



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

Efectos en el arbolado del tratamiento de quema prescrita en masas mixtas y puras de *Pinus nigra* en la provincia de Cuenca

ESPINOSA, J.^{1,2}, MADRIGAL, J.^{2,3,4}, RODRÍGUEZ DE RIVERA, O.⁵, GUIJARRO, M.^{2,3}, CRUZ, A.C.², MARTIN-BENITO, D.², PANDO, V.^{1,3}, ALMODÓVAR, J.⁶, MATEO, J.F.⁶, DÍEZ, C.², CARRILLO, C.^{2,4} y HERNANDO, C.^{2,3}.

¹ Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Palencia (España).

² Centro de Investigación Forestal (CIFOR-INIA / CSIC). Madrid (España).

³ Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR-UVa). Palencia (España).

⁴ Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Madrid (España).

⁵ Universidad de Kent. Canterbury (Reino Unido).

⁶ Junta de Castilla La Mancha. Cuenca (España).

Resumen

En este estudio de parcelas permanentes se ha evaluado los efectos sobre el arbolado del tratamiento de quema prescrita de baja intensidad en dos masas, una mixta de *Pinus nigra* y *Pinus pinaster* y otra pura de *Pinus nigra*, en Cuenca. También ha sido incluido el efecto de la época de quema (primavera y otoño). El diseño experimental ha contemplado un sistema de triple réplica por tratamiento y tipo de masa (parcelas quemadas en primavera, quemadas en otoño y control). En ellas se ha estudiado, por primera vez, el impacto de la quema en la biomasa de desfronde y su contenido de nutrientes. Paralelamente se ha evaluado el efecto del tratamiento en el crecimiento de los árboles. Se han incluido variables no evaluadas previamente de forma conjunta, como la temperatura alcanzada en la zona cambial y el tiempo de residencia de la llama. Los resultados muestran un efecto a corto plazo en la cantidad de desfronde, consecuencia del calentamiento de las copas, que se diluye en el tiempo. La ausencia de estrés en el arbolado no ha generado diferencias entre crecimientos. Todo ello ha permitido obtener conclusiones que mejorarán la prescripción, disminuyendo así la vulnerabilidad del arbolado.

Palabras clave

Incendios forestales, ecología del fuego, desfronde, crecimiento del arbolado, gestión forestal.

1. Introducción

Aunque existen estudios paleontológicos que sugieren que el fuego es un elemento natural en los bosques del área mediterránea (PAUSAS & KEELEY, 2009), el drástico incremento del número de incendios y la superficie afectada por los mismos, ha convertido la situación en catastrófica. Los cambios socio-económicos ocurridos en el último siglo han derivado en cambios en la estructura forestal. En este sentido, el éxodo rural ha favorecido el incremento de la cobertura vegetal, particularmente de especies de rápida sucesión (algunas de ellas muy inflamables) (MOREIRA et al., 2001). De igual manera, el aumento del turismo ligado al entorno forestal ha elevado el número de igniciones en estas zonas (GANTEAUME et al., 2013). A la vez, la expansión de las infraestructuras urbanas a través del área forestal ha propiciado un aumento de la zona de interfaz urbano-forestal (CHAS-AMIL et al., 2013). A todo ello hay que sumar los cambios pronosticados en el clima, dado que las predicciones de cambio climático auguran un incremento de la temperatura en torno a 1.5°C entre 2030 y 2052 si las tendencias de calentamiento global continúan evolucionando de acuerdo a la tasa actual (IPCC, 2018). Estas predicciones de un clima más severo, junto con la nueva configuración del paisaje forestal, están cambiando el comportamiento de los incendios forestales, particularmente en el área mediterránea (SAN-MIGUEL-AYANZ et al., 2020). De hecho, en los últimos

diez años se está registrando un nuevo tipo de incendios en diferentes partes del mundo, denominados por algunos autores como “incendios extremos” (TEDIM et al., 2018). Este tipo de incendios pueden propagarse rápidamente, por ejemplo, CASTELLNOU et al. (2018) describieron velocidades de propagación en torno a las 10000 ha h⁻¹ en los incendios ocurridos en Portugal en octubre de 2017. En estas condiciones, el colapso de los sistemas de extinción de incendios forestales es comprensible, con siniestros que escapan a la capacidad de control y tienen consecuencias devastadoras.

Esta evolución, desde paisajes manejados de tipo mosaico, a paisajes con altas cargas de combustible continuo, ha creado la necesidad de desarrollar planes de manejo forestal efectivos y adecuados a los nuevos escenarios. La quema prescrita (WADE, 1989) es una herramienta de silvicultura preventiva que permite reducir la continuidad y la carga de combustible. Puede, también, incrementar la altura de la copa viva, disminuir la densidad arbórea o facilitar la supervivencia de especies adaptadas a fuegos de superficie (AGEE & SKINNER, 2005). Además, podría facilitar las labores de extinción (PIQUÉ & DOMÈNECH, 2018). Más allá de la prevención de incendios, la quema prescrita tiene efectos beneficiosos sobre la vitalidad de los ecosistemas forestales, recuperando una distribución de las capas de vegetación más equilibrada. Puntualmente, puede permitir la recuperación de ciertos hábitats y mejorar la biodiversidad (p. ej., FERNANDES et al., 2013 o SHAKESBY et al., 2015). Desde un punto de vista social, en las zonas rurales, la quema prescrita puede reducir los conflictos por el uso del fuego como herramienta para favorecer el pastoreo controlado u otras actividades tradicionales, involucrando a diferentes actores e intereses locales. De cara a la sociedad, la quema prescrita podría tener un efecto pedagógico significativo, al permitir “explicar” el papel del fuego como una perturbación natural de los ecosistemas. En cualquier caso, el éxito de la quema prescrita depende de una planificación adecuada y del seguimiento de las variables pre-incendio, incendio y post-incendio, siendo fundamentales para determinar si se han cumplido los objetivos perseguidos (FERNANDES & BOTELHO, 2004). Muchos países han mantenido una fuerte oposición al uso de la quema prescrita como método preventivo, lo que dificulta la aplicación del tratamiento para la reducción eficiente de combustible a la escala de paisaje (REGOS et al., 2014). En Europa, la quema prescrita se usa ocasionalmente en Portugal, España, Francia e Italia, y es, todavía, cuestionada en otros países. En la sierra de Cuenca, la quema prescrita se ha realizado, generalmente, en zonas estratégicas y a escala muy local. Sin embargo, los servicios forestales están haciendo un esfuerzo importante para extender la implementación de esta técnica, especialmente bajo dosel arbóreo. Es por eso que la investigación sobre los efectos de la quema prescrita es fundamental para un correcto manejo del fuego, con el fin de establecer los parámetros necesarios para diseñar, probar e implementar prescripciones más efectivas.

