



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

GUARDIAN: Sistema de gestión contra incendios forestales para la prevención y defensa de la interfaz urbano-forestal mediterránea.

BLANCO CANO, L.¹, MOLINA HERRERA, A.J.¹, GONZÁLEZ SANCHIS, M.C.¹, PÉREZ ROMERO, J.¹, DALMAU ROVIRA, F.², QUINTO PERIS, F.², GORGONIO BONET, E.², PASTOR, E.³, y DEL CAMPO GARCÍA, A.D.¹

¹ ETSI Agronómica y del Medio Natural. Dep. Ing. Hidráulica y Medio Ambiente. Re-ForeST. Universitat Politècnica de Valencia. lblacan@upv.es

² Medi XXI Gabinet de Solucions Ambientals, S.L.

³ Centre d'Estudis del Risc Tecnològic, Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech.

Resumen

La adaptación al cambio climático y la mitigación de sus impactos sobre los ecosistemas requiere modelos de gestión innovadores. En ambientes mediterráneos altamente antropizados, las sequías más intensas y persistentes, alteran las características del sustrato edáfico y en consecuencia el estado hídrico de la vegetación. El estrés hídrico de las masas forestales implica el incremento de su disponibilidad como combustible y el riesgo de incendios. A través de un modelo de gestión basado en la cuantificación hídrica del sistema suelo-planta-atmósfera, se definirá una necesidad de riego óptimo en la interfaz urbano-forestal del bosque de La Vallesa en el Parque Natural del Túria (Valencia), con el objetivo de prevenir incendios forestales. El diseño incluye el uso eficiente de agua regenerada proveniente de una EDAR para realizar un riego preventivo y/o de combate destinado a mejorar el estado hídrico de la vegetación (masas de pino carrasco) como defensa frente al fuego. El análisis de parámetros ecofisiológicos en respuesta a las condiciones ambientales, combinado con modelación del comportamiento del fuego, proporcionará la base científica para optimizar patrones de riego. Se monitorizan en el continuo suelo-planta-atmósfera series temporales de variables como el contenido hídrico del suelo, tronco, copa y de los combustibles finos. Las relaciones aquí presentadas permitirán automatizar los cañones SIDEINFO de la infraestructura hidráulica “Guardian” y con ello definir una estrategia de gestión para masas forestales en declive o amenazadas de incendio del mediterráneo.

Palabras clave

Cambio climático, riego prescrito, sistema SIDEINFO, gestión forestal, piro-eco-hidrología.

1. Introducción

Las consecuencias ambientales del cambio climático son diversas y provocan cambios en el régimen y la magnitud de las perturbaciones que afectan a los ecosistemas. Las perturbaciones de mayor importancia bajo el clima mediterráneo son las sequías, los grandes incendios, las plagas y las tormentas con episodios de viento extremo (Vilà-Cabrera et al., 2018). Las sequías aumentarán su duración e intensidad provocando decaimiento forestal y una mayor desecación del combustible disponible, aumentando su disponibilidad y por tanto el riesgo y la peligrosidad de potenciales incendios. Sumado a esta problemática, se une el cambio de usos de suelo (Pausas & Fernández-Muñoz, 2012), donde se tiende al abandono rural, y con ello a la disminución de aprovechamientos agroforestales o el cese del pastoreo extensivo. Esto último ha provocado que estas áreas antiguamente aprovechadas se transformen en paisajes desequilibrados con tendencia a la matorralización, acumulación de biomasa y necromasa y en consecuencia a zonas más vulnerables ante posibles perturbaciones (Ganteaume et al., 2013).

Este fenómeno de aumento de la probabilidad de los incendios afecta a su vez al modelo de expansión urbana que se observa en gran parte de la cuenca mediterránea. Se ha tendido a urbanizar

en zonas anexas a bosques transformando el entorno en un paisaje polarizado en dos extremos: uno correspondiente a una zona urbana extensa donde reside la población, y el otro un espacio natural, mayoritariamente boscoso donde normalmente se desarrollan actividades recreativas y de conservación. A la zona de transición entre ambos se la ha denominado interfaz urbano-forestal (“Wildland-Urban Interface”, WUI) (USDA, 2001). Esta dinámica territorial constituye un problema desde el punto de vista de los incendios forestales que ha tomado relevancia en los últimos años. A pesar de ello, hay un déficit normativo y de carácter técnico sobre esta nueva problemática (Martín, 2012). Se ha intentado mejorar esta situación desarrollando reglamentos y recomendaciones para intentar mejorar la prevención de incendios en las áreas WUI (ver, por ejemplo, ICC, 2018). Sin embargo, las soluciones emitidas están basadas en modelos de fuego simplificados y con poca evidencia experimental (Vacca et al., 2020).

Ante esta problemática han surgido iniciativas como el Sistema de Defensa contra Incendios Forestales para defensa de núcleos de población o estructuras aisladas en zonas forestales (Interfaz Urbana Forestal) SIDEINFO® (<http://www.sideinfo.es/>). Este sistema consiste en un conjunto de cañones elevados por encima del dosel arbóreo para realizar riegos de alta presión que cubren el perímetro urbano, y que impulsan el agua a más de 50 metros de distancia. Además, dicho sistema también incluye tanto selvicultura preventiva en el suelo forestal como el diseño de jardinería preventiva contra incendios forestales (pirojardinería) en las propiedades urbanas privadas. En conjunto se genera una franja de protección perimetral que aísla el núcleo de población de un posible incendio forestal que pueda afectar a su entorno. El agua aportada por los cañones mediante los Sistema de Defensa Activa (SIDEINFO®) tiene tres finalidades principales (Dalmau, 2019): i) Agua estructural, referente al agua que será captada por la vegetación, ii) Agua preventiva, consiste en el agua que se aporta al combustible, principalmente al muerto, y suelo orgánico y que no tendrá tiempo de ser incorporada por la vegetación y, iii) Agua de combate: agua aportada cuando se produce un incendio con el objetivo de reducirlo o extinguirlo.

Los riegos de agua estructural y preventiva (preventivos en sentido amplio) generan un ambiente más humectado e hidratado, y por lo tanto, implican una entrada de agua al continuo Suelo-Planta-Atmosfera (SPAC). El aumento del contenido de agua en el SPAC genera unas condiciones ambientales en las cuales se necesita una mayor aportación de calorías para que se produzca la ignición y en el caso de ignición, se reducirá la intensidad de reacción y el avance del frente. Es decir, producirá un cambio en el comportamiento potencial del incendio sensu Rothermel (1972).

