



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

La efectividad de los sistemas lineales preventivos de defensa frente a incendios forestales, diseño procedimental para su testado y evaluación

ORTEGA, M.¹, MOLINA, J.R.¹, y RODRÍGUEZ Y SILVA, F.¹

¹ Laboratorio de Incendios Forestales, Departamento Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba. Email: macarena.ortega@uco.es, jrmolina@uco.es, ir1rosif@uco.es

Resumen

Las infraestructuras preventivas tienen gran importancia para la mitigación de la progresión dinámica y energética del fuego y la disminución de la dificultad de extinción, facilitando una respuesta segura y eficiente de los medios. Dadas las restricciones presupuestarias se tiende a homogeneizar su diseño para facilitar la ejecución, sin embargo, en ocasiones, carece de fundamento técnico y la ocurrencia de incendios forestales pone en entredicho su efectividad y la justificación de su inversión económica. Además, las masas forestales son dinámicas y las infraestructuras preventivas que fueron construidas con unos criterios de diseño pueden dejar de cumplir sus objetivos con el paso del tiempo.

Mediante la técnica de machine learning denominada árbol de decisión, este estudio pretende la generación de un modelo predictivo de la efectividad de las infraestructuras preventivas a partir de sus características estructurales y variables del comportamiento de fuego en el entorno de las mismas. Se entiende como efectividad de una infraestructura preventiva a la probabilidad de control del fuego que presenta, es decir, a su capacidad de contención del avance de un incendio forestal. Se precisa de la generación de una amplia base de datos de incendios forestales reales (2011-2018) que interceptaron infraestructuras preventivas durante su progresión. Han sido identificadas y caracterizadas un total de 563 intersecciones de este tipo. Tras esta evaluación se han reconocido como variables de mayor importancia en la efectividad el tipo trabajo de extinción que sobre la infraestructura preventiva se apoya, la longitud de llama y el ángulo de intersección del fuego con la infraestructura preventiva. El análisis de la efectividad de las infraestructuras preventivas permitirá una mejor optimización de la capacidad de contención de los incendios forestales y un incremento de la seguridad de los combatientes. Por tanto, los resultados de este estudio constituyen una herramienta de gran utilidad para la toma de decisiones a nivel preventivo y operacional de los gestores del territorio y los dispositivos de extinción de incendios.

Palabras clave

Selvicultura preventiva, cortafuegos, comportamiento del fuego, capacidad de contención, seguridad de los combatientes, trabajo de extinción, inteligencia artificial, árbol de decisión.

1. Introducción

Los incendios forestales constituyen una de las principales amenazas para los ecosistemas y la sociedad. El cambio climático, con su efecto directo en la disminución de la humedad del combustible, así como el cambio de uso del suelo, a través del incremento de la biomasa de los montes, son los principales responsables de las alteraciones experimentadas por los regímenes de incendios forestales en las últimas décadas, constatándose un aumento en su tamaño, severidad y frecuencia (PAUSAS & FERNÁNDEZ-MUÑOZ, 2012). Estos nuevos regímenes configuran escenarios cada vez más complejos, en los que se prevé el desarrollo de un mayor número de grandes incendios forestales con comportamiento extremo, fuera de capacidad de extinción, derivando en un considerable incremento de los impactos económicos y los costes de extinción por hectárea (MOLINA et al, 2019). La estadística ha demostrado que la extinción y la prevención han sido efectivas en la reducción del número potencial de grandes incendios forestales (FERNANDES et al,

2016). Pese a los esfuerzos realizados por los dispositivos de extinción, el manejo de los incendios forestales es cada vez más complejo. Aumentar la profesionalización y el número de recursos destinados a su extinción no es suficiente para reducir el número de incendios ni los daños derivados de los mismos (RYTWINSKI & CROWE 2010). Esta tendencia afianza el papel fundamental que juega la prevención de incendios en el manejo forestal. Sin embargo, para adaptarla a los nuevos escenarios, es necesario redefinir la estructura preventiva del siglo XXI, adquiriendo relevancia la incorporación de fundamentos científicos a los procesos de toma de decisiones de los técnicos gestores del territorio. Para ello, se requiere de la optimización espacial de la reducción de la combustibilidad, principalmente en cuencas o polígonos de gran valor de los recursos (O'CONNOR et al, 2016).