Sin embargo, dado que las estructuras forestales se conciben como sistemas complejos, auto-organizados, que responden de forma autónoma a factores internos y externos, la quema prescrita puede impactar en ellos causando consecuencias no previstas. Particularmente, en el caso de este estudio, se ha investigado la alteración en la biomasa de desfronde, el contenido de nutrientes de la biomasa y el crecimiento del árbol. Los resultados que se presentan abordan también el efecto de la época de tratamiento de quema prescrita (primavera & otoño) como consecuencia de las diferencias en la intensidad del fuego, las condiciones meteorológicas (HAMMAN et al., 2008), el estado fenológico y el almacenamiento de carbohidratos de los árboles durante las dos épocas (HARRINGTON, 1993; THIES et al., 2005; KNAPP et al., 2009). Convencionalmente, los daños en la copa del árbol producidos por un tratamiento selvícola se han medido usando variables como el volumen de copa chamuscada (MARTINSON & OMI, 2013) o la altura de copa chamuscada. Sin embargo, otras nuevas herramientas pueden ayudar a determinar el nivel de daño de la copa de manera más precisa, como el seguimiento de la biomasa de desfronde o la estimación del índice de área foliar (ESPINOSA et al., 2018) a partir de ortofotografías hemisféricas (MONTES et al., 2007; RODRÍGUEZ-GARCÍA et al., 2014). El desfronde no solo está implicado en los procesos de respiración del árbol, sino que es la principal fuente de retorno de nutrientes en los suelos, siendo crucial para la

potencial recuperación tras una perturbación (NÄTHER et al., 2018). De hecho, determinar la capacidad de las especies mediterráneas para adaptarse a niveles variables de suministro de nutrientes en el contexto del cambio global puede ser esencial para predecir su capacidad de supervivencia futura (SARDANS et al., 2005). Del mismo modo, la interrupción del crecimiento de los árboles puede ser una respuesta ecofisiológica a una perturbación como el fuego, y en algunos casos, predice la mortalidad de los árboles (BIGLER & BUGMANN, 2004). De ahí que la evaluación del efecto integral de la quema prescrita a la hora de formular planes y programas sea esencial para esclarecer las alteraciones en la dinámica de los ecosistemas forestales.

Aunque algunos autores han sugerido la importancia de conocer los efectos de los tratamientos selvícolas sobre el desfronde y los procesos de descomposición del mismo en diferentes especies forestales y bajo diferentes condiciones geoclimáticas (BLANCO et al., 2006; LADO-MONSERRAT et al., 2016), ningún estudio previo ha evaluado el efecto de la quema prescrita sobre la biomasa de desfronde, las fracciones de la misma o su contenido de nutrientes. Por lo tanto, los resultados que se presentan aquí constituyen una primera aproximación a la dinámica de desfronde posfuego. Hasta el momento, la bibliografía existente ha descrito el efecto del tratamiento de clara sobre el desfronde. En este sentido, se han observado efectos persistentes durante 1-3 años después del aclareo (p. ej., AGREN & KNECHT, 2001 o ROIG et al., 2005) e incluso alteraciones en el desfronde más allá de los 5 años (p.ej., NAVARRO et al., 2013). Estos resultados contrastados sugieren que la respuesta de la masa forestal está determinada por múltiples factores. Otro de los efectos del fuego prescrito se puede manifestar en alteraciones del crecimiento del árbol. En este contexto, aun sobreviviendo, los árboles pueden ver comprometida su funcionalidad fisiológica, mostrar crecimientos reducidos y ser más propensos a sucumbir a una muerte retardada (p. ej., NESMITH et al., 2015 o THOMPSON et al., 2017). Por el contrario, también pueden beneficiarse a corto y medio plazo de la reducción de la competencia (BATTIPAGLIA et al., 2016; VALOR, 2018). Sin embargo, son pocos los estudios que han modelizado las respuestas del crecimiento individual como resultado de la incidencia conjunta de las características del árbol y de la masa, incluyendo la intensidad del fuego (el tiempo de residencia por encima de temperaturas letales para el cambium) y variables de severidad (la altura de chamuscado o el desfronde) (VALOR et al., 2015; VALOR, 2018).