2. Objetivos

El presente trabajo presenta parte de las acciones realizadas por el Grupo Re-ForeST de la Universidad Politécnica de Valencia (<https://gruporeforest.webs.upv.es/>) en el proyecto GUARDIAN (UIA03-338, <https://proyectoguardian.com/en/>). En concreto, se pretende elaborar un algoritmo de riego preventivo basado en la peligrosidad de incendio, el cual optimice el agua aportada. Para ello se caracterizará primeramente el estado y dinámica temporal del continuo suelo-planta-atmósfera (SPAC) en términos de cantidad de agua y energía que ésta conlleva en términos de calor latente. Con ello, se conectará el estado del SPAC en un momento determinado (normalmente en pre-emergencia con alerta alta) con las variables de entrada al modelo de comportamiento del fuego y de aquí se deducirá el déficit de humedad (agua) de los combustibles para dejar al incendio dentro de capacidad de extinción, lo que se traduce finalmente en una cantidad de agua necesaria a aportar en situación de riesgo. Además, se pretende contribuir al diseño de riegos prescritos de mantenimiento de una disponibilidad del combustible baja y generar información que alimenten en una red sensorial inalámbrica que nutre de datos al algoritmo.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en un monte privado llamado La Vallesa, que forma parte del Parque Natural del Turia en la provincia de Valencia y dentro de los TT.MM. de Paterna y Ribarroja del Turia, en el cual se localizan dos parcelas experimentales de 50m² separadas una distancia de 100m. Estas parcelas son representativas de la vegetación en la zona de estudio. El clima es típicamente mediterráneo con una marcada sequía estival. La precipitación acumulada anual es 394.14 ± 102.79 mm y la temperatura media anual 16.62 ± 1.59 °C. El suelo en el que se emplaza tiene una profundidad estimada de 30 cm, con textura Franco Arenosa y una pedregosidad media de 56.71 ± 8.70 %. La vegetación dominante es una masa arbórea de *Pinus halepensis* Mill., la cual tiene una cubierta del 74 %. Por otro lado, presenta una altura media de 10.27 ± 2.50 m, un diámetro a la altura del pecho medio de 21.93 ± 8.18 cm y un área basimétrica por árbol media de 0.04 ± 0.03 m². Esta masa forestal se corresponde con un modelo de combustible TU2 (Scott & Burgan, 2005), el cual está asociado a zonas arboladas con presencia de pastizal/matorral de carga moderada. El comportamiento de fuego relacionado con este modelo de combustible son velocidades de propagación moderadas y longitudes de llama bajas. El principal uso del suelo es el forestal con alguna zona agroforestal abandonada. Destaca a su vez la gran influencia antrópica ya que el monte está rodeado por urbanizaciones residenciales, estimándose una potencialidad de afección en caso de incendio de 15,000 habitantes.

3.2. Caracterización empírica del estado hídrico

El flujo del agua dentro del SPAC tiene un desfase entre el agua captada por las raíces y el agua liberada a la atmósfera por la transpiración. Esto se debe a que los compartimentos del SPAC tienen diferentes capacidades de retener o almacenar y transmitir agua. Para la cuantificación del agua retenida en estos compartimentos se ha utilizado el concepto de “Eco-Hydro-Voxel” (EHV). El EHV es un volumen tipificado basado en el SPAC donde se puede cuantificar el contenido de agua interno, y permitiendo así el estudio de la magnitud y la dinámica de las entradas y salidas de agua. El EHV puede subdividirse en depósitos o capas internas, que se definen en función de los compartimentos más representativos del SPAC: saprolito/suelo profundo, suelo superficial, mantillo, matorral, troncos, ramas y copas/hojas. En el presente trabajo los depósitos de interés y sobre los que se va a fundamentar el algoritmo son el mantillo y el matorral, por ser éstos los más relacionados con el fuego en superficie.

Para conocer el contenido de agua de estos depósitos además de otras medidas complementarias se llevó a cabo una detallada monitorización experimental del EHV. Un total de 12 variables meteorológicas se midieron continuamente a una altura de 2 m por encima del dosel con una estación meteorológica; la precipitación (mm), el viento (m/s) y el déficit de presión de vapor (kPa) son las más importantes para el desarrollo de este trabajo. Por otro lado, se instalaron en varios árboles (6) sensores de flujo de savia (cm/h) y de contenido de humedad en tronco (sondas de humedad del suelo calibradas), ambos a diferentes alturas: pecho y comienzo de la copa viva. Por último, las variables del suelo también están monitoreadas a través de sensores de humedad del suelo (m³/m³) y de sensores del potencial matricial (kPa). Los sensores de humedad del suelo se encuentran a diferentes profundidades, esto es, superficial (entre la capa de la hojarasca y el horizonte orgánico en descomposición, 5 cm), a 15 y 30 cm.

El contenido volumétrico de agua del depósito superficial del suelo orgánico (de aquí en adelante referido como “mantillo”) se calculó para obtener la medida en l/m². Para ello se tuvo en cuenta el sensor a la profundidad del mantillo y el volumen que representa dentro del EHV. Por otro lado, el contenido del agua del matorral se obtuvo en l/m² a través de la estimación del contenido de humedad del combustible vivo (CHCV) y del volumen que representa éste dentro del EHV. La estimación del CHCV no se puede monitorizar en continuo y para ello se realizó un modelo lineal

múltiple con las variables predictoras VPD (kPa), flujo de savia (l/h), potencial matricial del suelo y día del año (1-365).

3.3. Parámetros del comportamiento del fuego

Los parámetros seleccionados para estudiar el efecto y la eficacia del riego sobre el comportamiento del fuego son el calor de preignición (Q_{ig} , Rothermel 1972) y la longitud de llama (F_B , Byram, 1959). El Q_{ig} es la energía necesaria para que una unidad de combustible llegue a la ignición, por tanto, cuanto más alto sea este parámetro más hará que se reduzca la posibilidad de producirse y propagarse eficientemente un incendio. Además, este parámetro se relaciona directamente con el contenido de humedad del combustible (M_f). Por tanto Q_{ig} representa la capacidad de absorción de energía a través del contenido de agua del sistema; a este concepto se le ha denominado capacidad operativa del sistema.

$$Q_{ig} = 250 + 1116M_f$$

El F_B es la distancia medida desde la punta de la llama media hasta el centro de la zona de llama en la base del fuego. Se calcula en función de la intensidad del fuego (I_B). La F_B , junto con la velocidad de propagación (R) y el calor por unidad de superficie (H_A), se utiliza típicamente como indicativo de la peligrosidad potencial de un incendio. En este trabajo se ha definido un fuego potencialmente peligroso cuando el F_B calculado superase los 1.2 m.

