



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

Monitoreo de quemas prescritas y propuesta metodológica para su aplicación en la gestión preventiva de ecosistemas mediterráneos

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

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

Resumen

Las quemas prescritas se presentan como una importante herramienta para la prevención de incendios forestales. Aunque en la actualidad existen dificultades para su aceptación e incorporación por algunas administraciones, la aplicación del fuego prescrito presenta ventajas respecto a tratamientos tradicionales en la gestión de los combustibles forestales. Sin embargo, se requiere una colaboración ciencia-administración para el estudio de la ecología de fuego, es decir, de los efectos en la dinámica de los ecosistemas a medio y largo plazo.

Este estudio presenta el proceso metodológico y resultados del seguimiento de los efectos de las quemas prescritas en ecosistemas mediterráneos, utilizando para ello un período de monitoreo de 12 años. El tiempo transcurrido desde la quema, la humedad del combustible muerto, la severidad del fuego y la altura de sofamado del arbolado fueron las variables de mayor importancia relativa en la dinámica del combustible superficial o vida útil. La simulación de la dinámica del combustible resulta fundamental para el ajuste óptimo de la “ventana de prescripción”, con el objeto de la máxima eficiencia en la selvicultura preventiva. El jefe de quema debería disponer de modelos o herramientas de ayuda a la toma de decisiones para la identificación de la mayor eficacia y eficiencia del tratamiento preventivo, considerando tanto la reducción del combustible superficial como los efectos sobre el arbolado.

Palabras clave

Ventana de prescripción, vida útil, severidad del fuego, altura de sofamado, patrón de ignición.

1. Introducción

El nuevo régimen de incendios forestales promovido por el cambio climático, los cambios de uso del suelo, el abandono de los usos tradicionales del bosque y el “paradigma de la extinción” está acentuando la frecuencia de Grandes Incendios Forestales (GIF) (PAUSAS & FERNÁNDEZ-MUÑOZ, 2012; ROGERS et al., 2020) y, en consecuencia, sus impactos ecológicos y socioeconómicos (CHUVIECO et al., 2014). Las diferentes Comunidades Autónomas de la Península Ibérica intentan reducir la probabilidad de ocurrencia de GIF y la reducción de su potencial de propagación mediante tratamientos selvícolas mecanizados o manuales, tales como desbroce o roza, claras de arbolado y/o podas. En los últimos años, las quemas prescritas o controladas se han posicionado como un tratamiento preventivo de interés para el sur de Europa (VALOR et al., 2015), con una ventaja económica y de formación y entrenamiento del personal de los equipos de extinción (MOLINA et al., 2018). Sin embargo, su efectividad está limitada a su uso a mayor escala (FERNANDES et al., 2013) y a su monitoreo espacio-temporal, con objeto del estudio de la ecología del fuego, o los efectos derivados de su aplicación en cada ecosistema (MOLINA et al., 2022a, 2022b).

Dados los mecanismos de adaptación de las especies mediterráneas al paso del fuego (PAUSAS et al., 2008), los tratamientos de quema sobre la vegetación tienen un tratamiento efectivo a corto plazo. En este sentido, algunos autores (TÁRREGA et al., 2001) han señalado la ausencia de diferencias significativas entre tratamientos de desbroce mecanizado o quema a partir del cuarto año. La “vida útil” o período de efectividad de una quema depende de la severidad del fuego, el

crecimiento de la vegetación y la época de la quema (KNAPP et al., 2005; MOLINA et al., 2021). En otras palabras, la efectividad de la quema depende de la ventana de prescripción de la quema. La ventana de prescripción identifica las condiciones óptimas para el desarrollo de una quema en base al objetivo de la quema, las condiciones meteorológicas, la disponibilidad del combustible y el comportamiento del fuego. El gestor forestal puede modificar los parámetros de ignición (condiciones meteorológicas, disponibilidad del combustible, patrones de ignición), con objeto de establecer las condiciones más idóneas para una mayor durabilidad de los efectos preventivos de la quema.

Las quemas prescritas bajo arbolado deben disponer de consideraciones particulares, como la altura de soflamado y la mortalidad del arbolado (VEGA et al., 2011). La altura de soflamado es una variable de fácil identificación in situ para la evaluación de los efectos de los incendios forestales. La altura de soflamado se manifiesta, en un corto período de tiempo posterior a la quema, con una coloración marrón de las acículas, fruto de temperaturas superiores a 60°C. El soflamado de las copas del arbolado depende, generalmente, de la intensidad del fuego y de la temperatura ambiente (VAN WAGNER, 1973). Otros estudios (BOTELHO, 1999; MOLINA et al., 2022a), han incorporado variables dasométricas a las dos variables anteriores, con objeto de un mejor ajuste de la altura de soflamado observada respecto a la predicha. Algunos modelos (VEGA et al., 2011), relacionan el volumen de copa soflamado con la supervivencia del arbolado. La mortalidad del arbolado debe ser una variable a monitorear, tras la realización de una quema, dado su impacto en el ecosistema. En algunas ocasiones, la mortalidad no se encuentra asociada al calor sometido al tronco o al soflamado de la copa, sino al calor soportado por las raíces (STOOF et al., 2011), que, en suelos poco desarrollados, se encuentran a pequeña profundidad.