2. Objetivos

La hipótesis propuesta fue que la quema prescrita de baja intensidad, aplicada en masas mixtas de *Pinus nigra* y *Pinus pinaster* y puras de *Pinus nigra*, no tendrá efectos significativos en la dinámica de desfronde, el contenido de carbono y macronutrientes del mismo o en el crecimiento de *Pinus nigra* a corto plazo; sin embargo, sí se manifestarán diferencias en el desfronde y el crecimiento relacionadas con la estación (primavera & otoño) y con los dos tipos de masas estudiadas (mixta & pura). Con el fin de corroborar esta hipótesis, se definieron los siguientes objetivos:

- Analizar el efecto de la quema prescrita (primavera & otoño) en la cantidad, patrones, fracciones y contenido de carbono y macronutrientes del desfronde en los dos tipos de masa (mixta & pura)
- Evaluar las alteraciones del índice de área foliar tras el tratamiento de quema prescrita.
- Determinar el efecto del tratamiento (primavera & otoño) en el crecimiento a corto plazo de *Pinus nigra*.
- Explorar el efecto de la severidad del fuego durante la quema a nivel de árbol y rodal.

Además, dado que el desfronde ha sido definido como un indicador sensible al cambio climático, los resultados mostrados en este documento constituyen una fuente de datos valiosa a este respecto.

3. Metodología

3.1. Zona de estudio

Se eligieron dos localizaciones en la serranía de Cuenca (sistema Ibérico), El Pozuelo y Beteta. La pendiente de ambas zonas variaba entre el 3 y 10% y la altitud entre 1015 y 1294 m sobre el nivel del mar. De acuerdo con los datos facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2018) para la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio (estación de Cañizares; 940 m), la temperatura media anual de los últimos 21 años fue de 12.18 °C (13.28 °C durante el período de 2016 a 2018), con una precipitación media de 717 mm (599 mm en el período de 2016 a 2018). El tipo de suelo es eminentemente calcáreo (LUCAS-BORJA et al., 2017; PLAZA-ÁLVAREZ et al., 2017). La cobertura arbustiva en ambas zonas oscila entre el 5 y el 20%. La regeneración del pino se distribuye irregularmente (de 78 a 11611 plántulas ha⁻¹). Las principales características de la zona de estudio aparecen detalladas en Espinosa et al., 2018 y 2020a.

3.2. Diseño experimental

Los datos fueron recolectados en 18 parcelas (30 m × 30 m), siguiendo un diseño por bloques. Se establecieron tres tratamientos por cada localización (parcelas quemadas en primavera, parcelas quemadas en otoño y parcelas no quemadas) con un sistema de triple réplica (n=9 en El Pozuelo y n=9 en Beteta). Las parcelas eran representativas del área de estudio y homogéneas en cuanto a estructura y composición de la masa. Para evitar el efecto de borde, se estableció una franja de 20 m a lo largo de la delimitación de la parcela. Se identificaron todos los árboles de cada parcela y se llevaron a cabo las siguientes mediciones: altura total, altura de la primera rama viva, diámetro a las alturas de 0.6 y 1.3 m desde la base y espesor de corteza máximo y mínimo a 0.6 m de la base (sotavento y barlovento).

3.3. Desarrollo de la quema prescrita

Las quemas de primavera fueron realizadas en mayo de 2016 (el mismo día en cada sitio) mientras que las quemas de otoño se llevaron a cabo en noviembre de 2016 (el mismo día en cada sitio). Se utilizó un patrón de ignición por franjas (separadas 1-2 m), ladera abajo y con viento a favor. Esta técnica es la más utilizada en el área de estudio para conseguir un comportamiento del fuego de baja-media intensidad. Durante el desarrollo de las quemas prescritas se instaló una estación meteorológica que midió la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa cada 10 minutos (Tabla 1). También se instalaron termopares (tipo K de 1 mm de diámetro, con un tiempo de respuesta de 0.3 segundos) en 15 árboles seleccionados por parcela, con el fin de monitorizar las temperaturas alcanzadas en la corteza exterior e interior (cambium) a 0.6 m de la base. Los termopares estaban conectados a *dataloggers* que registraron los datos con una frecuencia de 1 segundo. El umbral de 60 °C en el área del cambium corresponde a la temperatura letal generalmente aceptada para las células cambiales (HARE, 1965). Al finalizar las quemas se tomaron datos de la altura de chamuscado a sotavento y barlovento.

Tabla 1. Características de la quema prescrita. Media y desviación típica entre paréntesis. (Espinosa et al., 2020b).

Zona	PT	T	RH	WS	RS	FLI ^a	FH	FL
—	—	°C	%	m s ⁻¹	m min ⁻¹	kW m ⁻¹	cm	cm
El Pozuelo	Quemado en primavera	21.5 (1.2)	47.7 (5.3)	0.8 (0.6)	0.65 (0.21)	20.0 (8.8)	53 (15)	30 (6)
El Pozuelo	Quemado en otoño	11.9 (0.4)	67.0 (1.3)	0.3 (0.3)	0.59 (0.31)	11.2 (6.6)	17 (10)	23 (6)
Beteta	Quemado en primavera	20.4 (1.5)	32.7 (2.3)	0.8 (0.1)	0.76 (0.24)	32.6 (13.3)	43 (8)	38 (8)
Beteta	Quemado en otoño	12.0 (0.9)	43.5 (0.8)	0.1 (0.1)	0.72 (0.22)	13.8 (10.7)	26 (13)	25 (9)

T: temperatura del aire; RH: humedad relativa; WS: velocidad del viento; RS: velocidad de propagación; FLI: intensidad lineal del fuego; FH: altura de la llama; FL: longitud de la llama.

