



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1836

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Tratamientos de adhesionamiento y prevención de incendios forestales: efecto de diferentes intensidades de clara y técnicas de desembosque en el comportamiento del fuego

TARDÓS ASCASO, P. (1), BUSQUETS OLIVÉ, E. (2), VILÀ VILARDELL, L. (1), COLLADO COLOMA, E. (1), BELTRÁN BARBA, M. (1), CASALS TORTRAS, P. (1), PIQUÉ NICOLAU, M. (1)

(1) Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña (CTFC)

(2) Escuela agraria del Solsonés

Resumen

Los sistemas silvopastorales han demostrado ser efectivos en la prevención de incendios forestales, sobre todo en lo que se refiere a la modificación del comportamiento del fuego. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la efectividad de diferentes tratamientos de adhesionamiento en un bosque denso de *Pinus sylvestris* con el objetivo dual de prevención de incendios y mejora de pastos. Los tratamientos estudiados son el resultado de la combinación de dos intensidades de clara (alta y muy alta) y dos técnicas de desembosque (de tronco y de árbol entero).

Para ello, se construyeron los modelos de combustible correspondientes al antes y el después de los tratamientos, y se simuló el comportamiento del fuego. Todos los tratamientos contribuyeron a reducir la severidad potencial del fuego, siendo los tratamientos que utilizan técnicas de desembosque de árbol entero los que parecen generar las mejores condiciones.

Palabras clave

Simulación de incendios, modelo de combustible, sistema silvopastoral, árbol entero

1. Introducción

El contexto de abandono rural, expansión del bosque y aumento del riesgo de incendios está popularizando acciones de gestión como la recuperación de pastos y las roturaciones para generar pastos o terreno agrícolas. La ganadería extensiva, en combinación con prácticas silvícolas, es considerada una solución práctica para la gestión del riesgo de incendios a gran escala, pues combina la reducción de la biomasa o combustible, por lo tanto del riesgo de propagación de incendios, con la generación de beneficios socioeconómicos (LECEGUI et al., 2022; MAURI et al., 2023; VARELA et al., 2018).

Los tratamientos que combinan claras intensas y troceado y dispersión de los restos silvícolas generan a menudo dudas entre los profesionales forestales sobre su efecto inmediato en el comportamiento del fuego. Sin embargo, se ha demostrado que, aunque aumentan la carga de combustible muerto en superficie, pueden reducir significativamente

la ratio de propagación y la intensidad del fuego (PIQUÉ et al., 2022; PIQUÉ & DOMÈNECH, 2018). En cualquier caso, el aumento de la carga de restos silvícolas podría representar un problema a corto plazo, por lo que técnicas de aprovechamiento como el desembosque de árbol entero, pueden ser una buena solución.

La zona de estudio está incluida en el Plan Piloto para la creación de Paisajes Resilientes como zona estratégica para la prevención de incendios y con interés pastoral (AQUILUÉ et al., 2024). Además, ha sido declarada Punto Estratégico de Gestión (PEG) por El Grupo de Actuaciones Forestales (GRAF) del cuerpo de Bombers de la Generalitat de Catalunya.

El propósito de este trabajo es evaluar la efectividad de 4 tratamientos silvícolas diferentes para transformar un bosque denso de *Pinus sylvestris* en un sistema pastoral arbolado, con el objetivo dual de prevención de incendios y mejora de pastos. Estos 4 tratamientos son el resultado de la combinación de dos intensidades de clara con dos técnicas de desembosque. Las técnicas estudiadas son el desembosque de tronco (SO), y el de árbol entero (WT). Las intensidades de clara son: alta (H), en la cual la cobertura del dosel se redujo al 50%, y muy alta (VH), en la cual se redujo al 30%. La evaluación de los efectos de los tratamientos a corto plazo sobre el comportamiento del fuego se llevó a cabo mediante una caracterización intensiva de los modelos de combustible pre y postratamiento y la simulación del comportamiento del fuego.

2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son:

- Caracterizar los tratamientos silvícolas para la conversión de un rodal denso de pino albar a un sistema pastoral arbolado con el objetivo de prevención de incendios y mejora de pastos, combinando dos intensidades de clara (alta y muy alta) y dos métodos de desembosque (de tronco y de árbol entero).
- Describir el modelo de combustible del rodal antes y justo después de los tratamientos forestales.
- Evaluar los efectos a corto plazo de los diferentes tratamientos en el comportamiento del fuego a través de la simulación.

3. Metodología

Área de estudio

La zona de estudio (18,2 ha) está ubicada en la cordillera pirenaica, Cataluña, noreste de España. Sus coordenadas EPSG:25831 son: 354.236,5 m Este y 4.692.170,6 m Norte. Se sitúa en una divisoria a 1.700 m s.n.m., y presenta un relieve suave (pendiente media del 20%). Los bosques en la zona son, en su mayoría, densos y dominados por *Pinus*

sylvestris, de calidad media, provenientes de la colonización de espacios abiertos, a partir de 1950. El sotobosque suele ser pobre, dominado por *Juniperus communis* o *Buxus sempervirens*. Las condiciones del suelo están determinadas por la pizarra y las calizas subyacentes.

Las temperaturas medias mensuales varían de alrededor de 0,7 °C en enero a 17 °C en julio. La precipitación media anual es de aproximadamente 810 mm, concentrada principalmente en primavera y otoño, con una precipitación estival media de alrededor de 198 mm. Durante la temporada de incendios (en este estudio, del 1 de junio al 30 de septiembre), la zona se ve principalmente afectada por vientos de Norte y de Suroeste.