$$F_B = 0.45 * I_B^{0.46}$$

Los datos de entrada necesarios para obtener estos parámetros fueron definidos por Rothermel (1972). Los valores de entrada usados en este trabajo se encuentran en la Tabla 1. Los valores que hacen referencia a las características de las partículas del combustible (h, ST, Se y pp) se han obtenido de los valores generalmente usados (Andrews, 2018). Los valores referentes a la disposición del combustible son específicos de cada modelo de combustible, por lo que se han obtenido los valores estimados por Rothermel (1972) para el modelo TU2, a excepción del parámetro δ (grosor del lecho de combustible) que fue medido en campo. Por último, los parámetros característicos del ambiente se tomaron para la parcela de estudio, considerando una pendiente del 2.5%. Las otras variables, U y M_f (velocidad del viento y humedad del combustible respectivamente), no tienen un valor fijo debido a que cambia de forma diaria. Éstos se obtienen aplicando diferentes fórmulas usando los datos tomados en la monitorización del EHV. La U se calculó en función de la siguiente formula (Andrews, 2012):

$$U = 20ft \text{ wind speed} * WAF$$

donde, WAF es el factor de ajuste del viento, el cual en el caso específico de esta parcela tiene un valor de 0.297 y $20ft \text{ wind speed}$ es la velocidad del viento en ft/min a 20 ft (≈ 6 m) sobre la vegetación, por tanto se aplicó la ley de potencia del perfil del viento para transformar el dato de campo tomado a 2 m a través de la siguiente formula:

$$W = W_{ref} * \left(\frac{Z}{Z_{ref}} \right)^{WAF}$$

donde W es la velocidad del viento a la altura deseada (Z) y W_{ref} es la velocidad del viento a la altura de referencia (Z_{ref}). Por último, el M_f se obtuvo mediante el método de ponderación basado en

el tamaño del combustible muerto y vivo (hojarasca, 1h, 10h, 100h, herbáceo vivo y leñoso vivo), el cual sigue la siguiente formula (Andrews, 2018):

$$(M_f)_i = \sum_j f_{ij} * (M_f)_{ij}$$

donde f_{ij} son los parámetros de ponderación y $(M_f)_{ij}$ es el contenido de humedad de cada tamaño de combustible. Los f_{ij} se obtuvieron en función del porcentaje de representatividad según su carga de combustible. Para el tamaño de la hojarasca, el f_{ij} fue de 0,78 (7,90 Mg/ha), para el de 1h fue de 0,17 (1,75 Mg/ha), para el de 10h fue de 0,01 (0,07 Mg/ha) y para el leñoso vivo fue de 0,04 (0,45 Mg/ha). No hubo por tanto tamaños de combustible de 100h ni de herbáceas vivas. Los valores de $(M_f)_{ij}$ se estimaron en función de los valores obtenidos por los depósitos que caracterizan el EHV, así como teniendo en cuenta literatura científica. El valor de M_{fij} de la hojarasca se relacionó con el depósito del mantillo del EHV. La dinámica del M_f de 1h se estimó siguiendo el procedimiento descrito en Baksic et al. (2017), el cual se emplea en un bosque de *Pinus halepensis* en función de variables climáticas (temperatura y humedad relativa); en nuestro caso, utilizamos como base para este cálculo los datos de nuestra estación climática. La dinámica de M_f de 10h se obtuvo siguiendo a Balaguer-Romano et al. (2020), los cuales simularon un comportamiento en un bosque similar al de este estudio. Estos autores consideran proporciones constantes para calcular el M_{fij} de 10h en función de M_{fij} de 1h. Por último, el combustible vivo leñoso se estimó en función del depósito de matorral del EHV.

Tabla 1. Valores de entradas utilizados para la obtención de los parámetros de comportamiento del fuego (Q_{ig} y F_b), todos son valores constantes a excepción de M_f y U , los cuales son calculados diariamente en función de las variables medidas en las parcelas de campo.

Tipo	Símbolo	Parámetro	Valor y unidades
Partículas del combustible	h	Coeficiente de transferencia de calor	8,000 Btu/lb
	ST	Fracción de contenido mineral total	0.0555 lbmineral / lbmadera
	Se	Fracción de contenido mineral efectivo	0.010 (lbmineral – lbsílíce) / lbmadera
	pp	Densidad de la partícula seca	32 lb/ft ³
Disposición del combustible	σ	Relación superficie-volumen de la partícula de combustible	1,767 ft ² /ft ³
	Wo	Carga neta de combustible seco	0.19 lb/ft ²
	δ	Grosor del lecho de combustible	0.33 ft
	Mx	Fracción de humedad de extinción en el combustible	30 %
Ambiente	Mf	Fracción de humedad del combustible	variable %
	U	Velocidad del viento a la altura de media llama	variable ft/min
	tan ϕ	Pendiente	2.5 %

3.4. Efecto del riego sobre el comportamiento de incendio

El efecto del riego se estudió mediante la variación de los parámetros Q_{ig} y F_B . Con el fin de aumentar la muestra se consideraron los eventos de precipitación como riegos. La cuantificación de la variación consistió en la selección de los días de lluvia (n) y en función de ello, seleccionar el día anterior ($n - 1$) y los días posteriores ($n + m$). El día anterior refleja la situación de partida, y el día de lluvia y los tres días posteriores, reflejan la evolución del estado hídrico a causa del agua suministrada por el riego (lluvia). La evolución o variación del contenido de agua se cuantifica mediante la siguiente fórmula:

$$Variación_{n+m} = valor_{n+m} - valor_{n-1}$$

Esta fórmula se aplicó en los diferentes días en que las precipitaciones afectaron al sistema durante el periodo seco del año.

3.5. Algoritmo de optimización para riego preventivo

El algoritmo tiene como objetivo estimar los parámetros necesarios para reducir un potencial comportamiento del fuego peligroso (comportamiento inicial) en uno más controlable desde el punto de vista de la capacidad de extinción (comportamiento final). Se compone de varios pasos antes de diseñar el riego (Figura 1). En primer lugar, hace la medida y la estimación de las entradas necesarias al modelo, es decir, del M_f y del U . Una vez los tiene, ya se puede calcular el comportamiento del fuego inicial, hasta dar con el parámetro F_B que indica si el fuego es potencialmente peligroso o no. Si su valor supera los 1.2 m es potencialmente peligroso. A continuación, se hace un recálculo de la cantidad de M_f necesario para reducir el F_B a 1.2 m. Se toma el M_f porque es el único parámetro de entrada que se puede modificar mediante el riego. El recálculo del M_f se realiza mediante la programación lineal (u optimización lineal), una técnica matemática para encontrar soluciones óptimas a problemas que pueden expresarse mediante ecuaciones y desigualdades lineales. La programación lineal tiene cuatro componentes: i) Las Variables de Decisión, un conjunto de valores que deben determinarse para resolver el problema; ii) Las Restricciones, que definen los posibles valores que pueden tomar las variables de un problema de programación lineal, iii) Las Funciones Objetivo, aquellas ecuaciones que han de ser serán maximizadas o minimizadas, iv) Los Datos o parámetros controlables, que suelen ser constantes. El problema de optimización lineal que se plantea es minimizar el suministro de agua por riego para disminuir la longitud de llama a un máximo de 1.2 m. La estructura del problema sería la siguiente:

- Variable decisión: Valor del M_f final
- Función objetivo: Minimizar M_f inicial - M_f final
- Restricción: $F_B \leq 1.2$ m
- Parámetros: todas las variables que no varían con el riego.