Dadas las restricciones presupuestarias de los dispositivos de extinción, se tiende a la homogenización del diseño de las actuaciones preventivas para facilitar su ejecución (VÉLEZ, 2009). Además, las masas forestales son dinámicas y las infraestructuras preventivas que fueron ejecutadas para su defensa con unos criterios de diseño pueden perder efectividad con el tiempo. La falta de fundamento técnico en la planificación y mantenimiento de las actuaciones preventivas provoca que la ocurrencia de incendios forestales ponga en entredicho su efectividad y la justificación de su inversión económica. Este hecho se ha puesto de manifiesto, no solo en España, sino también en países como Estados Unidos, donde el porcentaje de infraestructuras preventivas efectivas ante la ocurrencia de incendios forestales es muy bajo (SYPHARD et al, 2011).

Los sistemas lineales preventivos de defensa son interrupciones en los combustibles forestales que pretenden la minoración de la progresión dinámica y energética del fuego y la disminución de la dificultad de extinción, facilitando una respuesta segura y eficiente de los medios intervinientes para garantizar una reducción de los costes de extinción, de la afección al medio y de los daños ambientales y económicos derivados de la perturbación que suponen los incendios forestales. El cortafuegos es el tipo de infraestructura preventiva más empleada tradicionalmente. En los últimos años, otro tipo de infraestructuras como las áreas preventivas, son las que ganan adeptos dada la mala reputación que se han labrado los cortafuegos a causa de su ineficacia en muchos escenarios.

No se espera que los cortafuegos paren los fuegos por sí mismos (AGEE et al, 2000), si no que proporcionan una interesante multifuncionalidad, tanto desde el punto de vista de la eficacia de los trabajos de extinción como de la seguridad de las operaciones. Por un lado, los tratamientos preventivos reducen la progresión dinámica y energética del avance del fuego, permitiendo en algunas ocasiones el ataque directo. Por otro lado, limitan la incertidumbre acerca de las rutas de escape y zonas de seguridad y el cumplimiento del protocolo de seguridad OCELA (QUILEZ et al, 2020). Consecuentemente, una optimización espacial de los sistemas preventivos reduciría la dificultad y los costes de extinción (RODRÍGUEZ Y SILVA et al, 2020).

La efectividad de las infraestructuras preventivas se define como la probabilidad que presentan de controlar el fuego (MOREIRA et al, 2011). Existe un amplio debate referente a la efectividad de las infraestructuras preventivas. Aunque se ha constatado su efectividad (GREEN, 1977, AGEE et al, 2000), otros autores (DUGUY et al, 2007, SYPHARD et al, 2011, MOREIRA et al, 2011) han señalado su ineficacia en situaciones de condiciones meteorológicas extremas, grandes frentes de incendios y fenómenos convectivos. En este sentido, en la bibliografía existen diferentes metodologías para la evaluación de la efectividad de los sistemas lineales preventivos de defensa. En la mayoría de los estudios (DUGUY et al, 2007; MOREIRA et al, 2011) se evalúa la efectividad en base a sus efectos sobre el combustible y sobre el comportamiento potencial del fuego mediante la comparación de simulaciones en diferentes escenarios. Existen también algunas aproximaciones empíricas a partir de la evaluación del efecto sobre área quemada (AGEE et al, 2000) y la efectividad en incendios reales (SYPHARD et al, 2011). No obstante, se constata la falta de estudios acerca de la efectividad de los tratamientos preventivos en ambiente mediterráneo en escenarios reales de incendios forestales.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio es el desarrollo de un modelo de predicción de la efectividad de los sistemas lineales preventivos de defensa en base a variables del área de estudio (meteorológicas, topográficas, características de la vegetación, comportamiento potencial del fuego), variables constructivas de diseño (tipo de infraestructura, localización y anchura de la misma) y variables operacionales (tipo de trabajo de extinción). La consecución de este objetivo requiere de:

- La identificación de las variables de mayor importancia relativa en la efectividad de las infraestructuras preventivas.
- La generación de un árbol de decisión como herramienta a integrar en la toma de decisiones relativas a ubicación y dimensionamiento de las infraestructuras preventivas.
- El testado o reevaluación de las infraestructuras preventivas existentes con objeto de la maximización de la efectividad.

El incremento de la efectividad de las infraestructuras preventivas permitiría una mejora en la asignación presupuestaria en un territorio. Además, posibilitaría la puesta en valor de las infraestructuras preventivas existentes, optimizando las inversiones, reduciendo la incertidumbre en las operaciones de control y generando oportunidades de trabajo seguro para los combatientes.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

El área de estudio se circunscribe a la Comunidad Autónoma de Andalucía. En el período de estudio (2011-2018) se registraron en Andalucía un total de 645 conatos (<1 ha) y 1301 incendios que quemaron un total de 57143 ha. La distribución de los presupuestos del gobierno regional en dicho período fue de 52% extinción y 48% prevención.