Tratamientos

Entre mayo y julio de 2024 se llevaron a cabo dos tratamientos diferentes (3 ha + 3 ha) junto con una unidad de control (0,3 ha). Los tratamientos incluyeron claras de alta (H, FCC final 50%) y muy alta intensidad (VH, FCC final 30%), y se ejecutaron mediante desembosque de tronco. Las claras de alta intensidad se realizaron con una distribución homogénea de los pies restantes, mientras que, en las claras de muy alta intensidad los árboles restantes se distribuyeron en bosquetes, de 8 a 10 árboles, con un radio de aproximadamente 6 m.

Los árboles y los bosquetes restantes se seleccionaron respetando: (1) los árboles más estables con copas más amplias; (2) los árboles que presentaran dendro-microhábitats o potencial para generarlos (BÜTLER et al., 2020)

El apeo y desramado se realizaron con motosierra, y el desembosque se llevó a cabo con un tractor equipado con cabrestante de cable. El sotobosque se desbrozó donde su cobertura superaba el 30%. Los restos leñosos de diámetro > 5 cm se cortaron en piezas de 1 metro de longitud y se dispersaron para lograr una altura de acumulación < 50 cm.

La repetición de estos tratamientos por el método de desembosque de árbol entero no se llegó a realizar por cuestiones técnicas, por lo que el efecto de estos tratamientos sobre las características y estructura de los combustibles se ha parametrizado a partir de conocimiento experto, según se explica más adelante. Se asume que la diferencia entre los tipos de desembosque (de tronco y de árbol entero) no afecta a la estructura final del dosel, definida por el tipo y la intensidad de las claras (alta y muy alta). Además, para garantizar la homogeneidad de los tratamientos se realizó un marcaje íntegro de los árboles antes de la corta.

Así, los 4 tratamientos estudiados se denominan: SOH, desembosque de tronco, clara de intensidad alta; SOVH, desembosque de tronco, clara de intensidad muy alta; WTH desembosque de árbol entero, clara de intensidad alta; y WTVH desembosque de árbol entero, clara de intensidad muy alta.

Métodos de muestreo

Se emplearon diferentes métodos de muestreo para monitorear la respuesta de la

vegetación a los tratamientos. Los datos se recolectaron antes (primavera de 2024) e inmediatamente después de los tratamientos (otoño de 2024).

La estructura del dosel antes y después del tratamiento, para el caso de los dos tratamientos con desembosque de tronco (SOH, SOVH), se determinó mediante un inventario dasométrico en 4 parcelas de 10 metros de radio (2 por zona de tratamiento). En el caso del muestreo postratamiento del SOVH, se realizó en una única parcela, más amplia (7.885 m²), para capturar la variabilidad de los bosquetes. Se registró el diámetro a la altura del pecho (DAP) para todos los árboles con un DAP \geq 7,5 cm. Además, se midieron la altura total (H) y la altura de la base de la copa (CBH) de los 5 árboles más próximos al centro de la parcela.

Los atributos de los componentes del sotobosque y la carga de combustible muerto (1h, 10h y 100h) antes del tratamiento se caracterizaron estableciendo 3 transectos lineales de 20 metros de longitud por parcela. Para lo primero, se establecieron 10 parcelas cuadradas de 1 x 1 metro de forma alterna a lo largo del transecto. Para lo segundo, se empleó el método de intersección planar según BROWN (1974).

La estructura del sotobosque posterior al tratamiento se caracterizó estableciendo un nuevo y único transecto de 300 metros de largo por tratamiento, para capturar la variabilidad observada. Se registró la longitud y la altura media de los componentes principales del sotobosque que interceptó el transecto.

Los restos leñosos finos se muestrearon dentro de las acumulaciones de restos leñosos identificadas en estos transectos siguiendo BROWN (1974). Se establecieron 21 parcelas de un metro de largo, cada dos acumulaciones, en cada transecto de 300 metros.

Modelos de combustible personalizados

Se crearon modelos de combustible personalizados para cada escenario [previo al tratamiento (PRE), y posterior (SOH, SOVH, WTH y WTVH)] a partir de los datos recolectados, combinando los métodos que se explican a continuación.

La carga de restos leñosos finos se estimó para cada categoría de tiempo de retardo siguiendo WOODALL & MONLEON (2008). En el caso de los escenarios post tratamiento, la carga obtenida integrando todas las mediciones se ponderó por la superficie ocupada por las acumulaciones de restos. La carga de hojarasca previa al tratamiento se estimó a partir de la cobertura, profundidad y densidad aparente siguiendo PRICHARD et al. (2013). La carga de hojarasca posterior al tratamiento se ha estimado proporcionalmente, a partir de la ecuación alométrica para elementos finos de RUIZ-PEINADO et al. (2011), aplicada a los pies por hectárea extraídos en cada tratamiento, de cada clase diamétrica. Este valor se ha multiplicado por el factor 1/6, según criterio experto, para representar únicamente las acículas.

La carga del combustible herbáceo vivo (Lh) se estimó a partir de su profundidad y cobertura siguiendo FERNANDES et al. (2012). La carga del combustible de especies leñosas del sotobosque (Lw) se calculó a partir de la cobertura y altura de estas según DE CACERES et al. (2019).

La altura del lecho de combustible (FBD) se calculó como la altura media ponderada de las especies leñosas del sotobosque, los restos leñosos y la capa herbácea, utilizando la cobertura como peso. La relación superficie-volumen (SA·V-1) y el contenido calórico se asignaron a cada tipo de combustible basado en las especies principales que lo componen. Los datos se obtuvieron de fuentes bibliográficas (DE CÁCERES et al., 2023).

El valor de la humedad de extinción del combustible muerto y la relación superficie-volumen del combustible herbáceo vivo se establecieron por defecto asignando el modelo de combustible estándar TL3 (restos leñosos bajo cubierta arbórea) de SCOTT & BURGAN, (2005).

