explicar la humedad de los combustibles en el monte de la Vallesa y que estudios locales como el presente pueden ayudar a refinar las estimaciones de Mf. Concretamente el GCI, ha demostrado una mayor capacidad predictiva entre distintos modelos y para combustibles vivos y muertos, permitiendo detectar los cambios de humedad a nivel temporal y espacial.

En resumen, este estudio muestra la posibilidad de encontrar diferentes índices espectrales para la modelización de la humedad del combustible. A pesar de ello, se han obtenido valores con amplio margen de mejora, para ello, debería de obtenerse una serie de datos de campo mayor, con tal de ajustar el modelo lo máximo posible a la realidad. Además, como se ha comentado en el apartado de mejoras, una opción con muy buenos resultados es la de incluir la meteorología en el modelo de humedad del combustible.

Los modelos lineales univariantes (de un solo índice espectral) son los más simples y robustos, reduciendo los errores que podrían cometerse al usar dos o más índices, esto es debido a su alta correlación. No obstante, la ya aludida inclusión de variables meteorológicas instantáneas simultáneas al paso del satélite, aunque engorroso, puede mejorar las estimaciones de Mf con modelos multivariantes.

En relación, al comportamiento del fuego, se han hecho simulaciones que incluyen parámetros clave en el comportamiento del fuego (Mf) que tienen una dinámica temporal y espacial que normalmente se ignora en las simulaciones más convencionales, donde se define una meteorología tipo y unos modelos de combustible. Los resultados obtenidos son los esperables en relación a las diferencias encontradas para velocidad de propagación, calor por unidad de superficie y longitud de llama entre modelos de combustible.

Para finalizar la obtención de la variación temporal y espacial puede ser un gran apoyo para la realización de los planes de prevención contra incendio y la definición de las zonas de actuación de la silvicultura preventiva, concretamente en las zonas donde el comportamiento del fuego puede alcanzar situaciones más extremas.

6. Bibliografía

Albini, F. A. (1976a). Computer-based models of wildland fire behavior: A user's manual. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 68 p.

Alves, M., Batista, A., Soares, R., Ottaviano, M., & Marchetti, M. (2009, 10 junio). Fuel moisture sampling and modeling in *Pinus elliottii* Engelm. plantations based on weather conditions in Paraná - Brazil. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 2(3), 99-103. <https://doi.org/10.3832/ifor0489-002>

Andrews, P.L y Chase, C.H. 1989. BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System-BURN Subsystem, Part 2. USDA Forest Service. National Wildfire Coordinating Group. Gen. Tech. Rep. INT-260.

Andrews, P. L. y Rothermel, R. C. (1982). Charts for interpreting wildland fire behavior characteristics. Gen. Tech. Rep. INT-131. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Andrews, P.L. (1986). BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System-BURN Subsystem, Part 1. USDA Forest Service. Intermountain Research Station. Gen. Tech. Rep. INT-194.

Andrews, P. L. (2011). How to generate and interpret fire characteristics charts for surface and crown fire behavior (No. 253). US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Andrews, P. L. (2018). The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-371. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 121 p., 371.

Argañaraz JP, Landi MA, Scavuzzo CM, Bellis LM (2018) Determining fuel moisture thresholds to assess wildfire hazard: A contribution to an operational early warning system. *PLoS ONE* 13(10): e0204889. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204889>

Byram, G. M. (1959). Combustion of forest fuels. In: Davis, Kenneth P. Forest fire control and use. New York, NY: McGraw-Hill Book, Co.: 61–89.

Cardil, A., Monedero, S., Schag, G., de-Miguel, S., Tapia, M., Stoof, C. R., ... & Ramirez, J. (2021). Fire behavior modeling for operational decision-making. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 23, 100291

Carlton, D. Andrews, P.L. y Bevins, C. (2001). Users' Guide BehavePlus Fire Modeling System Version 1.00.00. USDA Forest Service. Rocky Mountain Research Station. Systems for Environmental Management.

Chatto, K., Tolhurst, K. G., Victoria. Fire Management Branch, y Victoria. Centre for Forest Tree Technology. (1997). Development and Testing of the Wiltronics T-H Fine Fuel Moisture Meter. Fire Management Branch, Department of Natural Resources and Environment.

Chuvieco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martín, P., Martínez-Vega, J., de la Riva, J., y Pérez, F. (2004). Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture

content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 322-331. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.01.019>

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2da ed.). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Costa-Saura, J. M., Balaguer-Beser, N., Ruiz, L. A., Pardo-Pascual, J. E., y Soriano-Sancho, J. L. (2021, 17 septiembre). 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. <https://doi.org/10.3390/rs13183726>

De Castro, R., Simarro, M. E., Priego, C., Lafuente, R., & Sancho, A. (2007). Investigación social sobre los incendios forestales en Andalucía. In *Proceedings of the Wildfire 2007 IV Conferencia Internacional sobre Incendios Forestales*, Seville, Spain (pp. 13-17).