3.2. Recopilación de información

Se creó una base de datos de los incendios que en su progresión interceptaron a una infraestructura preventiva. La fuente de datos original la constituye las fichas resumen que el dispositivo de extinción de incendios de Andalucía (INFOCA) genera de cada uno de los incendios forestales que acontecen en dicha región. En un primer momento, se incorporaron variables meteorológicas (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR)), variables topográficas (Modelo Digital del Terreno de la Junta de Andalucía) y cartografía de modelos de combustible. Posteriormente, con ayuda del simulador Visual Fuego© se incorporaron variables del comportamiento del fuego (velocidad de propagación, longitud de llama) estimado en el momento de la intersección con la infraestructura.

3.3. Análisis de datos

Tras la recopilación de información de la base de datos elaborada, se identificó la efectividad como la variable dependiente (categórica) y 26 variables independientes (categóricas y continuas) como posibles explicativas de la variable dependiente. La efectividad de una infraestructura preventiva es la probabilidad de control del fuego que presenta, es decir, su capacidad de contención del avance de un incendio forestal. De entre los factores reconocidos, se realizó una selección de variables a través de análisis explicativos que permiten seleccionar aquellas que más significativamente afectan a la efectividad evitando variables irrelevantes y correlacionadas. Para ello se usó el programa informático SPSS©. Para analizar la normalidad de las variables cuantitativas se empleó la prueba de Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,05$). El análisis de correlación se realizó antes de la modelización para garantizar la relación entre las variables. Utilizamos el coeficiente de correlación de Spearman para identificar la correlación lineal ($p < 0,05$) entre las

variables cuantitativas sin una distribución normal. La prueba de Chi-cuadrado (χ^2) fue empleada para encontrar la asociación ($p < 0,05$) entre las variables cualitativas y comprobar las distribuciones multinomiales. La V de Cramer se utilizó como medida de asociación entre variables cualitativas.

3.4 Modelo de efectividad

Una vez seleccionado el grupo de variables independientes de mayor importancia para explicar la variable dependiente, la modelización de la efectividad de las infraestructuras preventivas se realizó mediante el programa informático SPSS®. El modelo elegido fue el árbol de decisión, previamente utilizado en otras investigaciones en el ámbito de los incendios forestales, entre ellas para la predicción de su ocurrencia (JAAFARI et al, 2018). Se trata de un método de aprendizaje no supervisado y no paramétrico que permite la creación de reglas para predecir eventos futuros. El modelo se desarrolló con el método de crecimiento CHAID y validación cruzada.

4. Resultados

4.1. Análisis de datos

El 46.9% de las infraestructuras alcanzadas por un frente de fuego durante la progresión de un incendio forestal fueron efectivas para su contención. Este porcentaje de efectividad disminuyó drásticamente (6.66%) cuando sobre las infraestructuras preventivas estudiadas no se apoyó ningún tipo de trabajo de extinción, es decir, cuando la propagación del fuego fue libre. Si sobre las infraestructuras preventivas actuaron medios aéreos, la efectividad de las mismas fue del 15.9%, aumentando considerablemente (76.74%) si en su lugar trabajaron exclusivamente medios terrestres. El máximo de efectividad de las infraestructuras preventivas se alcanzó cuando el trabajo que se desarrolló sobre ellas fue combinado aéreo-terrestre (77.15%) (Figura 1).

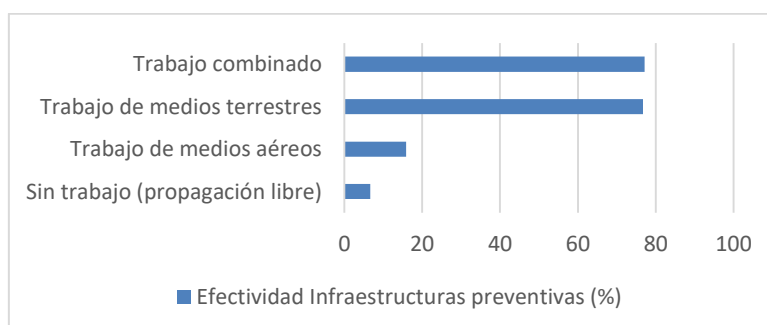


Figura 1. Efectividad de las infraestructuras preventivas en base al tipo de trabajo apoyado sobre ellas.