2. Objetivos

El objetivo de esta comunicación es la capitalización de la experiencia de una metodología desarrollada para el monitoreo de las quemas prescritas a corto y medio plazo en Sierra Morena y Dehesa del Guadiana, con objeto de su propuesta como herramienta para la gestión preventiva de los ecosistemas mediterráneos. El seguimiento, con una base de datos de quemas durante 12 años, tiene por objeto:

- La evaluación de la dinámica del combustible por categorías o fracciones.
- La evaluación de la altura de soflamado y la mortalidad del arbolado en base a las condiciones de la quema y de las características de la vegetación.
- La propuesta de vida útil para las diferentes quemas en base a las condiciones de la quema y las características de la vegetación.

3. Metodología

3.1. Inventario de campo pre-quema

Una vez identificado el perímetro de la parcela de quema, se procedió a la evaluación de sus combustibles forestales. En un primer lugar, fue necesario un barrido de la parcela, con objeto de identificar la homogeneidad o heterogeneidad de esta. En caso de ser homogénea, se trató como un único estrato; en caso de diferencias en la vegetación, se dividió y analizó la parcela como varios estratos, de acuerdo con un inventario estratificado aleatorio. Dados los costes temporales y económicos de un inventario de este tipo, se propusieron parcelas de un tamaño razonable (parcelas circulares de 1.000 m²). El inventario recopiló información referente a todos los estratos de la vegetación:

- Estrato arbóreo: composición, diámetro a la altura del pecho, altura total, altura a la primera rama, diámetro de copa y fracción de cabida cubierta. La toma de esta información requirió de cintas métricas, un Vertex y forcípulas.

- Estrato arbustivo: fracción de cabida cubierta, especies, ocupación y altura media de cada especie.
- Estrato de la hojarasca: el muestreo de la hojarasca debe considerar la capa de hojarasca (L), la capa de hojarasca fermentada (F) y la capa de humus (H). La medición de la profundidad de cada capa se realizó en cada punto destructivo mediante el promedio de cinco medidas en un radio de 20-30 cm.

Una vez caracterizados todos los estratos de la vegetación, se procedió a una caracterización del combustible por fracciones del combustible (vivo por especie, muerto de 1 hora, 10 horas y 100 horas de tiempo de retardo). La identificación de las cargas de combustible puede realizarse por cualquiera de las metodologías estándares, como transectos lineales, pesadas o series fotográficas, si bien en nuestro caso se utilizó el método de los rangos. Esta metodología se basa en el empleo de clasificaciones visuales de muestras, incrementando la eficiencia del muestreo (VAN LOON, 1977). El primer paso es la identificación de los diferentes "rangos" o estructuras de la vegetación existentes en la parcela en términos de carga de combustible, procediendo a un muestreo destructivo de un cuadrado de 1 * 1 m (1 m²) de cada rango, incluyéndose en la extracción todo el material que se encuentre comprendido dentro del teórico prisma cuya base sea el comentado cuadrado y la altura 1,70 metros. Posteriormente, se procede a la realización de transectos visuales para la delimitación de la representatividad de cada rango en el contexto de la parcela o rodal. Esta metodología presentó resultados fidedignos con relación al resto de metodologías (SENRA, 2012), destacando por sus altos rendimientos operacionales. En cada parcela, fueron tomadas 2-4 sub-parcelas destructivas de 1m², pesando cada una de las fracciones o tipologías del combustible de modo independiente. Posteriormente, una muestra representativa de cada tipología fue transportada a laboratorio en botes herméticos, procediendo a un proceso de secado en estufa durante 72 horas. Una vez calculada la humedad de la muestra, se procedió a expresar la carga por fracciones en materia seca, con objeto de su independencia con respecto a las condiciones meteorológicas.

3.2. Monitoreo durante la quema

El monitoreo de la quema incorporó la siguiente información:

- Información meteorológica sin rozamiento ni sombreado y a 2 m sobre el suelo dentro de la masa o modelo de combustible, con objeto de conocer la velocidad del viento real. Se requirieron estaciones de meteorología con memoria interna.
- Velocidad de propagación del fuego y tiempo de residencia de la llama. Se utilizaron termopares tipo k de 1 mm de diámetro en una malla de muestro de distancia conocida. Conocida la distancia entre termopares y el tiempo de llegada del fuego (momento en que el termopar supera los 285°C), se puede estimar la velocidad real. El tiempo de residencia de la llama fue estimado como el tiempo con temperatura superior a 285°C de cada termopar.
- Longitud de llama: la longitud de llama se calcula mediante observación directa con cámara visible y térmica, utilizando como referencia jalones telescópicos.
- Disponibilidad del combustible: se recoge material combustible de todas las fracciones de combustible y especies de vivo, transportándolo a laboratorio para conocer su humedad en el momento de la quema. En el caso de la capa de hojarasca, se diferenció entre las diferentes tipologías existentes. En algunos casos, dada la pequeña profundidad de esta por la pobreza de algunos suelos, resultó difícil la diferenciación entre capas L y F, procediendo a un muestreo conjunto de ambas subcapas.
- Intensidad del fuego (kW/m): será calculada en base a la velocidad de propagación y la cantidad de combustible disponible o consumido, de acuerdo con la siguiente formulación (BYRAM, 1959):

$$I = H \times W \times V$$

Ecuación 1

siendo H el calor de combustión (18.500 kJ/kg), W la carga de combustible disponible (kg/m²) y V la velocidad de propagación (m/s)

- Zonificación de la parcela de quema en base al patrón de ignición (fajas, flancos y puntos) y la distancia entre líneas, flancos o puntos utilizada.

3.3. Inventarios de campo post-quema

El monitoreo temporal de las parcelas de quema requiere de una inversión temporal y económica. En este sentido, se propone un doble muestreo el primer año y, posteriormente, un muestreo anual al menos durante los tres primeros años. A partir del tercer año, los cambios son menores, por lo que se puede realizar un muestreo bianual o incluso utilizar el inventario pre-quema de una nueva quema de mantenimiento, con objeto de la optimización de los recursos invertidos.