La carga de combustible disponible del dosel se estimó a partir de los datos dasométricos utilizando las alometrías de RUIZ-PEINADO et al. (2011) para *Pinus sylvestris*. Dado que este componente de biomasa incluye ramas con un grosor mayor de 6 mm (< 20 mm), los valores estimados se multiplicaron por 1/3 para evitar sobreestimaciones, según criterio experto.

Para parametrizar las cargas de combustible muerto y la altura del lecho de combustible (FBD) en el caso del desembosque de árbol entero (WTH y WTVH) se propuso un factor del 10%, basado en conocimiento experto. De esta manera se supone que los restos silvícolas aportados en estos tratamientos constituyen un 10% de los que aporta el desembosque de tronco.

Escenarios meteorológicos y simulación del comportamiento del fuego

Los escenarios meteorológicos de simulación representan los percentiles 50, 75 y 99 de las variables de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento de la serie meteorológica horaria interpolada Era5-Land (MUÑOZ SABATER, 2019), correspondiente al periodo 2004 – 2024, contrastada con otras fuentes.

La humedad del combustible muerto se ha calculado mediante las tablas de ROTHERMEL (1983), a partir de las variables meteorológicas y del rodal. La humedad del combustible vivo leñoso y del combustible de copas se ha calculado a partir de la humedad foliar máxima y mínima de cada especie, obtenida de bibliografía (DE CÁCERES et al., 2023), asignando un percentil dentro del rango, en función de la exposición (FCC > o ? 50%).

La simulación estática del comportamiento del fuego fue realizada con el software BehavePlus 6.0 [manual de usuario de la versión anterior por HEINSCH & ANDREWS (2010)].

4. Resultados

Estructura de la masa y del sotobosque antes y después de los tratamientos

Ambas intensidades de tratamiento (alta y muy alta) reducen significativamente las variables de densidad y existencias del rodal (esto es, N, FCC, AB, VCC). El área

basimétrica extraída ronda el 44% de la inicial en el caso de la clara de alta intensidad y el 67% en la clara de muy alta intensidad. La altura media (Hm) y la altura de base de copa (CBH) muestran tendencia al aumento en ambas intensidades de tratamiento. El volumen que permanece en pie (VCC) es mayor después del tratamiento de alta intensidad que del de muy alta intensidad, mientras que el volumen extraído sigue la tendencia inversa. La Tabla 1 compara las variables dasométricas en el escenario previo y los posteriores al tratamiento. La Figura 1 muestra una imagen aérea de los tratamientos aplicados. Puesto que los tratamientos de clara son iguales para ambos tipos de desembosque, los valores de las variables postratamiento son también iguales.

Tabla 1. Resumen de variables dasométricas para el escenario previo (Pre) y los posteriores al tratamiento (SOH, SOVH, WTH, WTVH). N, número de árboles por hectárea; FCC, Fracción de cuba cubierta; AB, área basal; Dg, diámetro medio cuadrático; Hm, altura media; CBH, altura de la base de la copa; VCC, volumen con corteza; VCCe, volumen con corteza extraído. Algunos valores se presentan como "valor medio \pm desviación estándar".

Variable	Unidades	Pre	SOH y WTH	SOVH y WTVH
N	pies-ha-1	756 \pm 163,1	366	213
FCC	%	71 \pm 2,5	50	30
AB	m ² -ha-1	54,3 \pm 7,7	30,4	18,1
Dg	cm	30,5 \pm 2,3	32,5	32,9
Hm	m	13,1 \pm 1,8	14,1 \pm 1,1	13,5 \pm 2,2
CBH	m	6,9 \pm 1,3	7,9 \pm 1,5	7,4 \pm 1,5
VCC	m ³ -ha-1	333,8 \pm 42,1	189,2	115,0
VCCe	m ³ -ha-1	-	149,0	233,6

También, en el caso de los tratamientos con desembosque de tronco (SOH y SOVH), ambos reducen significativamente el recubrimiento de la hierba y de las especies leñosas del sotobosque y aumentan el recubrimiento de restos leñosos (Tabla 2). La altura media de las especies arbustivas se ve negativamente afectada en ambos tratamientos. Por el contrario, la altura de los restos aumenta. La alta variabilidad de la cobertura de especies leñosas de sotobosque en el escenario previo a los tratamientos refleja la presencia de bosquetes de regenerado de *Pinus sylvestris*. Los tratamientos con desembosque de árbol entero afectarían de manera similar, pero con un aumento mucho menor del recubrimiento de restos leñosos.

Tabla 2. Resumen del recubrimiento (%) y altura (H) de los principales componentes del sotobosque para el escenario previo al tratamiento (Pre) y los posteriores que incluyen desembosque de tronco (SOH y SOVH).

Componente	Pre		SOH		SOVH	
	%	H (m)	%	H (m)	%	H (m)
Hierba	76,8 ±11,4	0,049 ±0,013	42,3	0,05	28,3	0,05
Especies leñosas sotobosque	11,9 ±13,3	0,93 ±0,81	2,5	0,32	1,8	0,37
Restos leñosos	8,3 ±2,9	0,16 ±0,14	36,7	0,23	50,9	0,29



Figura 1. Ortofoto de los tratamientos. La línea azul define el límite del tratamiento. De izquierda a derecha, SOVH, SOH y franja sin ejecutar.

Modelos de combustible

La Tabla 3 y Tabla 4 muestran las variables del combustible de superficie y del combustible de copas de los modelos de combustible construidos. Todos los tratamientos incrementan la carga de combustible muerto (1h, 10h, 100h), con especial importancia en el combustible de 10h. Este incremento es mucho mayor en el desembosque de tronco que en el de árbol entero. Todos los tratamientos disminuyen las cargas de combustibles vivos y la altura del lecho de combustible (SOVH no reduce FBD).

La altura del lecho de combustible es muy baja en todos los modelos, tanto antes como después de los tratamientos. Esto es debido a una cobertura de la hierba

considerablemente alta en todos los tratamientos, con una altura bastante reducida, y un bajo porcentaje de recubrimiento arbustivo. En el caso de los escenarios post tratamiento, la altura reducida de los restos silvícolas contribuye a este hecho.