Por último, se cuantifica cuánta agua se necesita aportar en función la diferencia entre M_f final y M_f inicial y finalmente, se estima la cantidad de agua a aportar para causar la variación necesaria en el contenido hídrico del sistema (M_f).



Figura 1. Pasos del algoritmo de riego preventivo basado en el comportamiento del fuego.

4. Resultados

4.1. Evolución del contenido de humedad del sistema (M_f , %)

El M_f se genera en base al depósito de contenido de agua del matorral y del mantillo (l/m^2). Se observa (Figura 2) como el contenido de agua del matorral tiene un patrón inverso a la evapotranspiración (E_{to} , mm), mientras que el contenido de agua del mantillo sigue la dinámica del contenido de agua del suelo superficial y profundo, siendo por tanto afectado en gran medida por la ocurrencia de la precipitación. Estas relaciones condicionan los valores del M_f , puede observarse en que las precipitaciones provocan una variación positiva de sus valores. A su vez, se aprecia como las variaciones ocurren de forma abrupta y su valor va disminuyendo en el tiempo hasta el siguiente evento de precipitación (Figura 2).

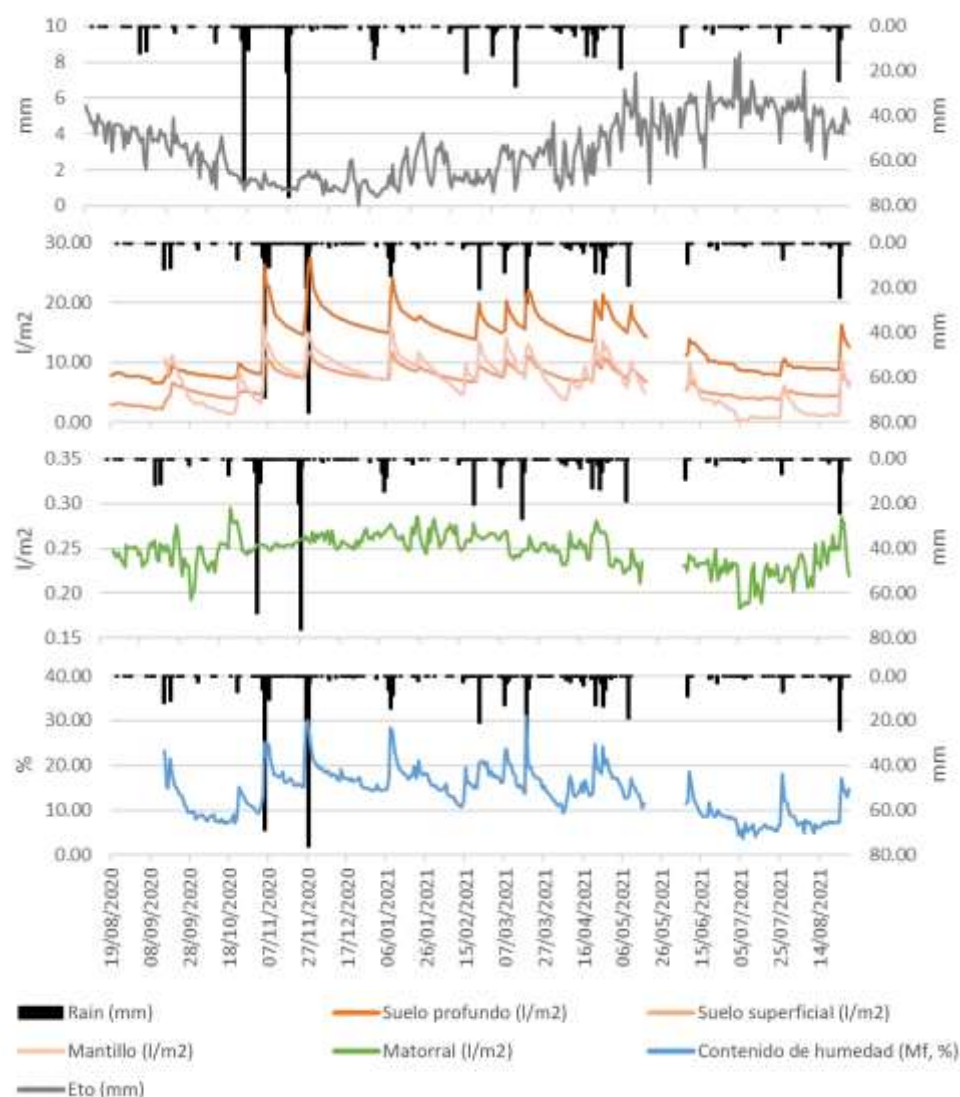


Figura 2. Serie temporal del contenido de humedad (M_f , %) junto con sus componentes principales, contenido de agua del mantillo (l/m^2) y del matorral (l/m^2), y las variables ambientales estrechamente relacionadas: contenido de agua del suelo superficial (l/m^2) y profundo (l/m^2), evapotranspiración (E_{to} , mm) y precipitación (eje y derecho) (mm).

Por otro lado, la relación lineal entre el M_f (%) y el contenido de humedad del mantillo (l/m^2) generan un R^2 del 0.9307 (Figura 3). Esta ecuación determina la relación existente entre el M_f y el SPAC.

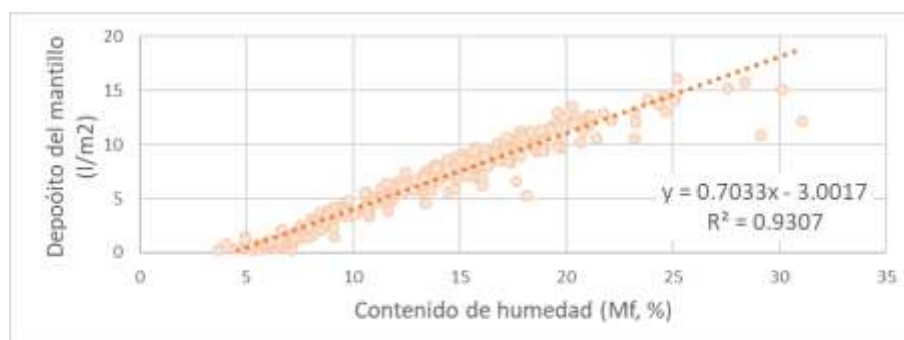


Figura 3. Ecuación lineal del contenido de humedad (M_f) y del contenido de agua del mantillo.