De acuerdo con nuestra experiencia y, conociendo las inversiones que se requieren, se propone el siguiente seguimiento por parcela o sub-zona (patrón de ignición):

- **Inventario post-quema:** mientras un par de personas retiran todo el material del monitoreo y proceden al marcaje y señalización de las parcelas, otro par de personas toma medidas de consumo del combustible, utilizando la metodología de los rangos o cualquier otra comentada en la bibliografía existente. En nuestro caso, los rangos serán trasladados íntegros a laboratorio, dado que las quemas suelen terminar tarde y, con objeto, de optimizar los recursos invertidos. En el caso de masas arboladas, se recomienda también la medición de la profundidad de capa fermentada de hojarasca y humus consumida, utilizando para ello clavos (12 cm) enrasados en superficie, junto a los termopares.
- **Inventario 1-3 meses:** se realiza un inventario de la altura de soflamado y de chamuscado de todos los árboles incluidos en las parcelas. De igual forma, si se observa algún ejemplar dañado, este debe ser señalado en el estadillo de campo.
- **Inventario 6-12 meses (se recomienda en primavera):** se realiza un inventario de la regeneración experimentada en la parcela (especies y ocupación) o combustible sin consumir en parcelas desarboladas y de carga de combustible sin consumir o generada por la poda térmica en parcelas arboladas. Se recomienda la estimación de la carga de combustible por tipologías, con la misma metodología que en el inventario pre-quema. En caso de existencia de individuos arbóreos dañados dentro de las parcelas, se realizan seguimientos individualizados.
- **Inventario 12-24 meses (se recomienda en primavera):** se realiza el mismo inventario que en el caso anterior.
- **Inventario 24-36 meses (se recomienda en primavera):** se realiza el mismo inventario que en el caso anterior.

Los inventarios posteriores al tercer año se pueden espaciar más en el tiempo, dado que los cambios o la evolución es más paulatina que durante los primeros años.

4. Resultados

4.1. Vida útil o efectividad de las quemas prescritas en modelos desarbolados

La evolución del matorral dependió de su composición específica y estrategia adaptativa. Como algunos ejemplos, las quemas de Dehesa del Guadiana, dominadas por *Macrochloa tenacissima*, recuperaron en mayor medida la cobertura original en los primeros 2-3 años (Figura 1a). Sin embargo, los ecosistemas de Sierra Morena, dominado por *Cistus ladanifer*, alcanzaron la misma cobertura, o incluso, superaron la cobertura original en 4-5 años (Figura 1b). En general, los mayores crecimientos anuales se produjeron entre el segundo y tercer año post-quema, con crecimientos de biomasa entre 4,36-6,83 t/ha. También, se observó cierta tendencia al mayor crecimiento anual en años lluviosos.

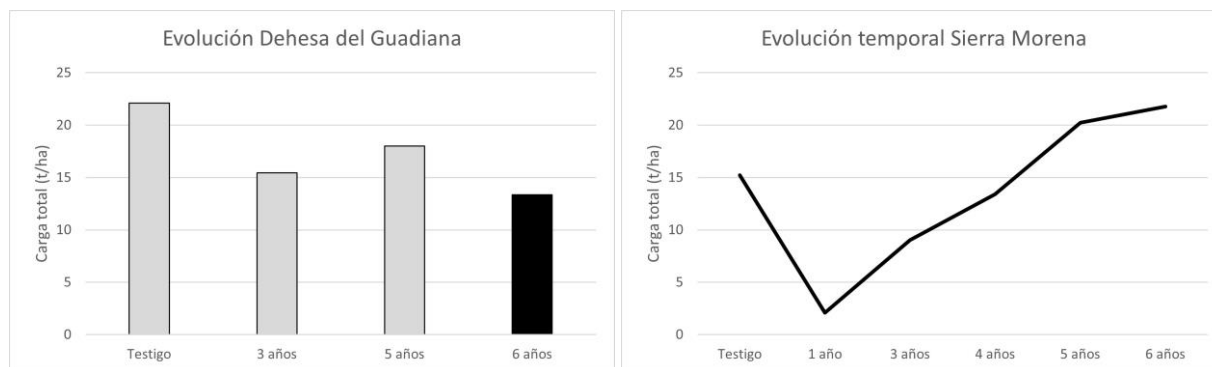


Figura 1. Comparativa de la evolución de la carga de combustible en Dehesa del Guadiana y Sierra Morena

No obstante, en alguna parcela de quema (color negro en la Figura 1a), se observó que otros parámetros podían incidir en la vida útil de las quemaduras efectuadas, dado que con 6 años una parcela presentó menor carga de combustible que otra parcela con tan solo 3 años. En este sentido, uno de los parámetros de mayor influencia fue la severidad del fuego. **Un fuego de mayor severidad no necesariamente implica una mayor vida útil del tratamiento efectuado.**

La evolución del combustible también se encontró relacionada con la composición específica del ecosistema, presentando, en general, una mayor diversidad de especies leñosas en las quemaduras de moderada severidad. La severidad fue evaluada en base a la intensidad (observación directa de la longitud de llama) y el tiempo de residencia (medición del tiempo por encima de 285°C mediante el empleo de termopares tipo k de 1 mm de grosor). A modo de ejemplo, si el objetivo de la quema fuera la eliminación de la jara pringosa, dada su espesura, carga y alelopatía, se observó una menor abundancia de esta con severidad moderada durante al menos los dos primeros años (Figura 2). Con altas severidades, la ocupación de la jara pringosa fue mayor que antes de la quema en tan solo dos años (Tabla 1).