Ambos tratamientos (claras de alta y de muy alta intensidad) reducen la fracción de cabida cubierta y aumentan ligeramente la altura media del dosel y la altura media de la base de la copa. También reducen significativamente la carga de combustible de copas disponible y por lo tanto la densidad aparente del dosel.

Tabla 3. Resumen del modelo de combustible de superficie en los diferentes escenarios. 1h, 10h, 100h, carga de combustible muerto de la categoría correspondiente; Lh, carga del combustible vivo herbáceo; Lw, carga del combustible vivo leñoso; FBD, altura del lecho de combustible. Rojo y verde, muestran variaciones favorables o desfavorables, en porcentaje, respecto al valor pretratamiento. Algunos valores se presentan como "valor medio \pm desviación estándar".

Variable Uds.	PRE	SOH		SOVH		WTH		WTVH		
	Valor	Valor	Incr.	Valor	Incr.	Valor	Incr.	Valor	Incr.	
Variables de superficie										
1h t·ha ⁻¹	2,19 \pm 0,51	5,61	157%	8,31	280%	2,53	16%	2,80	28%	
10h t·ha ⁻¹	0,63 \pm 0,50	4,21	571%	11,04	1661%	0,99	57%	1,67	166%	
100h t·ha ⁻¹	2,11 \pm 1,83	10,30	388%	21,35	911%	2,93	39%	4,04	91%	
Lh t·ha ⁻¹	0,53 \pm 0,15	0,30	-44%	0,20	-63%	0,30	-44%	0,20	-63%	
Lw t·ha ⁻¹	0,69 \pm 0,69	0,18	-73%	0,10	-85%	0,18	-73%	0,10	-85%	
FBD m	0,15 \pm 0,16	0,11	-22%	0,17	15%	0,06	-62%	0,06	-60%	

Tabla 4. Variables del combustible de copas en los diferentes escenarios. FCC, fracción de cabida cubierta; Hm, altura media del dosel; CBH, altura media de la primera rama viva; ACFL, carga del combustible de copas disponible; CBD, densidad aparente del dosel. Rojo y verde, muestran variaciones favorables o desfavorables, en porcentaje, respecto al valor pretratamiento.

Variable	Uds.	PRE	SOH y WTH		SOVH y WTVH	
		Valor	Valor	Incr.	Valor	Incr.
Variables del dosel						
FCC	%	70	50	-29%	30	-57%
Hm	m	13,1	14,1	7%	13,5	2%
CBH	m	6,9	7,9	15%	7,4	8%
ACFL	kg·m ⁻²	1,173	0,638	-46%	0,378	-68%
CBD	kg·m ⁻³	0,187	0,104	-45%	0,063	-67%

La Tabla 5 muestra las humedades de los combustibles en los escenarios meteorológicos. La humedad del combustible muerto (1h, 10h y 100h) se ve influida por las variables del rodal, variables meteorológicas y por la exposición (FCC). Las humedades de los combustibles vivos se ven influidas únicamente por la exposición y la composición específica.

Tabla 5. Humedades de los combustibles en los diferentes escenarios meteorológicos. Siglas de los combustibles en Tabla 3. VV, velocidad del viento; HR, humedad relativa; T, temperatura del aire. Rojo amarillo y verde muestran variaciones favorables, neutrales o desfavorables, en porcentaje, respecto al valor pretratamiento.

Variable	Uds.	PRE Valor	SOH y WTH Valor	Incr.	SOVH y WTVH Valor	Incr.
P50. VV = 27,5 km·h ⁻¹ ; HR = 66,2%; T = 16,3 °C						
1h FM	%	12	12	0%	9	-25%
10h FM	%	13	13	0%	10	-23%
100h FM	%	14	14	0%	11	-21%
P75. VV = 41,3 km·h ⁻¹ ; HR = 50,9%; T = 20 °C						
1h FM	%	10	10	0%	7	-30%
10h FM	%	11	11	0%	8	-27%
100h FM	%	12	12	0%	9	-25%
P99. VV = 54,5 km·h ⁻¹ ; HR = 28,1%; T = 27,2 °C						
1h FM	%	7	7	0%	4	-43%
10h FM	%	8	8	0%	5	-38%
100h FM	%	9	9	0%	6	-33%
Escenarios P50, P75 y P99						
Lh FM	%	60	60	0%	30	-50%
Lw M	%	114,9	121,7	6%	97,4	-15%
Foliar M	%	110,5	110,5	0%	86,7	-22%

Comportamiento del fuego

El modelo previo a los tratamientos genera fuego de superficie en el caso del escenario meteorológico más suave (P50). En los escenarios meteorológicos más intensos (P75 y P99), genera fuegos del tipo condicional de copas, lo cual indica que el fuego no tiene la capacidad para transitar de la superficie a las copas dentro del rodal, pero el dosel podría quemarse con un fuego activo de copas si éste alcanzase el rodal desde el exterior. Las variables del comportamiento correspondientes a los fuegos de superficie se muestran en la Tabla 6. Las variables correspondientes al fuego activo de copas que es posible en el escenario pretratamiento se muestran en la Tabla 7. El fuego activo de copas que podría darse en el escenario pretratamiento para los escenarios meteorológicos P75 y P99 muestra los valores más altos en todas las variables, implicando la severidad potencial

máxima simulada.

Todos los modelos postratamiento generan fuegos de superficie en los tres escenarios climáticos (P50, P75 y P99). En todos los casos, excepto en el SOVH, la severidad potencial es menor que la del fuego de superficie del escenario pretratamiento (Figura 2). Los tratamientos más favorables en todos los escenarios meteorológicos son los que utilizan desembosque de árbol entero.