Las variables seleccionadas tras la exploración estadística fueron: efectividad de la infraestructura preventiva, anchura de la infraestructura preventiva, tipo de trabajo de extinción apoyado sobre ella, longitud del frente de llama, alineación de fuerzas, ángulo de intersección fuego-infraestructura (ángulo que forma la dirección de propagación del frente y el eje longitudinal de la infraestructura), longitud de llama y localización de la infraestructura (Tabla 1). Sin embargo, no todas las variables seleccionadas fueron igual de influyentes en la efectividad, destacando, en base a su importancia normalizada (Figura 2), el tipo de trabajo de extinción apoyado sobre las mismas (48%), la longitud de llama del fuego (27%) y el ángulo de intersección fuego-infraestructura (18%).

Tabla 1. Variables de estudio seleccionadas tras análisis exploratorios.

| Variable | Tipo según posición | Tipo según naturaleza | Fuente | Rango | Unidades/Categorías |
|---|---------------------|-----------------------|----------------|-----------|--|
| Efectividad de la infraestructura | Dep | QI | Propia | 0-1 | 0 (No efectiva) 1 (Efectiva) |
| Anchura de la infraestructura | Ind | Qn | Propia | 1.5-450 | metros |
| Trabajo de extinción apoyado sobre la infraestructura | Ind | QI | INFOCA | 1-4 | 1 (Trabajo combinado) 2 (Trabajo terrestre) 3 (Trabajo aéreo) 4 (Propagación libre) |
| Longitud del frente de llama | Ind | QI | INFOCA | 1-8 | 1 (<50 m) 2 (50-100 m) 3 (100-250 m) 4 (250-400 m) 5 (400-600 m) 6 (600-800 m) 7 (800-1,000 m) 8 (>1,000 m) |
| Variable | Tipo según posición | Tipo según naturaleza | Fuente | Rango | Unidades/Categorías |
| Alineación de fuerzas | Ind | QI | Campbell, 1995 | 0-3 | 0 (Sin alineación 0/3) 1 (Alineación un factor 1/3) 2 (Alineación dos factores 2/3) 3 (Alineación plena 3/3) |
| Ángulo de intersección fuego-infraestructura | Ind | QI | Propia | 1-3 | 1 (Casi paralelo) 2 (Lateral) 3 (Perpendicular) |
| Longitud de llama | Ind | Qn | Byram, 1959 | 0.1-17.15 | metros |
| Localización de la infraestructura | Ind | QI | Propia | 1-5 | 1 (Máxima pendiente) 2 (Llano) |

| | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | 3 (Divisoria) 4 (Media ladera) 5 (Fondo de barranco) |
|--|--|--|--|--|--|

Ql (variable cualitativa), Qn (variable cuantitativa), Ind (variable independiente), Dep (variable dependiente).

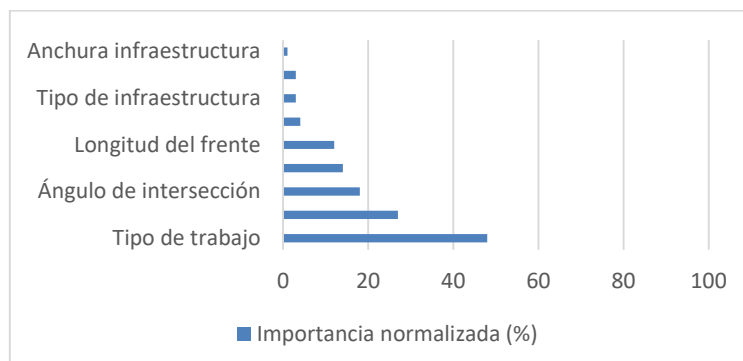


Figura 2. Importancia normalizada de las variables de estudio seleccionadas.

4.2. Árbol de decisión

El modelo de árbol de decisión generado clasificó los casos efectivos-no efectivos con un porcentaje global de fiabilidad del 85.5%. Las variables independientes que intervinieron en el modelo desarrollado fueron las siguientes: el tipo de trabajo de extinción apoyado sobre la infraestructura preventiva según el medio interviniente (terrestre, aéreo o combinado), la longitud de llama del fuego, la anchura de la infraestructura preventiva, el ángulo de intersección fuego-infraestructura (ángulo que forma la dirección de propagación del frente y el eje longitudinal de la infraestructura) y la localización de la infraestructura preventiva (su ubicación en el territorio desde el punto de vista de la topografía). En base al árbol de decisión generado (Figura 3), resultó que la efectividad de las infraestructuras preventivas dependió, en primer lugar, del tipo de trabajo apoyado en las mismas, siendo el 77.1 % efectivas si sobre ellas se desarrolló trabajo terrestre o combinado (aéreo-terrestre). Dentro de este grupo de infraestructuras preventivas, si el frente del fuego que las interceptó lo hizo con un comportamiento en el que desarrolló una longitud de llama inferior a 1.2 metros (lo que permite el ataque directo de los medios terrestres) la efectividad alcanzada es del 100%, disminuyendo conforme aumentaba este valor, llegando a igualarse con el porcentaje de no efectividad para longitudes de llama mayores de 3.3 metros. Para longitudes de llama entre 1.2 y 3 metros, anchuras de cortafuegos superiores a 6.5 metros garantizaron altas probabilidades de éxito de las infraestructuras preventivas (92.2%). Si la anchura era menor de 6.5 metros entraba en juego, de manera determinante, el ángulo de intersección del fuego con la infraestructura preventiva, ya que para ángulos muy bajos (intersecciones casi paralelas asimiladas a comportamiento de fuego de flancos) la efectividad aumentaba hasta el 94.7%, reduciéndose al 60% cuanto más perpendiculares fueran las intersecciones. En intersecciones perpendiculares (comportamiento de fuego de cabeza), es la localización de la infraestructura en el territorio la determinante de su efectividad, pues aquellas construidas en las divisorias aumentaron su efectividad hasta el 89.5% frente al 46.3% del resto de localizaciones.