PARCELAS EN BASE A LA SEVERIDAD	N	Pre-Quema	13 meses	20 meses	25 meses
Severidad Moderada	5	2,40(±0,54) ^a	0,90(±0,89) ^b	1,30(±1,09) ^{ab}	1,40(±0,89) ^{ab}
Severidad Alta	7	2,14(±1,21) ^a	1,42(±1,39) ^a	1,78(±1,21) ^a	2,28(±1,11) ^a

Tabla 1. Evolución de la ocupación de *Cistus ladanifer* en base a la severidad de la quema, utilizando el índice de abundancia-cobertura de Braun Blanquet.

Nota: el valor entre paréntesis indica la desviación estándar de Braun Blanquet. Los valores medios en una fila seguidos por la misma letra no presentan diferencias significativas ($p < 0,05$) de acuerdo al test de Tukey.

Las parcelas de quema, de similar composición específica, también señalaron diferencias significativas en base a la exposición, principalmente durante los primeros 5 años. En el caso de Dehesa del Guadiana, se observó una recuperación mayor del 28,93% en exposiciones de umbría que, en exposiciones de solana, con una clara diferenciación de las especies dominantes. En el caso de Sierra Morena, la carga de combustibles se recuperó un 36,38% en solana y un 57,70% en umbría. Aunque en este caso, también destacó el cambio en la inflamabilidad y combustibilidad del escenario de solana. En algunas parcelas, a los 4 años, se produjo un incremento en el número de plantas de un 30,77% para el jaguarzo y un 342,44% para la jara pringosa.

4.2. Vida útil o efectividad de las quemaduras prescritas en modelos arbolados

Las parcelas de Sierra Morena se desarrollaron sobre rodales de pino negral (*Pinus pinaster*) y pino piñonero (*Pinus pinea*). En los modelos arbolados, existió una alta heterogeneidad en la vida

útil de las quemas. Mientras algunas quemas recuperaron prácticamente su carga inicial entre el año 3-4 (Figura 2), otras parcelas mantuvieron una carga muy inferior. Solo en la Parcela de Quema 10 se observó una mayor carga entre el año 3-4 que la carga inicial (Figura 2). Por tanto, la vida útil de las quemas se encontraría entre menos de 3 años (quema 10) y más de 4 años (quemas 8, 3 y 4).

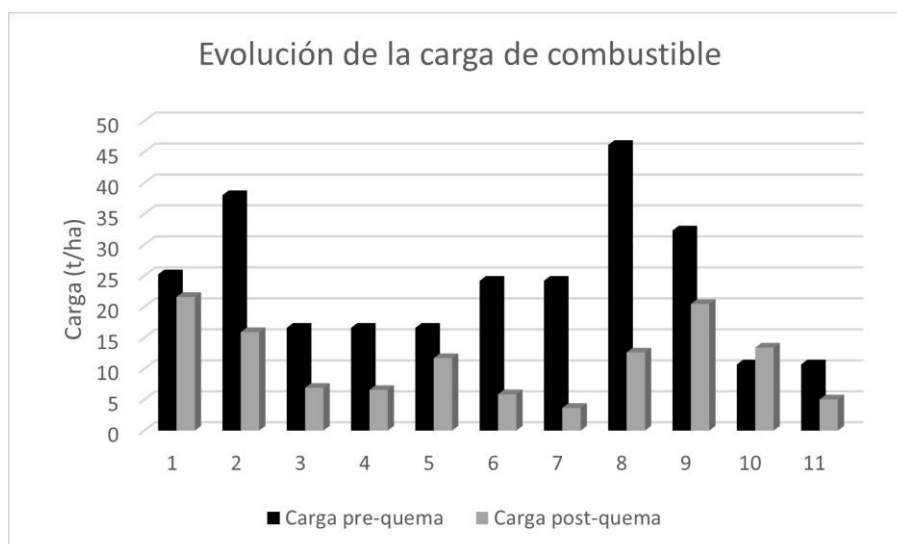


Figura 2. Evolución de la carga total de combustible superficial entre el 3-4 año en once parcelas en Sierra Morena.

Las variables de mayor importancia en la evolución del combustible superficial post-quema fueron la intensidad de la quema, la humedad del combustible muerto en el momento de la quema, la altura a la primera rama viva, la temperatura durante la quema y la precipitación en los seis meses siguientes a la quema. En el caso de la generación de combustible fino muerto también se observó una clara influencia de la densidad de la masa. Por su parte, hay que destacar que una mayor cantidad de días con velocidad del viento superior a 20 km/h, durante los seis meses siguientes a la quema, promovió la caída de una mayor cantidad de ramas y combustibles muertos más gruesos (10 y 100 horas de tiempo de retardo).

4.3. Altura de soflamado

La altura de soflamado fluctuó entre valores prácticamente nulos y valores superiores a 9 m, lo que supuso un volumen de copa soflamada de más del 70%. La alta variabilidad existente entre parcelas, e incluso entre árboles dentro de la misma parcela de muestreo, se asoció a la intensidad del fuego, que presentó oscilaciones alrededor de los troncos en base a la presencia de combustible circundante a los troncos y a la temperatura del aire. No obstante, ni la intensidad del fuego ni la temperatura del aire explicaron por sí solas la variabilidad de la altura de soflamado a nivel de parcela de muestreo (Figura 3). La altura de soflamado requirió de variables adicionales para un mejor ajuste estadístico, tendiendo al empleo de variables referidas a la estructura de la masa. En este sentido, la altura a la primera rama viva fue la variable que presentó más alta correlación con la altura de soflamado para nuestras parcelas de estudio.