Tabla 6. Parámetros del comportamiento del fuego simulado en cada tratamiento (PRE, SOH, SOVH, WTH, WTVH) y en cada escenario meteorológico (P50, P75, P99). TF, tipo de fuego; ROS, ratio de propagación; HPUA, calor por unidad de superficie; FLI, intensidad de la línea de fuego; FL, longitud de llama; SH, altura de quemado. S, fuego de superficie; CC, fuego condicional de copas. Rojo, amarillo y verde, muestran variaciones favorables, neutrales o desfavorables, respecto al valor pretratamiento.

Variable	Uds.	PRE	SOH		SOVH		WTH		WTVH	
		Valor	Valor	Incr.	Valor	Incr.	Valor	Incr.	Valor	Incr.
P50										
TF	---	S	S	S=S	S	S=S	S	S=S	S	S=S
ROS	m·min ⁻¹	0,8	0,4	-50%	0,8	0%	0,3	-63%	0,5	-38%
HPUA	kJ·m ⁻²	4952	4231	-15%	4510	-9%	3363	-32%	2964	-40%
FLI	kW·m ⁻¹	62	26	-58%	63	2%	19	-69%	26	-58%
FL	m	0,5	0,3	-40%	0,5	0%	0,3	-40%	0,3	-40%
SH	m	1,4	0,5	-64%	0,6	-57%	0,4	-71%	0,3	-79%
P75										
TF	---	CC	S	CC>S	S	CC>S	S	CC>S	S	CC>S
ROS	m·min ⁻¹	1,2	0,6	-50%	1,5	25%	0,5	-58%	0,9	-25%
HPUA	kJ·m ⁻²	5161	4368	-15%	4656	-10%	3487	-32%	3056	-41%
FLI	kW·m ⁻¹	104	43	-59%	113	9%	31	-70%	47	-55%
FL	m	0,7	0,4	-43%	0,7	0%	0,4	-43%	0,5	-29%
SH	m	1,8	0,6	-67%	0,8	-56%	0,4	-78%	0,4	-78%
P99										
TF	---	CC	S	CC>S	S	CC>S	S	CC>S	S	CC>S
ROS	m·min ⁻¹	1,8	0,9	-50%	2,6	44%	0,8	-56%	1,6	-11%
HPUA	kJ·m ⁻²	5476	4555	-17%	5313	-3%	3648	-33%	3454	-37%
FLI	kW·m ⁻¹	167	68	-59%	228	37%	50	-70%	93	-44%
FL	m	0,8	0,5	-38%	0,9	13%	0,5	-38%	0,6	-25%
SH	m	2,8	0,9	-68%	1,4	-50%	0,6	-79%	0,6	-79%

Tabla 7. Parámetros del comportamiento del fuego simulado en el escenario PRE. Valores correspondientes al fuego de activo de copas en los casos de fuego condicional de copas,

en los escenarios climáticos P75 y P99. Siglas: ver Tabla 5.

Variable	Uds.	P75	P99
TF	---	AC	AC
ROS	m·min ⁻¹	16,4	26,4
HPUA	kJ·m ⁻²	26961	27276
FLI	kW·m ⁻¹	7350	11979
FL	m	10,1	13,9