En ausencia de trabajo terrestre, es decir, en propagaciones libres o aquellas en las que solo trabajaron medios aéreos, la efectividad de los cortafuegos fue del 9.9%. Este valor creció considerablemente, hasta el 46.7% cuando las intersecciones fueron casi paralelas. En intersecciones laterales en propagación libre la efectividad de las infraestructuras fue del 17.5%, incrementándose considerablemente hasta el 40% si sobre ellas se apoyó trabajo aéreo. En intersecciones perpendiculares la efectividad lograda fue realmente baja (5.6%), alcanzando el valor de 16.5% si las infraestructuras preventivas se asentaban sobre terreno llano.

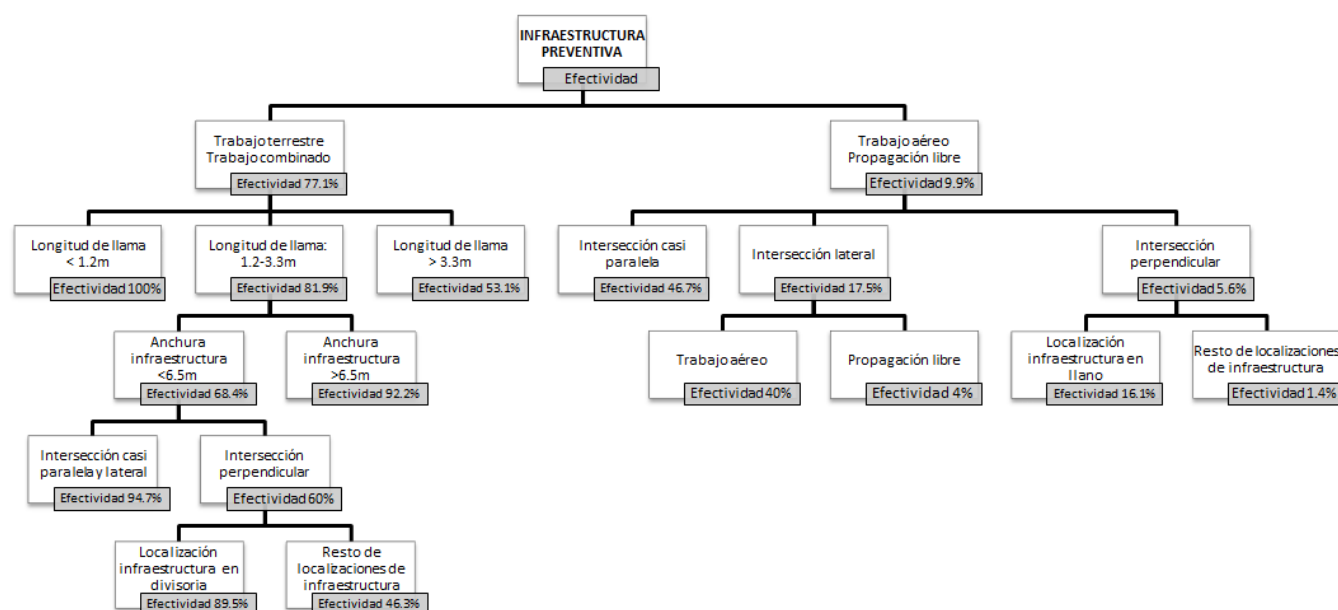


Figura 3. Estructura del árbol de decisión modelizado.