3.4. Recolección de desfronde

Se instalaron un total de 8 colectores (0.38 m²) por parcela, una vez realizadas las quemas prescritas. Los colectores cubrieron toda el área de muestreo de la parcela (30 m × 30 m). El sistema de recolección se diseñó de acuerdo con las recomendaciones y parámetros descritos en el manual de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE) en el marco del proyecto titulado "Programa de cooperación internacional para la evaluación y el seguimiento del efecto de la contaminación del aire en los bosques" (ICP Forests 2011) (UKONMAANAHO et al., 2016) para garantizar la calidad y cantidad de las muestras (ver más detalles en ESPINOSA et al., 2018, 2020a). La recolección de las muestras se llevó a cabo con una periodicidad mensual. Una vez recolectadas las muestras se llevaron al laboratorio y se secaron en un horno a 65°C hasta alcanzar peso constante. Las muestras de cada parcela se pesaron y se separaron en diferentes fracciones: acículas, conos, inflorescencias, ramas de diámetro inferior a 2 cm, corteza y fracción de miscelánea (semillas, líquenes y hojas de otras especies). El estudio se realizó entre mayo de 2016 y octubre 2018 en las parcelas quemadas en primavera y no quemadas; y desde noviembre de 2016 a octubre de 2018 en las parcelas quemadas en otoño (un total de 4032 muestras analizadas).

3.5. Análisis del contenido de carbono y macronutrientes

Las fracciones de acículas (*Pinus nigra* y *Pinus pinaster*), conos, inflorescencias, ramas de diámetro inferior a 2 cm y la corteza correspondiente al mismo período (primer período: mayo de 2016 a abril de 2017 para las parcelas quemadas en primavera y no quemadas; y segundo período: mayo de 2017 a abril de 2018 para las parcelas quemadas en primavera, quemadas en otoño y no quemadas) se combinaron con el fin de tener datos por fracción, período y parcela, de acuerdo a las recomendaciones del ICP Forests (UKONMAANAHO et al., 2016). Esta forma de obtener los datos permite la comparación con los resultados aportados por el ICP Forests en sus parcelas de nivel II para el periodo 2005–2014, en masas de *Pinus nigra* próximas al aérea de estudio. Se analizó el contenido de carbono (C) y nitrógeno (N) de las muestras; para ello se utilizó un analizador LECO. Las concentraciones de fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) (temperatura 658°C) fueron determinado por espectrometría de masas óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) después de la digestión húmeda con HNO₃ (8 ml, 69%) y H₂O₂ (2 ml) a 1908°C durante 15 min en un microondas.

3.6. Análisis de imágenes utilizando el dispositivo ForeStereo

Para el estudio temporal de la variación del índice de área foliar se utilizó el dispositivo denominado *ForeStereo*, modelo de utilidad MU2005, patentado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC) (RODRÍGUEZ-GARCÍA et al., 2014). Este sistema realiza imágenes estereoscópicas hemisféricas que se transforman en proyecciones 3D en las que se identifican los árboles existentes en cada parcela. Consta de dos sistemas ópticos paralelos, que capturan imágenes de tipo *ojo de pez*. El sistema permite, además, la medición de variables como el diámetro, la altura y la dimensión de la copa. Para cada parcela se tomaron imágenes en 5 puntos identificados por GPS. Las imágenes fueron tomadas inmediatamente antes de la quema (mayo de 2016) y un año después (abril de 2017), con el objetivo de evaluar el efecto del tratamiento de quema prescrita de primavera.

3.7. Análisis del crecimiento de los árboles

En noviembre de 2018 (30 meses después de la ejecución de la quema de primavera y 24 meses después de la de otoño), se extrajo un testigo de crecimiento de cada uno de los 15 árboles de

Pinus nigra seleccionados por parcela (los mismos árboles donde se instalaron los termopares) ($n=135$ en cada sitio de estudio). Los testigos se extrajeron de manera perpendicular a la pendiente del terreno, con una barrena de Pressler (5 mm de diámetro interior) (FRITTS, 1976). Todos los testigos se prepararon siguiendo técnicas dendrocronológicas estandarizadas (STOKES & SMILEY, 1968). Se pegaron sobre tablillas acanaladas y se lijaron hasta que los anillos de crecimiento eran claramente visibles. La anchura de los anillos se midió utilizando el dispositivo LintabTM con una precisión de 0.01 mm (Lintab TM, Rinntech, Heidelberg, Alemania) (RINN, 2003). Se utilizó el software COFECHA para verificar la datación cruzada y validar la calidad de la medición (HOLMES, 1983). La anchura de los anillos se convirtió en incremento anual de área basimétrica (BAI) usando la ecuación $BAI = \pi (r_t^2 - r_{t-1}^2)$, donde r es el radio del árbol y t es el año de formación del anillo. La medida del BAI se utilizó como una estimación de crecimiento de los árboles al ser menos dependiente de la edad, entre otras ventajas (BIONDI, 1999).

3.8. Análisis estadístico

Para llevar a cabo el análisis estadístico de desfronde, se seleccionó la cantidad total de desfronde (kg ha^{-1}) como variable respuesta (ESPINOSA et al., 2020a). Se eligió un modelo lineal mixto de medidas repetidas con dos factores inter-sujeto: sitio (con dos niveles: El Pozuelo y Beteta) y tratamiento (con tres niveles: quema de primavera, quema de otoño y no quemado) y sus interacciones. También se incluyó un factor intra-sujeto (30 y 26 niveles correspondientes al periodo temporal, 30 y 26 meses desde que se ejecutó la quema prescrita). Se utilizó una varianza autoregresiva de primer orden para el análisis de los errores en el modelo mixto. Con respecto al contenido de nutrientes, las variables respuesta fueron C, N, P, K, Ca y Mg. Las dos zonas de estudio, El Pozuelo y Beteta, fueron consideradas de manera independiente. Se utilizó un modelo lineal mixto con un factor inter-sujeto (con tres niveles correspondientes al tratamiento: quema en primavera, quema en otoño y no quema). Se determinaron dos factores intra-sujeto correspondientes a las fracciones (acículas, conos, inflorescencias, ramas de diámetro inferior a 2 cm y corteza) y a los periodos de estudio de los análisis químicos (primer período: mayo de 2016 a abril de 2017 para las parcelas quemadas en primavera y no quemadas; y segundo período: mayo de 2017 a abril de 2018 para las parcelas quemadas en primavera, quemadas en otoño y no quemadas). Se utilizó una matriz de varianza-covarianza de tipo no estructurado para el análisis de las fracciones y de simetría compuesta para el análisis de los periodos. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software SAS 9.4 (SAS 2013) y un análisis del test t por pares para la comparación de los tratamientos. Se escogió un nivel de significancia del 95% para detectar diferencias entre tratamientos. También se utilizó un enfoque Bayesiano (ESPINOSA et al., 2020b) para determinar el alcance de la influencia de tres grupos de variables (variables meteorológicas; variables relacionadas con el árbol y con la masa; y variables asociadas a la prescripción y el comportamiento del fuego) en el desfronde.