Finney, M.A. (1998). *FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation*. USDA Forest Service. Rocky Mountain Research Station. Res. Pap. RMRS- RP-4.

García, M., Riaño, D., Yebra, M., Salas, J., Cardil, A., Monedero, S., Ramirez, J., Martín, M.P., Vilar, L., Gajardo, J., Ustin, S. A (2020). Live Fuel Moisture Content Product from Landsat TM Satellite Time Series for Implementation in Fire Behavior Models. *Remote Sens.* 12, 1714. <https://doi.org/10.3390/rs12111714>

Gamon, J. A. y Surfus, J. S. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer.

Garcia, M., Saatchi, S., Ustin, S., Balzter, H., Modelling Forest canopy height by integrating airborne LiDAR samples with satellite Radar and multispectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 66, 159 - 173.

Gobron, N., Pinty, B., Verstraete, M. M. y Widlowski, J. L. (2000). Advanced vegetation indices optimized for up-coming sensors: Design, performance, and applications.

Hardinsky, M. A. y Lemas, V. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alternifolia* canopies.

Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI).

Huete, A.R., Justice, C. y Liu, H. (1994). Development of Vegetation and Soil Indices for MODIS- EOS.

Huete, A.R., Justice, C. y Van Leeuwen, W. (1999). *Modis Vegetation Index (MOD 13). Algorithm Theoretical Basis Document Version 3*.

Hunt Jr, E. y Rock, N. (1989). Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances.

Hunt, R., Wang, L., Qu J., & Hao, X. (2012). Remote sensing of fuel moisture content from canopy water indices and normalized dry matter index. *Journal of Applied Remote Sensing*. 6. 061705. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.6.061705>

Key, C.H., Benson, N., Ohlen, D., Howard, S., McKinley, R. y Zhu, Z. (2002). The normalized burn ratio and relationships to burn severity: ecology, remote sensing and implementation.

Merton, R. N. (1998). Monitoring community hysteresis using spectral shift analysis and the red-edge vegetation stress index. *Journal Seventh Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*.

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (s. f.). SIAR. Servicio Integral de Asesoramiento al Regante. Recuperado el 12 de marzo de 2022, de <https://eportal.mapa.gob.es/websiar/Inicio.aspx>

Miura, T., Yoshioka, H., Fujiwara, K., y Yamamoto, H. (2008). Inter-Comparison of ASTER and MODIS Surface Reflectance and Vegetation Index Products for Synergistic Applications to Natural Resource Monitoring.

Omi, N. (2015) *Curr Forestry Rep* (2015) 1:100–117 DOI 10.1007/s40725-015-0013. Theory and Practice of Wildland Fuels Management.

Pastor, E., Zárate, L., Planas, E., & Arnaldos, J. (2003). Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(2), 139-153.

Pausas, J.G. y Paula, S., 2012. Fuel shapes the fire–climate relationship: evidence from Mediterranean ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 1074–1082

Penuelas J., Baret F. y Filella I. (1995). Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance.

Pyne, Stephen J.; Andrews, Patricia L.; Laven, Richard D. 1996. *Introduction to wildland fire*. 2nd edition. New York, NY: John Wiley and Sons, Inc. 769 p.

Reinhardt, E., Crookston, N.L. (2003). *The Fire and Fuels Extension to the Forest Vegetation Simulator*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-116. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 209 p.

Roldán, A., Dauriac, F., Deshayes, M., y F. González-Alonso (2003). Cartografía de la variación de la humedad de la vegetación mediterránea a partir de imágenes SPOT-HRVIR. *Teledetección y Desarrollo Regional*, 241-244.

Rothermel, R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Res. Pap. INT-115*.

Rothermel, R.C., Wilson, R.A., Morris, G.A. y Sackett, S.S. (1986). Modeling moisture content of fine dead wildland fuels: input to the BEHAVE Fire Prediction System. *USDA Forest Service. Intermountain Research Station. Res. Pap. INT-359*.

Ruíz González, A. D. (2004). *La predicción de la humedad en los restos forestales combustibles; aplicación a masas arboladas en Galicia [Tesis]*. Universidad Politécnica de Madrid.

Scott, J. H. 1999. NEXUS: a system for assessing crown fire hazard. *Fire Management Notes*, v. 59, no. 2, p. 20-24.

Tucker, C. J., Elgin, J. H., McMurtrey, J. E. y Fan, C. J. (1979). Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data.

Vallejo, R. V., & Alloza, J. A. (1998). The restoration of burned lands: the case of eastern Spain. *Large Forest Fires*. Backhuys Publishers, 91-108.

Vilà-Cabrera, A.; Coll, L.; Martínez-Vilalta, J.; Retana, J. Forest management for adaptation to climate change in the Mediterranean basin: A synthesis of evidence. *Forest Ecology and Management* 2018, 407, 16-22.

Yebra, M., E. Chuvieco y D. Riaño (2008a): Estimation of live Fuel Moisture Content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 523- 536.