5. Discusión

La efectividad alcanzada por las infraestructuras preventivas en la zona de estudio fue del 46.9% en consonancia con otros estudios como SYPHARD et al, (2011) que señalaron una efectividad del 46% en infraestructuras preventivas en California (Estados Unidos). Nuestro resultado del 6.6% de infraestructuras preventivas que en propagación libre son efectivas para controlar un incendio coincide también con el resultado de otros estudios (AGEE et al, 2000). Ese porcentaje se corresponde con incendios de baja intensidad, coincidiendo con lo que QUÍLEZ et al, (2020) reflejaron acerca de la construcción de las infraestructuras de prevención de manera tradicional, dimensionadas para incendios de baja intensidad fácilmente controlables con los medios de extinción de los dispositivos, pero que no son eficientes en fuegos de alta intensidad.

Tradicionalmente, la anchura de las infraestructuras preventivas ha sido la variable más considerada a la hora de evaluar su efectividad (AGEE et al, 2000; CUI et al, 2019). Sin embargo, al igual que apuntó SYPHARD et al (2011), este estudio demuestra que la anchura no es la única variable que debe tenerse en cuenta, ya que existen otros parámetros con mayor importancia relativa e influencia. Las variables más influyentes en la efectividad de los sistemas lineales preventivos de defensa que se han identificado en este trabajo han sido: tipo de trabajo de extinción apoyado sobre las infraestructuras preventivas, la longitud de llama del fuego y el ángulo de intersección fuego-infraestructura. Otros autores también señalaron el trabajo de extinción (AGEE et al, 2000; SYPHARD et al, 2011; KATUWAL et al, 2016) y la longitud de llama (AGEE et al, 2000; KATUWAL et al, 2016) como las variables predictivas de mayor importancia para la determinación de su efectividad. Sin embargo, el ángulo de intersección fuego-infraestructura no ha sido un factor considerado en investigaciones previas. Nuestro modelo no tiene en cuenta variables significativas en otros estudios, como las condiciones meteorológicas, las características del combustible en el entorno de las infraestructuras preventivas y la topografía del territorio en el que se asientan (AGEE et al, 2000; SYPHARD et al, 2011; THOMPSON et al, 2021). No obstante, nuestro modelo incluye la longitud de llama, que es una variable que indirectamente engloba a todas estas variables no consideradas explícitamente en el modelo.

El trabajo de los medios aéreos no es suficiente para la contención de un frente, alcanzando una efectividad del 15.9%, aunque permite un incremento de los rendimientos de los medios

terrestres en la contención del perímetro (SYPHARD et al, 2011; MOLINA et al, 2022). Es necesario el trabajo de los medios terrestres para las labores de contención del fuego. La existencia de infraestructuras preventivas donde los medios terrestres puedan desarrollar un ataque con seguridad incrementa la efectividad hasta el 77.1%. No obstante, también dependerá de la longitud de llama que desarrolle el fuego a su llegada a la infraestructura preventiva. Con longitudes de llama menores de 1.2 metros, valor límite aproximado considerado para posibilitar el ataque directo (VÉLEZ, 2009), la efectividad es del 100%. Sin embargo, con llamas superiores a 3.3 metros la efectividad se reduce a un 53.1%, requiriendo los medios terrestres del apoyo de los medios aéreos para bajar la longitud de llama o de mayores anchuras de la infraestructura preventiva para garantizar la distancia de seguridad (PAGE & BUTLER, 2017). Respecto al ángulo de intersección fuego-infraestructura, la metodología de Campbell (1995) señaló la importancia de la alineación de los tres vectores de propagación del fuego (pendiente, viento e insolación) en su progresión dinámica y energética. La llegada a la infraestructura preventiva de un frente con un ángulo de intersección casi paralelo (comportamiento de flanco) en comparación con ángulos más perpendiculares (comportamiento de fuego de cabeza) incrementó la efectividad de la misma. Ante la llegada de un incendio de cabeza a una infraestructura, adquirió gran importancia su localización, siendo las ubicaciones en divisoria las más eficaces. Esto está en consonancia con la propuesta de localizar las infraestructuras preventivas en las divisorias coincidiendo con la identificación de Perímetros Operacionales Delineables (O'CONNOR et al, 2016) y Puntos Estratégicos de Gestión (MADRIGAL et al, 2019).