4.2. Serie temporal del comportamiento del fuego

Las precipitaciones tienen un efecto marcado en el comportamiento del incendio; se observa cómo se producen picos en el comportamiento del fuego cuando éstas se producen; así, el Q_{ig} presenta picos de subida, mientras que F_B manifiesta fuertes disminuciones en su valor. Esto se traduce en correlaciones significativas, dando una correlación del 0.38 entre la precipitación y el Q_{ig} y un -0.39 entre la precipitación y el F_B (Figura 4).

Además, se puede apreciar el cambio que tiene el comportamiento (Q_{ig} más bajas y F_B más altas) en los periodos secos en comparación con la época de lluvias o periodos húmedos (Figura 4). Se ha observado una media en el periodo seco para Q_{ig} de $24,315.91 \pm 9,094.97$ kJ/kg con un mínimo de 10,142.58 kJ/kg, mientras que en las épocas más o menos lluviosas (húmeda e intermedia) la media es de $46,419.16 \pm 9,218.5$ kJ/kg, con un mínimo de 7,767.57 kJ/kg. Por otro lado, en lo referente al F_B , en la época seca la media es de 1.04 ± 0.24 m con un máximo de 1.84 m, mientras que, durante la época húmeda, estas longitudes se reducen a una media de 0.65 ± 0.19 m y un máximo de 1.12 m.

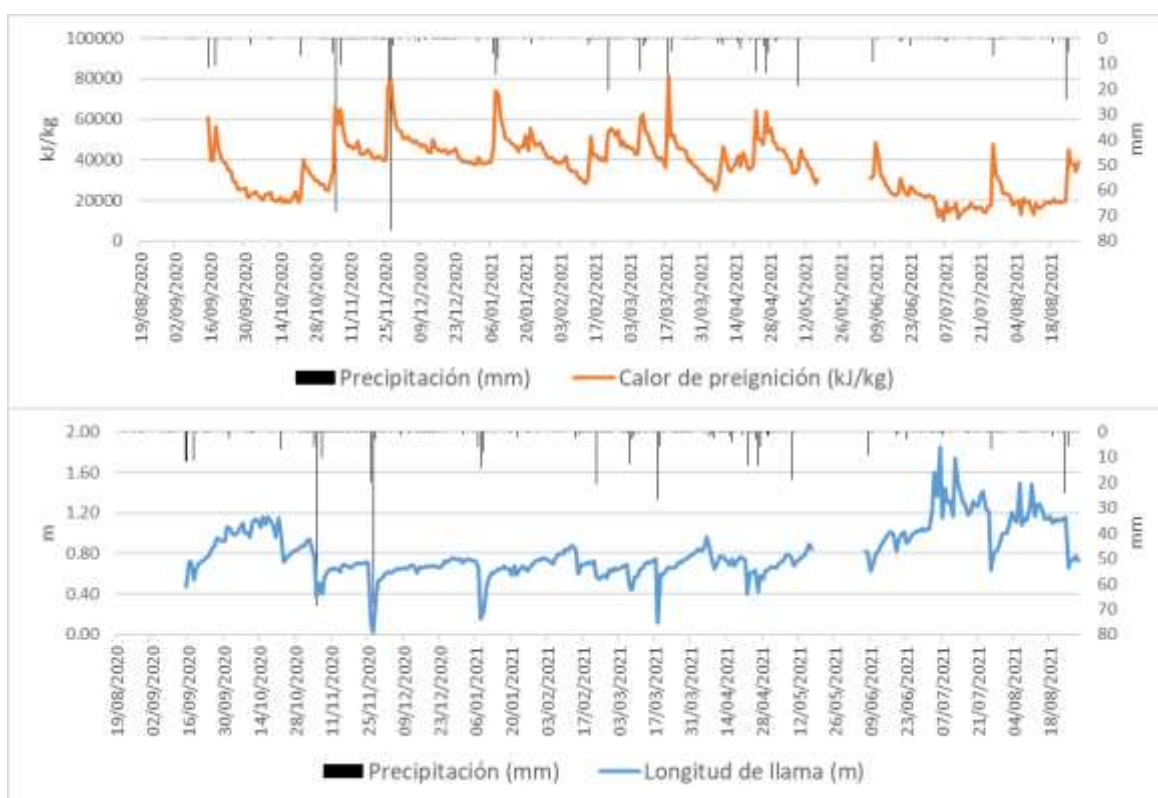


Figura 4. Serie temporal del calor de preignición (Q_{ig} , kJ/kg) (arriba) y de la longitud de llama (F_b , m) (abajo) junto con las precipitaciones ocurridas.

4.3. Variación del comportamiento del fuego

Se seleccionaron siete eventos de lluvia del periodo seco, los cuales se sitúan entre precipitaciones de 1 mm a 7 mm: i) 2.771 (02/10/2020), ii) 7.055 (22/10/2020), iii) 1.343 (19/06/2021), iv) 3.043 (23/06/2021), v) 1.342 (07/07/2021), vi) 7.038 (26/07/2021) y vii) 1.802

(19/08/2021). La situación climática estándar durante este periodo ha supuesto un M_f medio de 9.14 ± 3.5 %, y la temperatura de 22.6 ± 3.63 °C. Durante dicho periodo se aprecia claramente el efecto de la magnitud de la lluvia en la humedad del sistema: lluvia de 1.342 mm con M_f del 3.6 %, seguida de la lluvia de 7.038 mm con M_f de 6.5 % y de la lluvia de 1.802 mm con M_f de 6.9 % (Figura 5).