4. Resultados

Los resultados obtenidos en este trabajo se resumen y presentan a continuación en forma de Tablas y Figuras.

4.1. Evolución del desfronde total

El desfronde acumulado durante el período de estudio está dentro del rango de desfronde de las principales especies de coníferas mediterráneas (Figura 1) (ESPINOSA et al., 2018 y 2020a).

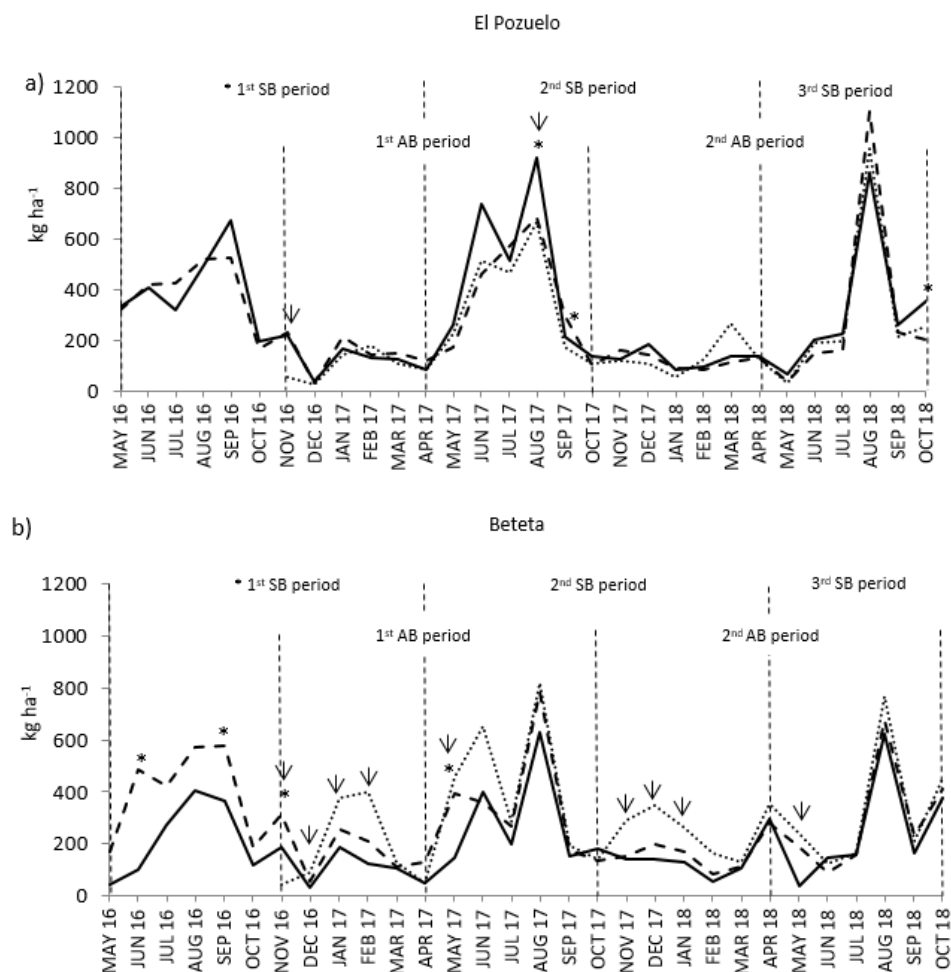


Figura 1. Evolución mensual de la cantidad de desfronde en (a) El Pozuelo y (b) Beteta. (Espinosa et al., 2020a).

4.2. Desfronde por tipo de tratamiento y fracción

Un año después del tratamiento de quema de primavera, la masa mixta presentó diferencias de un 3% entre parcelas quemadas en primavera y no quemadas; mientras que la diferencia entre estos mismos tratamientos en la masa pura fue de un 75% (ESPINOSA et al., 2018). Al final del estudio, (ESPINOSA et al., 2020a), incluso el desfronde fue más abundante en las parcelas no quemadas que en las parcelas quemadas en la masa mixta (probablemente porque el fuego aceleró el ciclo de caída de las acículas). Sin embargo, en la masa pura, aunque las diferencias disminuyeron con el tiempo, siguió existiendo una mayor cantidad de desfronde en las parcelas quemadas en primavera que en las no quemadas (17%) (Figura 1).

La fracción de acículas siguió una tendencia similar a la del total de la biomasa, lo que es razonable teniendo en cuenta que esta fracción comprende el 58% y 57% del peso total de biomasa en la masa mixta y pura respectivamente (Tabla 2 y 3).