El modelo estadístico de árbol de decisión desarrollado en este trabajo presenta una alta bondad de ajuste y se muestra como buen estimador de la efectividad de las infraestructuras preventivas. Además, se trata de un modelo de sencilla interpretación sin la necesidad de aplicación de fórmulas matemáticas y, por lo tanto, de mayor aplicabilidad entre los técnicos gestores del territorio. Futuros estudios deberán analizar el potencial de las redes neuronales para la identificación de la efectividad de las infraestructuras preventivas en comparación con modelos de la estadística tradicional. Los estudios de inteligencia artificial no son nuevos en la búsqueda de soluciones para incendios forestales (DE SOUZA et al, 2015; SAYAD et al, 2019, STANKEVICH, 2020), alcanzando, normalmente, mejores ajustes que los métodos estadísticos tradicionales.

La aplicabilidad de este estudio tiene una doble perspectiva: a nivel de planificación y a nivel operativo. Por un lado, el modelo propuesto puede ser útil para el diseño de la prevención en un territorio, de acuerdo con los costes de construcción y mantenimiento de las infraestructuras preventivas, permitiendo, también, revisar las ya existentes para su actualización y priorización (Figura 4) en base a los presupuestos disponibles. Por otro lado, a nivel operacional, este estudio permite disminuir la incertidumbre de las labores de extinción, optimizando el despacho de los recursos y promoviendo la seguridad y efectividad de los medios de extinción.



Figura 4. Aplicación de la metodología propuesta para la priorización de infraestructuras lineales preventivas de defensa.

6. Conclusiones

Las limitaciones presupuestarias y la necesidad de priorización de actuaciones preventivas convierten a la evaluación de su efectividad en un pilar fundamental en la gestión forestal. La toma de decisiones en los procesos de construcción y mantenimiento de las infraestructuras preventivas debe responder a criterios técnicos. En este sentido, este estudio contribuye a aliviar la falta de conocimiento empírico de la efectividad de las infraestructuras preventivas bajo condiciones reales de incendios forestales.

La técnica de inteligencia artificial empleada, el machine learning a través del árbol de decisión, ha presentado una gran bondad de ajuste. La selección de esta técnica responde a la premisa de la sencillez de uso e interpretación de resultados por los usuarios finales, garantizando una mayor aplicabilidad futura, tanto para labores de optimización de la infraestructura existente como para la reducción de la incertidumbre de las operaciones de extinción. Se ha constatado una baja efectividad de las infraestructuras preventivas en sí mismas, identificándose el trabajo apoyado sobre ellas (principalmente el trabajo terrestre y su combinación con los medios aéreos de extinción) como la variable más influyente en la contención de un frente. El porcentaje de infraestructuras preventivas estudiadas que pasivamente detienen la propagación libre de un incendio forestal es del 6.66%, valor muy bajo frente al 46.9% que lo hacen cuando sobre ellas se apoya algún tipo de trabajo de extinción (trabajo terrestre, trabajo aéreo o trabajo combinado terrestre-aéreo). La actuación de los medios aéreos por sí solos es insuficiente para garantizar la efectividad de las infraestructuras de defensa. Además, la longitud de llama, que integra las condiciones meteorológicas, topográficas y de combustible, y el ángulo de intersección del fuego con la infraestructura preventiva resultan claves para determinar su efectividad. A mayor longitud de llama y mayor ángulo de intersección fuego-infraestructura, menor probabilidad de contención del frente de fuego por parte de las infraestructuras preventivas.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado mediante los proyectos VIS4FIRE (RTA2017-00042-C05-01) del Ministerio de Ciencia e Innovación y los proyectos de la Unión Europea CILIFO (POCTEP-0753_CILIFO_5_E), FIREPOCTEP (POCTEP-0756_FIREPOCTEP_6_E) y FirEURisk (H2020-LC-CLA-2020-101003890).

8. Bibliografía

AGEE, J.K.; BAHRO, B.; FINNEY, M.A.; OMI, P.N.; SAPSIS D.B.; SKINNER, C.N.; VAN WAGTENDONK, J.W.; WEATHERSPOON, C.P.; 2000. The use of shaded fuelbreaks in landscape fire management. *For. Ecol. Manag.* 27 55-66.

BYRAM, G.M.; 1959. Combustion of forest fuels. En: DAVIS, K.P. (eds.): *Forest Fire: Control and Use*. 61–89. McGraw-Hill. New York.

CAMPBELL, D.; 1995. *The Art of Wildland Firefighting -The Campbell Prediction System*. Ventura County Fire Dept. Ojai, CA.

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. *J. Environ. Manage.* 233 329–336.

DE SOUZA, F.T.; KOERNER, T.C.; CHLAD, R.; 2015. A data-based model for predicting wildfires in Chapada das Mesas National Park in the State of Maranhao. *Environ Earth Sci* 74 3603–3611.