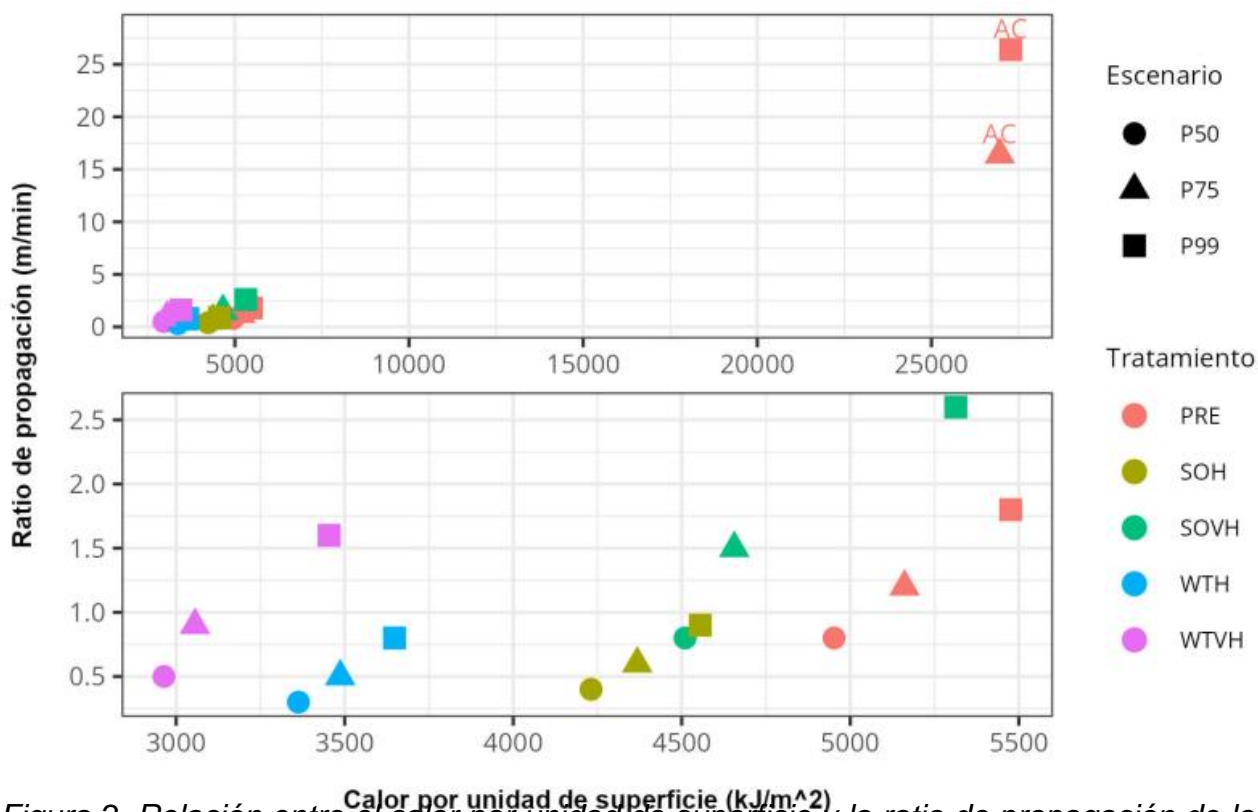


Figura 2. Relación entre el calor por unidad de superficie y la ratio de propagación de los diferentes escenarios pre y post tratamiento. El gráfico inferior es un zoom de la zona inferior izquierda del gráfico superior, incluye solo los escenarios de fuego de superficie. AC, indica los escenarios en los cuales el tipo de fuego es activo de copas. El resto de los escenarios, son fuegos de superficie.

5. Discusión

Estructura forestal

Los cuatro tratamientos propuestos alteran significativamente las variables del dosel y el

sotobosque. Las claras realizadas se consideran muy intensas, con áreas basimétricas extraídas del 44% (H) y el 67% (VH) del área basimétrica inicial. Esto se debe a que el principal objetivo del tratamiento es la conversión a un sistema silvopastoral, junto a la mejora de pastos y prevención de incendios.

Construimos modelos de combustible personalizados para simular el comportamiento del fuego con la mayor precisión posible, aunque es un método costoso (KEANE, 2015). Los escenarios de desembosque de árbol entero se crearon mediante la parametrización de los efectos de los tratamientos en la estructura del sotobosque. MITSOPOULOS & DIMITRAKOPOULOS (2017) utilizaron un enfoque similar.

La alteración significativa del dosel y el aumento de las cargas de combustible muerto es consistente con otras observaciones (PIQUÉ et al., 2022; PIQUÉ & DOMÈNECH, 2018; VAILLANT et al., 2009a). Los parámetros estimados del modelo de combustible antes del tratamiento muestran una elevada variabilidad.

Los tratamientos de clara por lo bajo de alta intensidad descritos en PIQUÉ & DOMÈNECH (2018) son comparables a nuestros tratamientos de clara de alta intensidad (SOH y WTH). En nuestro caso, la altura base de las copas varía en un +14,5% (1 m), y la densidad aparente del dosel en -44,7% (0,084 kg·m⁻³), lo cual es similar al incremento del 14,5% (1 m) y del -60% (0,14 kg·m⁻³) observados en el estudio anterior.

Los cambios microclimáticos que afectan a la humedad de los combustibles después de las claras no son evidentes (BANERJEE, 2020). En este estudio intentamos reflejar el efecto de protección del dosel asignando menor humedad a los combustibles en los tratamientos de mayor intensidad (SOVH y WTVH).

Cabe anotar que la estimación de las cargas de combustible de superficie y más concretamente de los restos de cortas es laboriosa y compleja, y puede requerir de la realización de muestreos destructivos. Para este trabajo, se ha utilizado el método de intersección planar de BROWN (1974) para estimar la carga de restos leñosos finos (1h, 10h, 100h) al tratarse de un método sencillo y rápido de aplicar. Este método presenta una limitación a la hora de caracterizar la carga de restos silvícolas recientes ya que no incluye las acículas presentes en las ramas. En este estudio se ha planteado como posible solución, la estimación de la carga de las acículas a través de las ecuaciones alométricas de RUIZ-PEINADO et al. (2011). En cualquier caso, esta estimación debería contrastarse con datos obtenidos a partir de muestreos destructivos.

Efectividad esperada de la prevención de incendios

Antes del tratamiento, el rodal desarrolla un fuego de superficie de baja severidad potencial en todos los escenarios meteorológicos. En los escenarios meteorológicos P75 y P99, existe también la posibilidad de un fuego de copas, que corresponde con la severidad potencial más alta de entre las obtenidas. Ambas intensidades de clara reducen sustancialmente la posibilidad de un fuego activo de copas. Esto se debe a una reducción significativa en la densidad aparente del dosel y, por ende, a un aumento en la ratio de propagación del fuego activo de copas crítica, lo cual es consistente con PIQUÉ & DOMÈNECH (2018), PIQUÉ et al. (2022), STEPHENS & MOGHADDAS (2005),

CRECENTE-CAMPO et al. (2009), entre otros. La posibilidad de transición del fuego de la superficie a las copas es muy baja en todos los casos simulados, especialmente en los tratamientos con clara de alta intensidad (SOH y WTH) debido al efecto protector de las copas, que afecta a la velocidad del viento y a la humedad de los combustibles.

Se ha comparado el comportamiento del fuego en diferentes escenarios meteorológicos definidos por percentiles, como es habitual en experimentos similares (AGEE & LOLLEY, 2006; PIQUÉ & DOMÈNECH, 2018; VAILLANT et al., 2009b). En los casos simulados, el comportamiento del fuego no es muy diferente entre escenarios meteorológicos, excepto por la posibilidad que se abre al fuego activo de copas en el escenario previo al tratamiento (P75 y P99). Esta homogeneidad se debe, en gran parte, a que el factor más determinante en estas simulaciones es la alta compactación del lecho de combustible. Las variables del comportamiento no aumentan proporcionalmente a la cantidad de combustible en ningún caso, y es por el mismo motivo. Esta observación es consistente con PIQUÉ & DOMÈNECH (2018).

De acuerdo con la propuesta de ROTHERMEL (1983) para los niveles de supresión del fuego, todos los escenarios simulados de fuego de superficie son de baja intensidad y pueden ser combatidos utilizando herramientas manuales. Por otro lado, los escenarios de fuego activo en copas en el pretratamiento P75 y P99 son de intensidad extrema y estarían por encima de la capacidad de extinción (COSTA et al., 2011).