En cuanto a la producción de conos, las cantidades recolectadas fluctuaron a lo largo de los años de estudio. En la masa pura, se recogieron más conos en las parcelas quemadas que en las parcelas no quemadas, mientras que en la masa mixta ocurrió lo contrario (ESPINOSA et al., 2018 y 2020a). También se observó una marcada estacionalidad en la fracción de inflorescencias, con fluctuaciones de los máximos entre mayo y agosto. Después de la quema de primavera, se recogió un

mayor número de inflorescencias en las parcelas sin quemar que en las quemadas en ambas masas (Tabla 2 y 3).

La fracción de ramas mostró una alta variabilidad interanual e intraanual en ambas masas (ESPINOSA et al., 2018 y 2020a) con muchos picos principalmente debido a eventos meteorológicos (p. ej., nevadas, tormentas, vientos racheados o condiciones severas de sequía) (Tabla 2 y 3).

También se observó cierta variabilidad interanual en la fracción de corteza, aunque no se aprecia ninguna tendencia clara (Tabla 2 y 3).

Tabla 2. Desfronde medio anual por tipo de tratamiento y fracción en El Pozuelo y Beteta. Media y desviación típica entre paréntesis. (Espinosa et al., 2020a).

Zona	Tratamiento	Acículas (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Conos (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Inflorescencias (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Ramas (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Corteza (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Miscelánea (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)
–	–						
El Pozuelo	No quemado	1947 (152)	657 (195)	179 (9)	211 (201)	73 (20)	350 (102)
El Pozuelo	Quemado en primavera	2077 (161)	347 (260)	98 (3)	207 (164)	115 (38)	360 (79)
El Pozuelo	Quemado en otoño	1480 (101)	351 (134)	177 (66)	266 (105)	95 (12)	339 (6)
Beteta	No quemado	1423 (52)	169 (120)	55 (15)	274 (172)	98 (33)	334 (184)
Beteta	Quemado en primavera	2066 (556)	483 (20)	37 (1)	304 (232)	142 (47)	470 (204)
Beteta	Quemado en otoño	1840 (20)	373 (354)	83 (29)	603 (30)	154 (20)	570 (217)

Tabla 3. Cantidad de desfronde mensual por tratamiento, para el total y las distintas fracciones (kg ha⁻¹ mes⁻¹) en El Pozuelo y Beteta. Media y desviación típica entre paréntesis. (Espinosa et al., 2020a).

Fracción	Zona	Tratamiento			–
–	–	No quemado	Quemado en primavera	Quemado en otoño	–
Total	El Pozuelo	291.02 ± 14.57 a	273.12 ± 14.57 a	224.39 ± 15.31 b	265.59 ± 8.56 A
	Beteta	206.17 ± 14.57 a	285.80 ± 14.57 b	300.40 ± 15.31 b	261.53 ± 8.56 A
Acículas	El Pozuelo	172.16 ± 17.84 a	182.57 ± 17.84 a	122.04 ± 15.92 a	161.56 ± 10.09 A
	Beteta	130.98 ± 17.84 ab	174.24 ± 17.84 a	151.64 ± 15.92 b	152.33 ± 10.09 A
Inflorescencias	El Pozuelo	19.47 ± 3.30 a	11.60 ± 3.30 a	14.75 ± 3.28 a	15.31 ± 1.91 A
	Beteta	6.36 ± 3.30 a	5.10 ± 3.30 a	6.94 ± 3.28 a	6.07 ± 1.91 B
Conos	El Pozuelo	47.63 ± 14.03 a	24.21 ± 14.03 a	29.24 ± 12.38 a	34.01 ± 7.92 A
	Beteta	11.83 ± 14.03 a	32.76 ± 14.03 a	31.19 ± 12.38 a	24.84 ± 7.92 A
Ramas	El Pozuelo	15.27 ± 5.27 a	16.67 ± 5.27 a	22.21 ± 6.57 a	17.75 ± 3.26 A
	Beteta	21.77 ± 5.27 a	24.05 ± 5.27 a	49.69 ± 6.57 b	30.56 ± 3.26 B
Corteza	El Pozuelo	6.21 ± 1.37 a	9.36 ± 1.37 a	7.94 ± 1.64 a	7.83 ± 0.84 A
	Beteta	8.47 ± 1.37 a	11.38 ± 1.37 a	12.20 ± 1.64 a	10.57 ± 0.84 B
Miscelánea	El Pozuelo	30.29 ± 6.66 a	28.72 ± 6.66 a	28.22 ± 8.16 a	29.14 ± 4.09 A
	Beteta	26.77 ± 6.66 a	38.29 ± 6.66 a	48.74 ± 8.16 a	37.16 ± 4.09 A

Las diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo al test *t*. Se hicieron comparaciones por pares para todas las combinaciones respecto a los tratamientos para cada fila y entre sitios en la columna final. Las diferencias significativas se indicaron en **negrita**.

4.3. Contenido de carbono y macronutrientes del desfronde por fracciones

Se detectó un aumento a corto plazo de K después de la quema de primavera en todas las fracciones en la masa mixta y en la fracción de acícula en la masa pura. El calcio fue el elemento más abundante, principalmente por el alto contenido de este nutriente en las acículas (Tabla 4).

Tabla 4. Contenido de carbono y macronutrientes en fracciones de biomasa de hojarasca para los tres tratamientos en El Pozuelo y Beteta. C, N, K, Ca, Mg (mg g^{-1}) y P (mg kg^{-1}). Media y desviación típica entre paréntesis. (Espinosa et al., 2020a).