DUGUY, B.; ALLOZA, J.A.; RÖDER, A.; VALLEJO, R.; PASTOR, F.; 2007. Modelling the effects of landscape fuel treatments on fire growth and behaviour in a Mediterranean landscape (eastern Spain). *Int. J. Wildland Fire* 16 619–632.

FERNANDES, P.M; PEREIRA, A.; ALMEIDA, R.; CLARO, J.; 2016. The role of fire-suppression force in limiting the spread of extremely large forest fires in Portugal. *Eur J Forest Res* 135(2) 253-262.

GREEN, L.R.; 1977. Fuelbreaks and other fuel modification for wildland fire control. En: *USDA Agricultural Handbook* (eds.). Washington DC.

JAAFARI, A.; ZENNER, E.K.; PHAM, B.T.; 2018. Wildfire spatial pattern analysis in the Zagros Mountains, Iran: A comparative study of decision tree based classifiers. *Ecol. Inform.* 43 200-211.

KATUWAL, H.; CALKIN, D.E.; HAND, M.; 2016. Production and efficiency of large wildland fire suppression effort: A stochastic frontier analysis. *J. Environ. Manage.* 166 227-236.

MADRIGAL, J.; ROMERO-VIVÓ, M.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2019. Definición y recomendaciones técnicas en el diseño de puntos estratégicos de gestión. “Decálogo de Valencia” para la defensa integrada frente a los incendios en la gestión del mosaico agroforestal. *Sociedad Española de Ciencias Forestales Generalitat Valenciana – Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural*. 45 pp. Madrid.

MOLINA, J.R.; GONZÁLEZ-CABÁN, A.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2019. Potential Effects of Climate Change on Fire Behavior, economic Susceptibility and Suppression Costs in Mediterranean Ecosystems: Córdoba Province, Spain. *Forests* 10 679.

MOLINA, J.R.; ORTEGA, M.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2022. Aids to determine fire-line production rate in the southern Iberian Peninsula. En prensa.

MOREIRA, F.; VIEDMA, O.; ARIANOUTSOU, M.; CURT, T.; KOUTSIAS, N.; RIGOLOT, E.; BARBATI, A.; CORONA, P.; VAZ, P.; XANTHOPOULOS, G.; MOUILLOT, F.; BILGILI, E.; 2011. Landscape e wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. *J. Environ. Manage.* 92 2389-2402.

O'CONNOR, C.D.; THOMPSON, M.P.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2016. Getting Ahead of the Wildfire Problem: Quantifying and Mapping Management Challenges and Opportunities. *Geosciences* 6 35.

PAGE, W.G. & BUTLER, B.W.; 2017. An empirically based approach to defining wildland firefighter safety and survival zone separation distances. *Int. J. Wildland Fire* 26 655-667.

PAUSAS, J.G. & FERNÁNDEZ-MUÑOZ, S.; 2012. Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: From fuel-limited to drought-driven fire regime. *Clim. Chang.* 110 215–226.

QUÍLEZ, R.; VALBUENA, L.; VENDRELL, J.; UYTEWAAL, K.; RAMÍREZ, J.; 2020. Establishing Propagation Nodes as a Basis for Preventing Large Wildfires: The Proposed Methodology. *Front. For. Glob. Change* 3:548799.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; O'CONNOR, C.D.; THOMPSON, M.P.; MOLINA, J.R.; CALKIN, D.E.; 2020. Modelling suppression difficulty: current and future applications. *Int. J. Wildland Fire* 29(8) 739-751.

RYTWINSKI, A. & CROWE, A.K.; 2010. A simulation-optimization model for selecting the location of fuel-breaks to minimize expected losses from forest fires. *For. Ecol. Manag.* 260 1–11.

SAYAD, Y.O.; MOUSANNIF, H.; AL MOATASSIMEA, H.; 2019. Predictive modeling of wildfires: A new dataset and machine learning approach. *Fire Saf. J.* 104 130–146.

STANKEVICH, T.S.; 2020. Development of an Intelligent System for Predicting the Forest Fire Development Based on Convolutional Neural Networks. En: HU, Z.; PETOUKHOV, S.; HE, M. (eds.): *Advances in Intelligent Systems and Computing* 1126. Springer, Cham.

SYPHARD, A.D.; KEELEY, J.E.; BRENNAN, T.J.; 2011. Factors affecting fuel break effectiveness in the control of large fires on the Los Padres National Forest, California. *Int J Wildland Fire* 20(6) 764–75.

THOMPSON, M.P.; GANNON, B.M.; CAGGIANO, M.D.; 2021. Forest Roads and Operational Wildfire Response Planning. *Forests* 12(2) 110.

VÉLEZ, R.; 2009. La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. McGraw Hill. 1320 pp. Madrid.