Implicaciones prácticas para la gestión

Se espera que los tratamientos silvícolas diseñados modifiquen la disponibilidad de recursos y las condiciones microclimáticas del sotobosque, induciendo así mejoras en la productividad de los pastos (PACHAS et al., 2023), su composición y calidad (DUCHERER, 2005). Por otro lado, la acumulación de restos dificulta el uso pastoral (KAUFMANN, 2011). Por lo tanto, la mejor opción de gestión para el uso pastoral debería incluir desembosque de árbol entero.

Los episodios de viento y nieve pueden causar graves daños a los bosques de *Pinus sylvestris* (DEL RÍO et al., 2017). La relación altura media-diámetro del rodal antes del tratamiento ($Hm \cdot Dm^{?1}$) es de aproximadamente 45, lo cual está por debajo del rango crítico (70-90) reportado por DEL RÍO et al. (1997). En cualquier caso, se debe asumir la posibilidad de un riesgo de daños por derribo en el rodal, debido a la alta intensidad de los tratamientos necesaria para lograr los objetivos a corto plazo. La distribución por bosquetes en SOVH y WTVH podría representar una solución de estabilidad colectiva para mitigar este riesgo.

A medio y largo plazo, se espera una emergencia importante del estrato arbustivo y de regeneración debido a la reducción de la FCC por debajo del 70% (PIQUÉ et al., 2011). El pastoreo dirigido se considera una estrategia económica y sinérgica para el mantenimiento de áreas cortafuegos (VARELA et al., 2018). Esto debería combinarse con tratamientos mecánicos o quemas prescritas periódicas para garantizar cargas bajas de combustible (OIKONOMOU et al., 2023), y, por lo tanto, la consecución de los objetivos de gestión durante un período prolongado.

6. Conclusiones

Las cuestiones más relevantes sobre el potencial desempeño de los tratamientos son:

1. Todos los tratamientos probados contribuyen a reducir la severidad potencial del fuego y aumentar las oportunidades de supresión en los escenarios meteorológicos más adversos (P75 y P99). En el escenario más favorable (P50), los tratamientos mantienen o mejoran la severidad potencial y oportunidades de supresión respecto al escenario previo altratamiento.
2. El desembosque de árbol entero (WTH y WTVH) constituye la mejor opción para lograr los objetivos de gestión de prevención de incendios y mejora de pastos. La acumulación de restos en el desembosque de tronco dificulta el desempeño en los dos sentidos.
3. La compactación de los restos silvícolas muestra una gran importancia, amortiguando significativamente el efecto adverso de las condiciones meteorológicas sobre el comportamiento del fuego.
4. El pastoreo combinado con futuras intervenciones mecánicas o quemas prescritas servirá para mantener este Punto Estratégico de Gestión (PEG).

7. Agradecimientos

A las compañeras del CTFC: Mar Gallego, Francesc Viaplana, Teresa Valor, Francesc Cano, Ángela de la Orden, Marta Vilarnau.

Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizon 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención n.º 101037419 - FIRE-RES.

8. Bibliografía

AGEE, J. K.; LOLLEY, M. R.; 2006. Thinning and prescribed fire effects on fuels and potential fire behavior in an eastern Cascades forest, Washington, USA. *Fire Ecology*, 142–158.

AQUILUÉ, N.; CANO, F.; MANEJA, R.; TRASOBARES, A.; 2024. Proposta de paisatge agroforestal resilient a Soriguera en el marc de l'Estratègia de la Bioeconomia de Catalunya 2030.

BANERJEE, T.; 2020. Impacts of forest thinning on wildland fire behavior. *Forests*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/F11090918>

BROWN, J. K.; 1974. Handbook for inventorying downed woody material. USDA Forest Service.

BÜTLER, R.; LACHAT, T.; KRUMM, F.; KRAUS, D.; LARRIEU, L.; 2020. Dendro-Microhábitats. Guía de campo. Descripción, identificación y clasificación para su inventario. Instituto Federal Suizo de Investigación en el ámbito Forestal, de la Nieve y del Paisaje (WSL).

COSTA, P.; CASTELLNOU, M.; LARRAÑAGA, A.; MIRALLES, M.; KRAUS, D.; 2011. La prevenció dels Grans Incendis Forestals adaptada a l'Incendi Tipus. In *La prevenció dels Grans Incendis Forestals adaptada a l'Incendi Tipus* (març 2011). Unitat tècnica del GRAF.

CRECENTE-CAMPO, F.; POMMERENING, A.; RODRIGUEZ-SOALLEIRO, R.; 2009. Impacts of thinning on structure, growth and risk of crown fire in a *Pinus sylvestris* L. plantation in northern Spain. *Forest Ecology and Management*, 257(9), 1945–1954. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.009>

DE CACERES, M.; CASALS, P.; GABRIEL, E.; CASTRO, X.; 2019. Scaling-up individual-level allometric equations to predict stand-level fuel loading in Mediterranean shrublands. *Annals of Forest Science*, 76(3), 1–17.

DE CÁCERES, M.; MOLOWNY-HORAS, R.; CABON, A.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; MENCUCCINI, M.; GARCÍA-VALDÉS, R.; NADAL-SALA, D.; SABATÉ, S.; MARTINSTPAUL, N.; MORIN, X.; D'ADAMO, F.; BATLLORI, E.; AMÉZTEGUI, A.; 2023. MEDFATE 2.9.3: a trait-enabled model to simulate Mediterranean forest function and dynamics at regional scales. *Geoscientific Model Development*, 16(11), 3165–3201. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-3165-2023>

DEL RÍO, M.; BRAVO-OVIEDO, A.; PRETZSCH, H.; LÖF, M.; RUIZ-PEINADO, R.; 2017. A review of thinning effects on scots pine stands: From growth and yield to new challenges under global change. *Forest Systems*, 26(2). <https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11325>

DEL RÍO, M.; MONTERO, G.; ORTEGA, C.; 1997. Respuesta de los distintos regímenes de claras a los daños causados por la nieve en masas de *Pinus sylvestris* L. en el sistema central. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 6(1–2), 103–117.