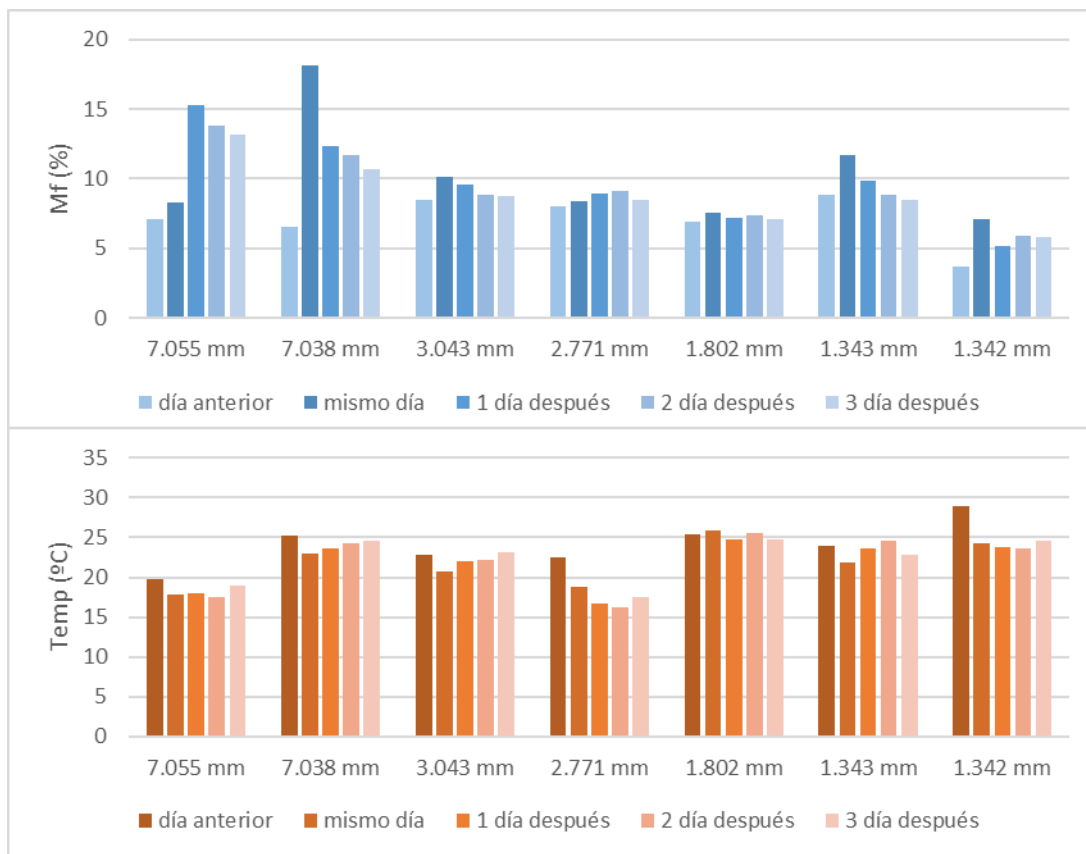


Figura 5. Contenido de humedad (M_f) y temperatura media durante los eventos las lluvias seleccionados en este trabajo.

Los mayores incrementos de Q_{ig} se han producido el mismo día de la lluvia; en el caso de la lluvia de 7.038 mm el Q_{ig} aumentó 30,061 kJ/kg, mientras que en las lluvias de 1.3mm aumentó en promedio 7.9 kJ/kg. Las lluvias restantes (a excepción de la lluvia de 7.055 mm que tuvo una lluvia seguida al día después) no tuvieron una variación muy marcada, aunque la mayor se produjo el día de la lluvia: la lluvia 3.043 mm aumentó un 4,163 kJ/kg, la de 1.802 mm un 1,713 kJ/kg y por último la de 2.771 mm un 866 kJ/kg (Figura 6).

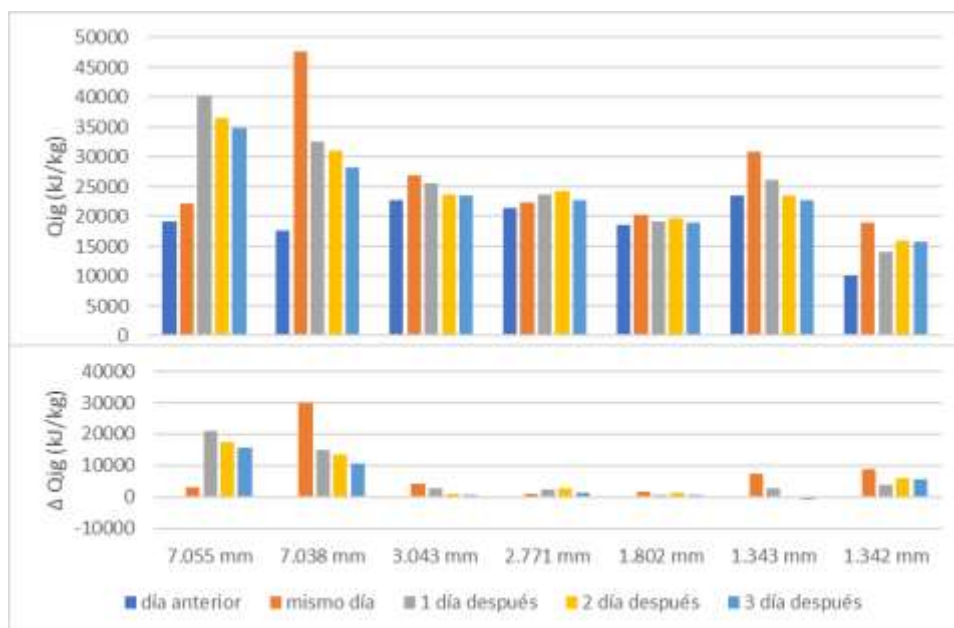


Figura 6. Situación del calor de preignición (Q_{ig} , kJ/kg) en los eventos de lluvias seleccionados, representando el día previo a la lluvia, el mismo día de la lluvia y los tres días posteriores (arriba), así como la variación que sufrieron (abajo). La variación se estudió con respecto al día previo a la lluvia.

En el caso de la longitud de llama, se observa que la mayor reducción se produjo con la lluvia de 1.342 mm, cambiando el valor inicial de 1.84 m a 1.15 m (0.69 m), mientras que la lluvia de 7.038 mm tuvo una reducción de 0.58 m pasando de una F_b de 1.22 a una de 0.64. La lluvia de 7.055 mm continuó teniendo un mayor efecto el día después variando un 0.43 m, en contraste con el primer día que varió 0.13 m. El resto de lluvias, 3.043, 2.771 mm, 1.802 y 1.343 m tuvieron un ligero efecto, provocando una variación media de 0.09 ± 0.06 m (Figura 7).