		El Pozuelo			Beteta		
		No quemado	Quemado en primavera	Quemado en otoño	No quemado	Quemado en primavera	Quemado en otoño
C	NEN	513±1 a	515±1 ab	519±2 b	523±2 a	523±2 a	521±2 a
	NEP	504±2 a	507±2 a	505±3 a	--	--	--
	CON	491±2 a	493±2 a	485±4 a	487±2 a	493±2 a	493±2 a
	INF	494±2 a	493±2 a	497±3 a	497±2 a	499±2 a	504±2 a
	BRA	494±1 a	493±1 a	492±2 a	502±2 a	501±2 a	498±2 a
	BAR	485±2 a	486±2 a	482±2 a	488±2 a	490±2 a	488±2 a
N	NEN	4.0±0.2 a	4.6±0.2 b	4.4±0.2 ab	4.3±0.1 a	5.2±0.1 b	4.8±0.2 ab
	NEP	3.0±0.1 a	3.1±0.1 a	3.4±0.1 b	--	--	--
	CON	2.8±0.3 a	2.5±0.3 a	2.5±0.4 a	2.3±0.3 a	2.8±0.3 a	2.3±0.3 a
	INF	7.5±0.5 a	7.1±0.5 a	7.0±0.6 a	7.7±0.3 a	8.2±0.3 a	8.2±0.4 a
	BRA	4.1±0.3 a	3.8±0.3 a	4.2±0.5 a	4.3±0.3 a	4.3±0.3 a	3.8±0.4 a
	BAR	4.3±0.1 ab	4.1±0.1 b	4.6±0.1 a	4.4±0.1 a	4.4±0.1 a	4.5±0.1 a
P	NEN	175±17 a	248±17 b	260±20 b	317±31 ab	312±31 b	420±40 a
	NEP	141±30 ab	283±30 b	197±35 a	--	--	--
	CON	187±41 a	193±41 a	117±48 a	161±42 a	236±42 a	125±55 a
	INF	218±27 a	220±27 a	312±31 b	301±33 a	368±33 a	373±43 a
	BRA	143±39 a	168±39 a	181±46 a	241±42 a	190±41 a	129±54 a
	BAR	157±18 a	162±18 a	163±21 a	222±40 a	209±40 a	161±52 a
K	NEN	1.58±0.22 a	2.15±0.22 ab	2.53±0.27 b	1.80±0.10 a	1.75±0.10 a	1.86±0.14 a
	NEP	0.98±0.36 a	1.33±0.36 a	1.43±0.44 a	--	--	--
	CON	1.54±0.29 a	1.37±0.29 a	1.29±0.36 a	2.61±0.88 a	2.71±0.88 a	1.51±1.21 a
	INF	0.88±0.21 a	0.87±0.21 a	0.97±0.26 a	1.77±0.52 a	2.25±0.52 a	1.05±0.74 a
	BRA	0.59±0.18 a	1.12±0.18 a	0.53±0.23 a	2.40±0.69 a	2.11±0.69 a	0.42±0.98 a
	BAR	0.63±0.21 a	0.89±0.21 a	0.48±0.25 a	1.97±0.74 a	1.46±0.74 a	0.50±1.05 a
Ca	NEN	7.99±0.70 a	8.19±0.70 a	8.34±0.96 a	5.22±0.40 a	4.56±0.40 a	5.37±0.49 a
	NEP	8.95±0.32 a	8.14±0.32 a	8.38±0.44 a	--	--	--
	CON	1.78±0.93 a	5.23±0.93 b	0.54±1.28 a	1.62±0.85 a	1.76±0.85 a	0.43±1.02 a
	INF	4.95±0.39 a	4.87±0.39 a	1.00±0.54 b	2.12±0.65 a	1.76±0.65 a	1.68±0.78 a
	BRA	8.22±0.63 a	7.51±0.63 a	6.42±0.86 a	4.33±0.87 a	3.20±0.87 a	4.83±1.06 a
	BAR	8.12±0.66 a	8.50±0.66 a	7.77±0.91 a	6.05±0.46 a	5.89±0.46 a	6.52±0.56 a
Mg	NEN	0.93±0.17 a	1.08±0.17 a	0.84±0.28 a	1.41±0.19 ab	1.21±0.19 b	1.87±0.26 a
	NEP	1.25±0.12 a	1.35±0.12 a	1.67±0.19 a	--	--	--
	CON	0.61±0.12 a	0.55±0.12 a	0.36±0.18 a	0.58±0.09 a	0.58±0.09 a	0.50±0.12 a
	INF	0.74±0.20 a	0.78±0.20 a	0.59±0.30 a	0.69±0.08 a	0.75±0.08 a	0.75±0.10 a
	BRA	0.60±0.15 a	0.61±0.15 a	0.39±0.23 a	0.64±0.07 a	0.59±0.07 a	0.51±0.10 a
	BAR	0.48±0.13 a	0.76±0.13 a	0.34±0.20 a	0.58±0.05 a	0.58±0.05 a	0.47±0.10 a

NEN: acículas de *Pinus nigra*; NEP: acículas de *Pinus pinaster*; CON: conos; INF: inflorescencias; BRA: ramas; BAR: corteza. Las diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0.05$) con el test *t*. Se hicieron comparaciones por pares para todas las combinaciones respecto a los tratamientos para cada fila. Las diferencias significativas se indicaron en **negrita**.

4.4. Afectación de la quema prescrita al crecimiento del árbol

Tabla 5. Principales variables incluidas en el modelo estadístico para evaluar el impacto de la quema prescrita en el crecimiento de los árboles. Media y desviación típica entre paréntesis.