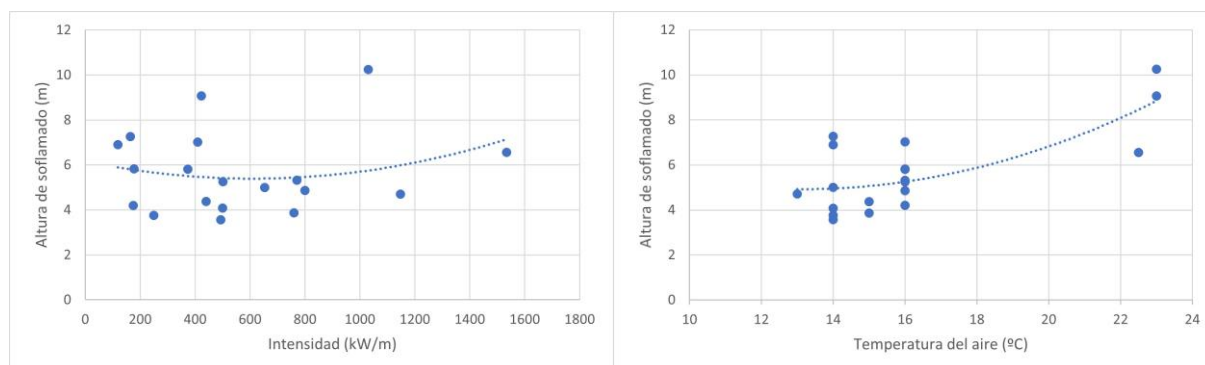


Figura 3. Relación observada entre la altura de sofamado y la intensidad del fuego (izquierda) y la temperatura del aire (derecha)

4.4. Mortalidad del arbolado

La mortalidad del arbolado, en la mayoría de las parcelas de quemas fue inferior al 1% (objetivo recogido en el Plan de Quema), siendo nula o limitada a una mortalidad natural de árboles perimetrales o en divisorias, fuertemente expuestos a vientos. Sin embargo, en algunas parcelas se apreció mortalidad del arbolado, con las siguientes características:

- La mortalidad apareció entre el 2-3 año post-quema y, no inmediatamente tras la quema.
- La mortalidad fue observada en suelos pobres, donde las coníferas no podían desarrollar sus raíces pivotantes y, solo, desarrollaban raíces superficiales (Figura 4).
- La mortalidad se asoció a parcelas de muestreo donde el tiempo de residencia fue superior a los 180 s (Figura 4).



Patrón de ignición	Mortalidad (%)	CBH (m)	Copa (m)
Testigo	0,63	7,66	4,4
Fajas	0,94	9,07	3,3
Flanco	12,21	8,51	3,27
Cierre	1,01	8,5	3,12

Figura 4. Mortalidad del arbolado, altura a la primera rama viva (CBH) y diámetro de copa (Copa) observada en diferentes parcelas de muestreo dentro de la misma quema. En las imágenes, se puede observar como el arbolado muerto en el 2-3 año presentaba raíces superficiales.

5. Discusión

5.1. Vida útil o efectividad de las quemas prescritas en modelos desarbolados

Las especies mediterráneas se encuentran adaptadas a la presencia de un régimen de fuego, si bien las especies con estrategia rebrotadora suelen responder más rápidamente que las especies con estrategia germinadora (PAUSAS et al., 2008). En general, la recuperación de la vegetación es más rápida en exposiciones de umbría que en exposiciones de solana. No obstante, a partir del tercer año se produce una compensación en la ocupación de especies con una u otra estrategia adaptativa. En este sentido, algunas especies germinadoras recuperan rápidamente el terreno perdido, ocupando e incluso superando la ocupación inicial en tan solo dos años (Tabla 1). La diversidad de especies leñosas depende del comportamiento del fuego, por lo que resulta esencial un monitoreo del comportamiento del fuego durante la quema. En este sentido, las diferencias en diversidad de especies fueron más acusadas en las quemas de Dehesa del Guadiana que en las quemas de Sierra Morena, en base al comportamiento del fuego (Figura 5). El seguimiento a posteriori de las parcelas de quema resulta clave para entender la ecología del fuego o cambios en

la combustibilidad e inflamabilidad del ecosistema. No obstante, en todos los casos el nivel de biodiversidad de especies fue superior que en la situación testigo, lo que vuelve a poner en relieve la adaptación de las especies mediterráneas a un régimen de fuego.

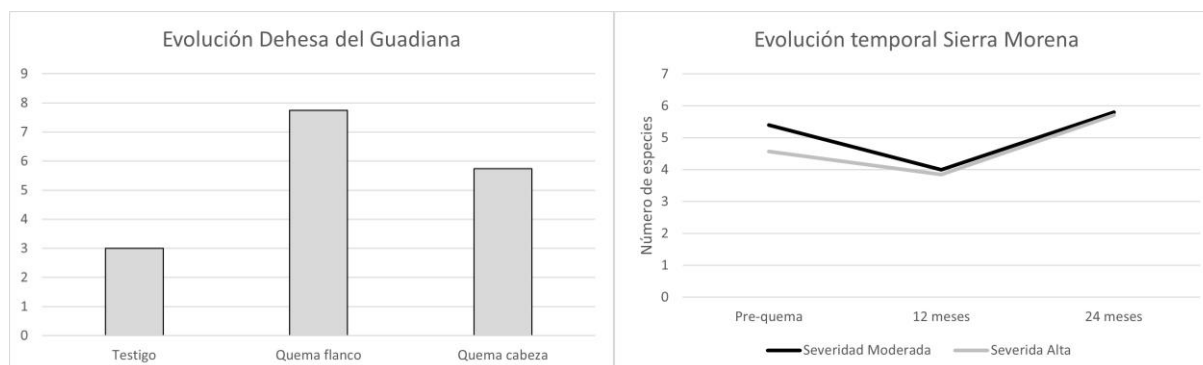


Figura 5. Evolución del número de especies o biodiversidad en las parcelas de quema de Dehesa del Guadiana y Sierra Morena.