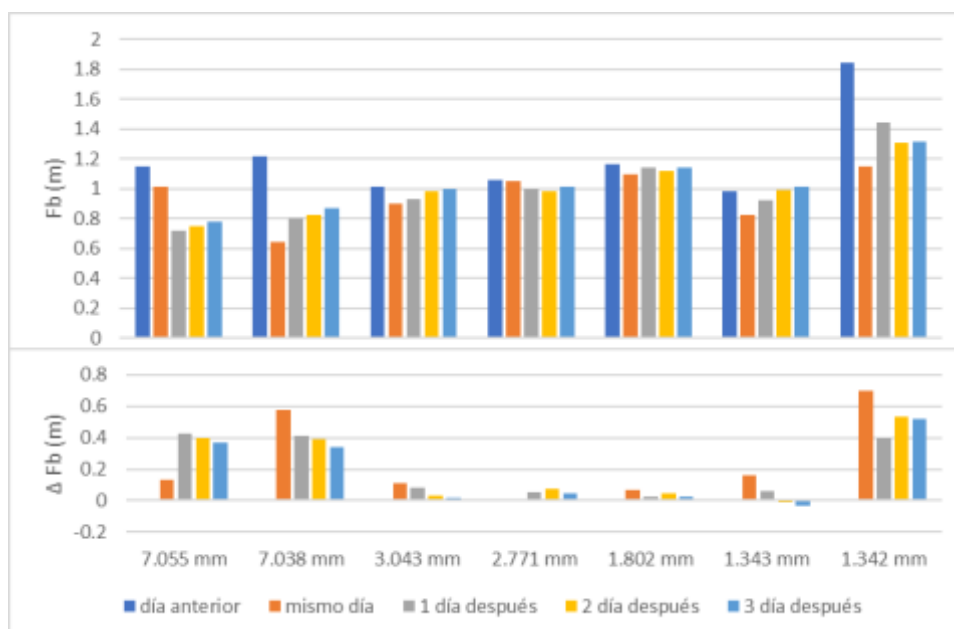


Figura 7. Situación de la longitud de llama (F_b , m) en los eventos de lluvias seleccionados, representando el día previo a la lluvia, el mismo día de la lluvia y los tres días posteriores (arriba), así como la variación que sufrieron (abajo). La variación se estudió con respecto al día previo a la lluvia.

4.4. Caso práctico del algoritmo de riego preventivos

Se ha tomado el día 06/07/2021 como ejemplo. Los componentes del M_f contaban con diferentes contenidos de humedad, específicamente la hojarasca tenía un 0.76 %, el 1h un 5.49 %, el 10h un 6.49 % y el matorral un 47.55 %. Esto dio lugar a un M_f final de 3.6 %. Por otro lado, se midió una velocidad del viento máxima de 4.107 m/s a 2 m (365.3 ft/min). Con estos inputs junto con los ya descritos en la Tabla 1 se obtuvieron los parámetros de estudio, con valores para Q_{ig} de 4,360.52 Btu/lb (1,0142 kJ/kg) y para F_B de 6.15 ft (1.8 m). Al obtener una F_B mayor a 1.2 m significa que hay una situación de riesgo por el comportamiento potencial del incendio. El algoritmo de optimización estimó un valor de M_f final de 6.80 % para poder obtener una F_B de 4 ft bajo la situación meteorológica de estudio. Por último, el M_f inicial de 3.68 % corresponde a un contenido de agua en el depósito del mantillo de 0.01 l/m² y el M_f final corresponde a un 1.78 l/m². Por lo que el agua que debería aportar el riego tendrá que tener una variación en el depósito del mantillo de 1.76 l/m². El agua a aportar con el sistema deberá tener en cuenta también la evaporación (intercepción y evaporación durante la lluvia) para que la entrada neta al sistema sea de la cantidad fijada.

5. Discusión

La conceptualización volumétrica del SPAC en el EHV ha sido útil para poder cuantificar el volumen de agua por unidad de área de la parcela que contienen los diferentes depósitos del sistema (l/m²), centrándose este trabajo en los depósitos del mantillo y del matorral por ser los que se relacionan con el comportamiento del fuego en superficie. Estas medidas han hecho posible la estimación del contenido de humedad de los combustibles (%), es decir, estos parámetros han conseguido conectar el SPAC con el comportamiento del fuego. El depósito del matorral sirvió para estimar el contenido hídrico del combustible vivo, el cual tiene múltiples mecanismos complejos biológicos de intercambio de agua con el exterior y que regulan la pérdida por transpiración, además de verse influenciado en gran medida por variables ambientales como la cantidad de agua disponible en el suelo, los niveles de déficit de presión de vapor, etc., y, por lo tanto, es espacial y temporalmente más variable que el depósito del mantillo (Chuvieco et al., 2002). Por otro lado, el depósito del mantillo contribuyó a la estimación del contenido de humedad del combustible muerto (Rakhmatulina, 2021); esta humedad dependerá de su profundidad, de la relación superficie-volumen de sus componentes, de sus características físicas, de su composición química, etc. Diferentes estudios han observado como esta humedad depende casi en exclusiva de las condiciones meteorológicas como la humedad relativa, la precipitación, el déficit de presión de vapor y la temperatura (Camia et al., 2003). Esta relación tan estrecha entre el combustible muerto y por tanto del depósito del mantillo con las variables meteorológicas hace que sea el conector entre el riego y el SPAC, de manera que se consigue tener los tres grandes pilares del algoritmo conectados: Riego-SPAC-Fuego.

La prescripción de riegos de prevención altera el comportamiento del fuego mediante el aumento del contenido de humedad de los combustibles y por tanto de la propagación y la emisión de radiación del incendio (Dalmau-Rovira et al., 2020). Dos de los parámetros implicados en estudiar la efectividad del riego son la capacidad operativa del sistema (Q_{ig}) y la medición de la peligrosidad potencial (F_B). La capacidad operativa del sistema es un factor clave a tener en cuenta en la prevención y combate contra los incendios, ya que el propio sistema actúa de obstáculo contra la ignición y la posterior propagación del posible incendio. Otro factor a tener en cuenta es la peligrosidad potencial asociada al comportamiento del incendio, ya que determinará, en el caso de que ocurra una ignición, cómo evolucionará dicho incendio. Ambos parámetros han sido afectados por el riego; tras el aporte de agua la capacidad operativa aumentó y por consiguiente la peligrosidad disminuyó. Aunque se ha observado que la cantidad de agua proporcionada al sistema no se traduciría

en un efecto directo en el comportamiento de incendio, es decir, los mayores aportes de agua (más mm) no se traducían en los mayores aumentos de la capacidad operativa o en la disminución de la peligrosidad. Esto es debido a que las variaciones estaban influidas por variables como el contenido previo de agua del sistema y por variables meteorológicas como la temperatura, todo ello integrado dentro del algoritmo desarrollado.

La optimización del riego ha sido ampliamente estudiada en el campo de la agronomía (Pisinaras et al., 2013; Reza et al., 2018), aunque desde el punto de vista de prevención contra incendio todavía queda mucho por desarrollar. En primer lugar, la absorción del agua aportada por el riego no es lineal, es decir, llega a puntos de saturación (Datta et al., 2017), por lo que mayores cantidades de agua no se traducen en mayores eficiencias. Otra parte importante de la optimización es controlar las situaciones de peligrosidad por medio del monitoreo de campo, para poder administrar el agua solo en los momentos cruciales y cuando la amenaza sea potencialmente alta. El aumento de la eficacia de los riegos y por tanto para una mayor defensa contra incendios será necesario llevar a cabo acciones complementarias al riego tales como la modificación de la estructura del combustible (Bajocco & Ricotta, 2008; Loepfe et al., 2010), la reducción de su carga (Vega-García & Chuvieco, 2006), o incluso promover plantaciones con altos contenidos de humedad y baja inflamabilidad con la idea de generar cortafuegos verdes (Montgomery, 1973; Cui, et al 2017; Curran et al., 2018).