DUCHERER, K. L.; 2005. Effects of Burning and Thinning on Species Composition and Forage Production in British Columbia Grasslands (Issue December).

FERNANDES, P. M.; LOUREIRO, C.; BOTELHO, H.; 2012. PiroPinus: A spreadsheet application to guide prescribed burning operations in maritime pine forest. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 58–61. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.11.005>

HEINSCH, F. A.; ANDREWS, P. L.; 2010. BehavePlus fire modeling system, version 5.0: Design and Features. In F. S. U.S. Department of Agriculture (Ed.), *RMRS-GTR-249*.

KAUFMANN, J.; 2011. Interactions between cattle grazing and forestry on Alberta ' s Public Lands. 196.

KEANE, R. E.; 2015. Wildland Fuel Fundamentals and Applications (SPRINGER (ed.)).

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-09015-3>

LECEGUI, A.; OLAIZOLA, A. M.; VARELA, E.; 2022. Disentangling the role of management practices on ecosystem services delivery in Mediterranean silvopastoral systems: Synergies and trade-offs through expert-based assessment. *Forest Ecology and Management*, 517(May), 120273. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120273>

MAURI, E.; HERNÁNDEZ PAREDES, E.; NÚÑEZ BLANCO, I.; GARCÍA FECED, C.; 2023. Key Recommendations on Wildfire Prevention in the Mediterranean. New governance for a comprehensive approach to mitigating wildfire risks. European Forest Institute. <http://ec.europa.eu/ambiente/forests/studies.htm>

MITSOPOULOS, I. D.; DIMITRAKOPOULOS, A. P.; 2017. Effect of fuel treatments on crown fire behavior in aleppo pine forests of Greece: A simulation study. *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(7), 1507–1514. <https://doi.org/10.30638/eemj.2017.163>

MUÑOZ SABATER, J.; 2019. *ERA5-Land hourly data from 1950 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>

OIKONOMOU, D.; VRAHNAKIS, M.; YIAKOULAKI, M.; XANTHOPOULOS, G.; KAZOGLU, Y.; 2023. Grazing as a Management Tool in Mediterranean Pastures: A Meta-Analysis Based on A Literature Review. *Land*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/land12071290>

PACHAS, N.; DANAHER, L.; DILLON, A.; BURRIDGE, A.; OOSTENBRINK, J.; MENZIES, T.; 2023. PDS Integrating pasture and timber production Project. <http://libdcms.nida.ac.th/thesis6/2010/b166706.pdf>

PIQUÉ, M.; BELTRÁN, M.; VERICAT, P.; CERVERA, T.; FARRIOL, R.; BAIGES, T.; 2011. Models de gestió per als boscos de pi roig (*Pinus sylvestris* L.): producció de fusta i prevenció d'incendis forestals. Sèrie: Orientacions de Gestió Forestal Sostenible per a Catalunya (ORGEST). In *Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST)*. Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya.

PIQUÉ, M.; DOMÈNECH, R.; 2018. Effectiveness of mechanical thinning and prescribed burning on fire behavior in *Pinus nigra* forests in NE Spain. *Science of the Total Environment*, 618, 1539–1546. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.316>

PIQUÉ, M.; GONZÁLEZ-OLABARRIA, J. R.; BUSQUETS, E.; 2022. Dynamic Evaluation of Early Silvicultural Treatments for Wildfire Prevention. *Forests*, 13(6), 1–11. <https://doi.org/10.3390/f13060858>

PRICHARD, S. J.; SANDBERG, D. V.; OTTMAR, R. D.; EBERHARDT, E.; ANDREU, A.; EAGLE, P.; SWEDIN, K.; 2013. Fuel Characteristic Classification System version 3.0: technical documentation. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-887>

ROTHERMEL, R. C.; 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. USDA Forest Service.

RUIZ-PEINADO, R.; RIO, M.; MONTERO, G.; DEL RIO, M.; MONTERO, G.; 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, 20(1), 176–188.

SCOTT, J. H.; BURGAN, R. E.; 2005. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model. USDA Forest Service.

STEPHENS, S. L.; MOGHADDAS, J. J.; 2005. Experimental fuel treatment impacts on forest structure, potential fire behavior, and predicted tree mortality in a California mixed conifer forest. *Forest Ecology and Management*, 215(1–3), 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.070>

VAILLANT, N. M.; FITES-KAUFMAN, J. A.; REINER, A. L.; NOONAN-WRIGHT, E. K.; DAILEY, S. N.; 2009a. Effect of fuel treatments on fuels and potential fire behavior in California, USA, national forests. *Fire Ecology*, 5(2), 14–29. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0502014>

VAILLANT, N. M.; FITES-KAUFMAN, J. A.; STEPHENS, S. L.; 2009b. Effectiveness of prescribed fire as a fuel treatment in Californian coniferous forests. *International Journal of Wildland Fire*, 18(2), 165–175. <https://doi.org/10.1071/WF06065>

VARELA, E.; GÓRRIZ-MIFSUD, E.; RUIZ-MIRAZO, J.; LÓPEZ-I-GELATS, F.; 2018. Payment for targeted grazing: Integrating local shepherds into wildfire prevention. *Forests*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/f9080464>

WOODALL, C. W.; MONLEON, V. J.; 2008. Sampling protocol, estimation, and analysis procedures for the down woody materials indicator of the FIA Program. *Gen. Tech. Rep. NRS-22*, 68.