La Figura 1 solo representa la cantidad de combustible total, si bien una quema suele conllevar un cambio en la ocupación de las especies y en la distribución de las cargas de combustible por fracciones o tipologías. Este hecho es especialmente significativo en ecosistemas con especies dominantes con una gran concentración de elementos muertos, como el esparto o la aulaga; los cuales reducen sustancialmente su carga de muerto, reduciendo su combustibilidad y su velocidad de propagación, de acuerdo con el modelo Behave (ANDREWS et al., 2003). Además, los brotes tiernos suelen tener una mayor humedad del combustible, lo que disminuye la cantidad de combustible disponible para el fuego. En este sentido, la intensidad del fuego es menor, puesto que se influye directamente en dos de sus variables principales: la velocidad de la propagación y la cantidad de combustible disponible a arder (ver Ecuación 1).

Los modelos de combustible desarbolados presentaron una alta heterogeneidad en la vida útil o período de tiempo a partir del cual el fuego potencial se podría encontrar fuera de la capacidad de ataque directo (longitud de llama > 1,5 m). Con una vida útil de las quemas superior a cuatro años, en muchos escenarios meteorológicos, el fuego se encontraría fuera de la capacidad de extinción mediante ataque directo. La ejecución de una roza en vez de una quema no presentaría diferencias significativas con respecto a la evolución del matorral a partir del cuarto año (TÁRREGA et al., 2001) y presentaría una ventaja de tipo económico. En general, se recomienda una vida útil de cuatro años para los matorrales mediterráneos, pudiendo reducir su rotación a tres años, en caso de Áreas Estratégicas de Gestión. No obstante, el seguimiento o monitoreo periódico de la parcela de quema determinará la vida útil óptima para cada caso particular, pudiendo verse acelerado o disminuido el crecimiento anual estándar por condiciones de estrés hídrico o gran acumulación de precipitaciones.

5.2. Vida útil o efectividad de las quemas prescritas en modelos arbolados

Las quemas prescritas en modelos arbolados se presentan como una herramienta de gran interés para la selvicultura preventiva, dada la reducción de combustible superficial, el incremento de la altura a la primera rama viva y la reducción de la probabilidad de transición del fuego de superficie a fuego de copas (KNAPP et al., 2005; FERNANDES et al., 2013). La eficacia en modelos arbolados se incrementa en situaciones con gran presencia de combustible muerto (MOLINA et al., 2018), el cual difícilmente puede ser eliminado por medios mecánicos o pastoreo.

La evolución de la carga de combustible dependió de la carga original, la intensidad del fuego, la temperatura en el momento de la quema y la precipitación seis meses a posteriori de la quema. A modo general, la vida útil de las quemas fue de entre uno y cuatro años para el escenario

meteorológico más desfavorable (MOLINA et al., 2021). El valor del extremo inferior se asocia a un ecosistema que requiere de una segunda quema en un corto período de tiempo, dado el poco consumo de combustible o la alta caída de material de las copas del arbolado, debido a una alta intensidad. El valor del extremo superior es similar al observado por otros autores (FERNANDES & BOTELHO, 2003). Sin embargo, para esta rotación, en algunos escenarios o ecosistemas los rendimientos operacionales son pequeños, dada la falta de continuidad de combustible fino y la reducida velocidad de propagación, incrementando sus costes de ejecución. Por tanto, se propone un escenario de rotación de quemas prescritas teniendo en consideración, tanto la progresión dinámica y energética del fuego en su escenario más desfavorable, como su viabilidad desde el punto de vista económico. La propuesta operativa depende de la carga de combustible superficial existente y de las características estructurales de la masa arbórea, principalmente la fracción de cabida cubierta del dosel y la altura a la primera rama viva (Figura 6).

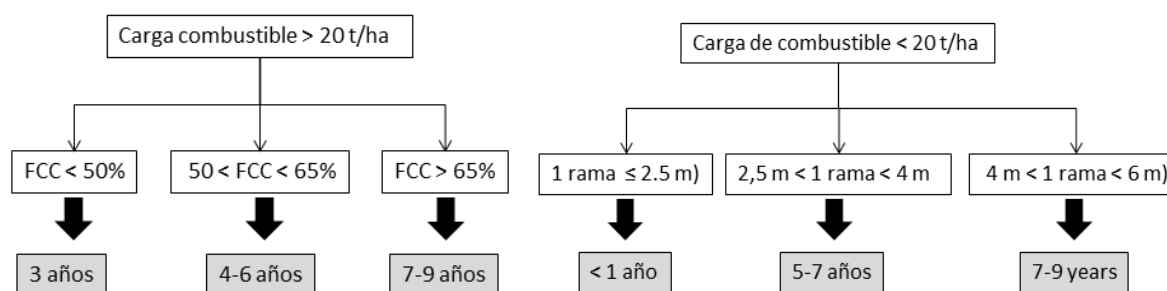


Figura 6. Rotación o vida útil media de las quemas efectuadas en base al comportamiento del fuego y la viabilidad económica.