6. Conclusiones

La tipificación del SPAC bajo el concepto del EHV ha sido útil para la cuantificación del contenido de agua del sistema y su posterior aplicación en el comportamiento del fuego.

El estudio sobre los riegos prescritos en la prevención contra incendios es un campo muy novedoso (la piro-eco-hidrología) que necesita de un mayor estudio y desarrollo. Este estudio pionero en su género contribuye en este sentido. La relación que existe entre la cantidad de agua aportada y el efecto en el comportamiento del incendio no es lineal; este efecto dependerá de otras variables como condiciones meteorológicas y el estado hídrico del sistema previo al riego. El no ser una relación lineal, la optimización del agua será clave para poder sacar el mayor rendimiento al agua empleada.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por Urban Innovation Actions – European Union (UIA03-338 – GUARDIAN Project).

8. Bibliografía

ANDREWS, P. L.; 2012. Modeling wind adjustment factor and midflame wind speed for Rothermel's surface fire spread model. *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-266. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.* 39 p., 266.

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.

BAJOCCO, S.; & RICOTTA, C.; 2008. Evidence of selective burning in Sardinia (Italy): which land-cover classes do wildfires prefer?. *Landscape Ecology*, 23(2), 241-248.

BAKŠIĆ, N.; BAKŠIĆ, D.; & JAZBEC, A.; 2017. Hourly fine fuel moisture model for *Pinus halepensis* (Mill.) litter. *Agricultural and Forest Meteorology*, 243, 93-99.

BALAGUER-ROMANO, R.; DÍAZ-SIERRA, R.; MADRIGAL, J.; VOLTAS, J.; & RESCO DE DIOS, V.; 2020. Needle senescence affects fire behavior in aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) stands: A simulation study. *Forests*, 11(10), 1054.

BYRAM, GEORGE M.; 1959. Combustion of forest fuels. In: Davis, Kenneth P. Forest fire control and use. New York, NY: McGraw-Hill Book Co.: 61-89.

CAMIA, A.; LEBLON, B.; CRUZ, M.; CARLSON, J. D.; & AGUADO, I.; 2003. Methods used to estimate moisture content of dead wildland fuels. In Wildland fire danger estimation and mapping: The role of remote sensing data (pp. 91-117).

CHUVIECO, E.; RIAÑO, D.; AGUADO, I.; & COCERO, D.; 2002. Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: applications in fire danger assessment. *International journal of remote sensing*, 23(11), 2145-2162.

CURRAN, T. J.; PERRY, G. L.; WYSE, S. V.; & ALAM, M. A.; 2018. Managing fire and biodiversity in the wildland-urban interface: A role for green firebreaks. *Fire*, 1(1), 3.

CUI, X.; ALAM, M. A.; PERRY, G. L.; PATERSON, A. M.; WYSE, S. V.; & CURRAN, T. J.; 2019. Green firebreaks as a management tool for wildfires: Lessons from China. *Journal of environmental management*, 233, 329-336.

DALMAU, F.; 2019. Creación de áreas de Interfaz Urbano-Forestal defendibles contra incendios mediante la implementación de riegos prescritos.

DALMAU-ROVIRA, F.; QUINTO, F.; & GORGONIO, E.; 2020. Riegos Prescritos o Cortafuegos verdes en la Interfaz Urbano – Forestal. *Revista Incendios y Riesgos Naturales*. Vol 1, Núm 1.

DATTA, S.; TAGHVAEIAN, S.; & STIVERS, J.; 2017. Understanding soil water content and thresholds for irrigation management.

GANTEAUME, A.; CAMIA, A.; JAPPIOT, M.; SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; LONG-FOURNEL, M.; & LAMPIN, C.; 2013. A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environmental management*, 51(3), 651-662.

INTERNATIONAL CODE COUNCIL, ICC.; 2018. 2018 International Wildland-Urban Interface Code. <https://centrallyonfire.org/wp-content/uploads/2021/03/2018-IWUIC.pdf>

LOEPFE, L.; MARTINEZ-VILALTA, J.; OLIVERES, J.; PIÑOL, J.; & LLORET, F.; 2010. Feedbacks between fuel reduction and landscape homogenisation determine fire regimes in three Mediterranean areas. *Forest Ecology and Management*, 259(12), 2366-2374.

MARTÍN, L. G.; 2012. Las interfaces urbano-forestales: un nuevo territorio de riesgo en España. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*.

MONTGOMERY, K. R.; 1973. Green Belts for Brush Fire Protection and Soil Erosion Control in Hillside Residential Areas. Dept, of Arboreta and Botanic Gardens, County of Los Angeles. Arcadia, Calif.

PAUSAS, J. G.; & FERNÁNDEZ-MUÑOZ, S.; 2012. Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Climatic change*, 110(1), 215-226.

PISINARAS, V.; PETALAS, C.; TSIHRINTZIS, V. A.; & KARATZAS, G. P.; 2013. Integrated modeling as a decision-aiding tool for groundwater management in a Mediterranean agricultural watershed. *Hydrological Processes*, 27(14), 1973-1987

RAKHMATULINA, E.; STEPHENS, S.; & THOMPSON, S.; 2021. Soil moisture influences on Sierra Nevada dead fuel moisture content and fire risks. *Forest Ecology and Management*, 496, 119379.

RECA, J.; TRILLO, C.; SÁNCHEZ, J. A.; MARTÍNEZ, J.; & VALERA, D.; 2018. Optimization model for on-farm irrigation management of Mediterranean greenhouse crops using desalinated and saline water from different sources. *Agricultural Systems*, 166, 173-183.

ROTHERMEL, R. C.; 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *Res. Pap. INT-115*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p

SCOTT, J.H.; & BURGAN, R. E.; 2005. A new set of standard fire behavior fuel models for use with Rothermel's surface fire spread model. *RMRS-GTR-153*. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). (2001). Urban Wildland Interface Communities within the vicinity of Federal lands that are at high risk from wildfire, *66 Federal Register*, p. 753 (Doc. No.: 01-52)

VACCA, P.; CABALLERO, D.; PASTOR, E.; & PLANAS, E.; 2020. WUI fire risk mitigation in Europe: A performance-based design approach at home-owner level. *Journal of Safety Science and Resilience*, 1(2), 97-105.

VEGA-GARCÍA, C.; & CHUVIECO, E.; 2006. Applying local measures of spatial heterogeneity to Landsat-TM images for predicting wildfire occurrence in Mediterranean landscapes. *Landscape Ecology*, 21(4), 595-605

VILÀ-CABRERA, A.; COLL, L.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; & RETANA, J.; 2018. Forest management for adaptation to climate change in the Mediterranean basin: A synthesis of evidence. *Forest Ecology and Management*, 407, 16-22.