5.3. Altura de soflamado

La altura de soflamado constituye una variable de fácil identificación de visu en el primer inventario de campo, con objeto de la identificación de los efectos sobre el arbolado (BOTELHO, 1999). Una elevada altura de soflamado conllevaría una elevada caída de material e incremento de la carga de combustible superficial, si bien también supondría un incremento de la altura a la primera rama viva en masas de coníferas. La intensidad de la quema y la temperatura ambiente han sido las variables tradicionalmente consideradas para la modelización de la altura de soflamado, si bien la altura a la primera rama también parece adoptar importancia en la Península Ibérica (BOTELHO, 1999; MOLINA et al., 2022a). No obstante, futuros estudios deberán considerar la estructura del ramaje y follaje de cada especie, que puede influir también en el mayor o menor soflamado del arbolado (MICHALETZ & JOHNSON, 2006), así como las condiciones meteorológicas previas a la quema.

La altura de soflamado o volumen de copa soflamado se encuentra directamente relacionado con la mortalidad de arbolado post-quema. Toda quema prescrita debe evitar generar más de dos tercios del volumen soflamado de la copa, dada la alta probabilidad de mortalidad posterior (VEGA et al., 2011). En algunos pies de quemas en Sierra Morena no se ha comprobado dicho nivel de mortalidad, a pesar de alcanzar estos volúmenes de copa soflamado, por lo que la mortalidad puede verse influida por una mayor cantidad de parámetros. No obstante, toda quema prescrita debería incluir una referencia de altura máxima de soflamado o volumen soflamado inferior al valor de referencia proporcionado por Vega et al. (2011). La afección de la parte central de la copa del arbolado, parte de mayor diámetro de copa, supondría la puesta en luz del sotobosque, permitiendo la generación de combustible vivo colonizador (Figura 7). Es el caso de la quema número 10, donde la puesta en luz por la afección de las zonas centrales de las copas y la mortalidad de arbolado ha incrementado sustancialmente la carga de combustible vivo, que incluso no existía previamente a la quema. Los patrones de ignición (MOLINA et al., 2022b) podrían ser utilizados de modo eficiente

para la reducción de la intensidad del fuego y, en consecuencia, de la altura de soflamado, con objeto de evitar una gran altura de soflamado y el soflamado de la copa en su zona de mayor área de proyección horizontal.



5.4. Mortalidad del arbolado

Dadas las complejidades asociadas al empleo de las quemas en el sur de la Península Ibérica (VALOR et al., 2015), la mortalidad del arbolado es una variable de suma importancia de cara a la exposición pública y a la concesión futura de permisos administrativos para la ejecución de quemas prescritas. Por tanto, es necesario un monitoreo de la evolución del arbolado durante un período superior a los dos años, dado que gran cantidad de la mortalidad ha sido registrada entre el 2-3 años a posteriori de la quema. Este hecho puede obedecer al debilitamiento de los pies y la afección paulatina de las raíces secundarias y de sus hongos asociados, debido a las altas temperaturas del suelo (STOOF et al., 2011). Por tanto, estudios a nivel de afección de cambium y raíces podrían ser complementarios a los estudios de altura o volumen de soflamado realizados.

El seguimiento de las quemas puede permitir un análisis de los parámetros que han promovido la mortalidad de los pies arbóreos. Entre las diversas variables estudiadas, el tiempo de residencia ha sido la variable con mayor correlación. Los umbrales temporales para provocar daños en los pies arbóreos deberán ser ajustados en base a la profundidad de las raíces o tipología de suelo. No obstante, se recomienda tener en consideración el tiempo de residencia en las ventanas de prescripción de suelos pobres, como los de Sierra Morena. Las condiciones de ejecución de las quemas y los patrones de ignición (MOLINA et al., 2022b) pueden ser utilizados de modo individual o conjunto para reducir el tiempo de permanencia del fuego junto al arbolado, aunque este pueda implicar un menor consumo del combustible superficial.

6. Conclusiones

Las quemas prescritas son consideradas una herramienta de selvicultura preventiva de gran eficacia para la reducción del combustible superficial y la reducción de la probabilidad de transición del fuego de superficie a fuego de copas. La vida útil o tiempo de eficacia de una quema depende no solo del tiempo transcurrido tras la quema, sino también de variables relativas a la ejecución de la quema, las características del modelo y las condiciones meteorológicas posteriores a la quema. No obstante, la vida útil de este tratamiento es limitada, o del orden de los tratamientos de desbroce, pero de menor cuantía económica y permitiendo un entrenamiento del personal de extinción.

La altura de soflamado es un parámetro de fácil identificación de visu para la determinación de los efectos sobre el arbolado y la evolución del combustible superficial, dada la caída de material por la poda térmica. Aunque en nuestro estudio no se ha podido corroborar la relación directa entre el grado de mortalidad del arbolado y la altura de soflamado, debería ser considerada de forma proactiva en las ventanas de prescripción. Además, la ventana de prescripción debería incorporar

consideraciones acerca del tiempo de residencia de la llama en suelos pobres, con raíces superficiales del arbolado. Todos los aspectos relativos a la intensidad de la quema, el tiempo de residencia y la altura de sofamado podrían ser mitigados en parte con una buena selección de los patrones de ignición o ajuste de la ventana de prescripción.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado mediante los proyectos VIS4FIRE (RTA2017-00042-C05-01) y ENFIRES (PID2020-116494RR-C44) del Ministerio de Ciencia e Innovación y los proyectos de la Unión Europea CILIFO (POCTEP-0753_CILIFO_5_E) y FIREPOCTEP (POCTEP-0756_FIREPOCTEP_6_E) y el proyecto de los fondos FEDER 2014-2020 denominado “Herramienta para la gestión eficiente y sostenible del paisaje forestal mediterráneo frente a incendios” (1381032-R). Los autores también quieren agradecer la ayuda prestada por el personal contratado del CILIFO para la toma de datos, así como a todo el personal de las Comunidades Autónomas que han contribuido a este estudio.

8. Bibliografía

ANDREWS, P.L.; BEVINS, C.D.; SELI, R.C.; 2003. BehavePlus fire modeling system, version 2.0: user's guide. General Technical Report RMRS-GTR-106WWW, USDA Forest Service. 132pp.

BOTELHO, H.S.; 1999. Efeitos do fogo controlado em árvores de povoamentos jovens de *Pinus pinaster* Ait. PhD Thesis, UTAD, Vila Real.

BYRAM, G.M.; 1959. Combustion of forest fuels. In: Davis K. (Ed.). Forest Fire: Control and Use. McGraw-Hill. New York, NY. 61–89.

CHUVIECO, E.; MARTÍNEZ, S.; ROMÁN, M.V.; HANTSON, S.; PETTINARI, M.L.; 2014. Integration of ecological and socio-economic factors to assess global vulnerability to wildfire. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 23 (2) 245–258.

FERNANDES, P.; DAVIES, G.M.; ASCOLI, D.; FERNÁNDEZ, C.; MOREIRA, F.; RIGOLOT, E.; STOOFF, C.; VEGA, J.A.; MOLINA, D.; 2013. Prescribed burning in southern Europe: developing fire management in a dynamic landscape. *Front. Ecol. Environ.* 11 4-14.

KNAPP, E.E.; KEELEY, J.E.; BALLENGER, E.A.; BRENNAN, T.J.; 2005. Fuel reduction and coarse woody debris dynamics with early season and late season prescribed fire in a Sierra Nevada mixed conifer forest. *For. Ecol. Manag.* 208(1–3) 383-397.

MICHALETZ, S.T. ; JOHNSON E.A. ; 2006. A heat transfer model of crown scorch in forest fires. *Can. J. For. Res.* 36 2839–2851.

MOLINA, J.R.; GARCÍA, J.P.; FERNÁNDEZ, J.J.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2018. Prescribed fire experiences on crop residue removal for biomass exploitations. Application to the maritime pine forests in the Mediterranean Basin. *Sci. Total Environ.* 612 63–70.

MOLINA, J.R.; ORTEGA, M.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2021. Useful life of prescribed fires in a Southern Mediterranean Basin: An Application to *Pinus pinaster* Stands in the Sierra Morena Range. *Forests* 12 486.

MOLINA, J.R.; ORTEGA, M.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2022a. Scorch height and volume modeling in prescribed fires: Effects of canopy gaps in *Pinus pinaster* stands in Southern Spain. *For. Ecol. Manag.* 506 119979.

MOLINA, J.R.; ORTEGA, M.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2022b. Fire ignition patterns to manage prescribed fire behavior. Application to Mediterranean pine forests. *J. Environ. Manage.* 302 114052.

PAUSAS, J.G.; LLOVET, J.; RODRIGO, A.; VALLEJO, R.; 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? – A review. *Int. J. Wildland Fire* 17 713– 23.

PAUSAS, J.G., FERNÁNDEZ-MUÑOZ, S.; 2012. Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Clim. Change* 110 215– 26.

PIQUÉ, M.; DOMÈNECH, R.; 2018. Effectiveness of mechanical thinning and prescribed burning on fire behaviour in *Pinus nigra* forests in NE Spain. *Sci. Total Environ.* 618 1539-1546.

ROGERS, B.M.; BALCH, J.K.; GOETZ, S.J.; LEHMANN, C.E.R.; TURETSKY, M.; 2020. Focus on changing fire regimes: Interactions with climate, ecosystems, and humans. *Environmental Research Letters* 15 030201. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d3a>.

SENRA, F.; 2012. Mantenimiento de sistemas lineales preventivos de defensa contra incendios en áreas forestales mediterráneas mediante la aplicación de quemas prescritas. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba. Córdoba. 249 pp.

STOOF C.R., DE KORT A., BISHOP T.F.A., et al. 2011. How rock fragments and moisture affect soil temperatures during fire. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75 1133– 1143.

TÁRREGA, R.; LUIS-CALABUIG, E.; VALBUENA, E.; 2001. Eleven years of recovery dynamic after experimental burning and cutting in two *Cistus* communities. *Acta Oecol.* 22(5–6) 277-283.

VALOR, T.; GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R.; PIQUÉ, M.; 2015. Assessing the impact of prescribed burning on the growth of European pines. *For. Ecol. Manag.* 343 101-109.

VAN LOON, A.P.; 1977. Bushland fuel quantities in the Blue Mountains: Litter and understory. *For. Comm. Of NSW Res. Note* 33.

VAN WAGNER C.E., 1973. Height of Crown Scorch in Forest Fires. *Can. J. For. Res* 3 373-378.

VEGA, J.A., JIMENEZ, E., VEGA, D., ORTIZ, L., PÉREZ, J.R., 2011. *Pinus pinaster* Ait. tree mortality following wildfire in Spain. *For. Ecol. Manag.* 261(12) 2232-2242.