Zona	Tratamiento	H	Hc	DBH	SMx	t60	t300	L16	L17
--	--	m	%	cm	cm	s	s	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
El Pozuelo	No quemada	12.2 (5.0)	50.3 (16.2)	19.5 (10.3)	--	--	--	3171 (649)	3532 (585)
El Pozuelo	Quemada en primavera	11.9 (5.0)	48.0 (15.2)	18.1 (10.0)	54 (50)	31 (82)	10 (26)	3257 (599)	--
El Pozuelo	Quemada en otoño	12.2 (5.2)	50.1 (15.8)	19.4 (10.4)	46 (45)	16 (59)	6 (20)	--	2732 (325)
Beteta	No quemada	13.1 (4.9)	39.4 (14.4)	19.6 (10.1)	--	--	--	1989 (519)	2393 (739)
Beteta	Quemada en primavera	13.9 (4.4)	37.9 (15.1)	19.5 (9.4)	167 (201)	23 (93)	44 (167)	3482 (129)	--
Beteta	Quemada en otoño	14.5 (5.3)	36.2 (12.5)	21.7 (11.3)	132 (169)	16 (81)	33 (149)	--	3629 (527)

H: altura del árbol; Hc: porcentaje de altura ocupado por la copa viva; DBH: diámetro normal; SMx: altura máxima de chamuscado; t60: tiempo durante el cual la temperatura en el área del cambium fue superior a 60 °C; t300: tiempo durante el cual la temperatura en la superficie de la corteza fue superior a 300 °C; L16: desfronde recolectado desde mayo de 2016 a abril de 2017; L17: desfronde recolectado desde noviembre de 2016 a octubre de 2017. Error estándar entre paréntesis.

Tabla 6. Resumen de los resultados estadísticos de los modelos que analizan el crecimiento (Espinosa et al., 2021).

Fixed effects	Model SB				Model AB				Model NB			
	Estimate	SE	t value	p value	Estimate	SE	t value	p value	Estimate	SE	t value	p value
Intercept	1.364 × 10 ¹	6.925 × 10 ⁻²	19.696	<0.001	1.297 × 10 ¹	9.274 × 10 ⁻²	13.988	0.0026	1.488 × 10 ¹	1.397 × 10 ⁻¹	10.653	0.0087
Hc	6.541 × 10 ⁻²	9.378 × 10 ⁻³	6.974	<0.001	5.233 × 10 ⁻²	1.221 × 10 ⁻²	4.285	<0.001	1.855 × 10 ⁻²	1.068 × 10 ⁻²	1.738	0.0824
DBH	6.448 × 10 ⁻¹	9.864 × 10 ⁻³	65.367	<0.001	6.619 × 10 ⁻¹	8.516 × 10 ⁻³	77.728	<0.001	5.093 × 10 ⁻¹	1.037 × 10 ⁻²	49.138	<0.001
SMx	-3.762 × 10 ⁻²	8.500 × 10 ⁻³	-4.426	<0.001	-2.291 × 10 ⁻¹	3.092 × 10 ⁻²	-7.411	<0.001	--	--	--	--
t60	-1.264 × 10 ⁻²	5.560 × 10 ⁻³	-2.273	0.0231	-1.790 × 10 ⁻¹	1.175 × 10 ⁻¹	-1.524	0.1277	--	--	--	--
t300	-2.796 × 10 ⁻²	6.159 × 10 ⁻³	-4.540	<0.001	-1.039 × 10 ⁻¹	7.387 × 10 ⁻²	-1.406	0.1598	--	--	--	--
Random effects	Model SB			Model AB			Model NB					
	Variance	SE	Pr (>Chisq)	Variance	SE	Pr (>Chisq)	Variance	SE	Pr (>Chisq)			
S	0.0000	0.0000	1.0000	0.0030	0.0554	0.8590	0.0287	0.1696	0.2553			
P	0.0177	0.1330	1.0000	0.0190	0.1379	1.0000	0.0013	0.0364	1.0000			
L	0.0105	0.1028	1.0000	0.0188	0.1373	1.0000	0.0287	0.1696	1.0000			

Model SB: modelo para las parcelas quemadas de primavera; Model AB: modelo para las parcelas quemadas de otoño; Model NB: Modelo para las parcelas no quemadas; Hc: porcentaje de altura ocupado por la copa viva; DBH: diámetro normal; SMx: altura máxima de quemado; t60: tiempo durante el cual la temperatura en el área del cambium fue superior a 60 °C; t300: tiempo durante el cual la temperatura en la superficie de la corteza fue superior a 300 °C; S: tipo de masa; P: tratamiento; L: desfronde acumulado durante el año siguiente al tratamiento de quema prescrita; SE: error estándar. Los valores que se muestran en **negrita** indican efectos significativos ($p < 0.05$). Fuente: ESPINOSA et al. 2021.

5. Discusión

Los resultados de este estudio confirmaron la hipótesis de partida: la quema prescrita de baja intensidad, tanto a nivel de árbol como de masa, causa escasos daños en masas mixtas y puras de *Pinus nigra* en el sistema Ibérico. Los gestores forestales pueden utilizar los resultados para mejorar la prescripción y evaluar la severidad y los impactos del fuego originados por la quema prescrita.

5.1. Efecto de dos estaciones de quema prescrita (primavera y otoño) en el desfronde y el contenido de nutrientes del mismo

El tratamiento de quema prescrita no alteró de manera significativa las cantidades de desfronde. Los patrones anuales de desfronde tampoco se vieron modificados, manteniendo el pico máximo los meses de verano (principalmente de julio a septiembre) (ESPINOSA et al., 2018 y 2020a). Los resultados obtenidos del análisis del índice de área foliar un año después del tratamiento de quema prescrita de primavera confirman el escaso impacto de la quema prescrita a nivel del rodal (ESPINOSA et al., 2018), aunque se requiere un monitoreo a más largo plazo e incluso incluir el análisis del LAI de la quema prescrita de otoño para confirmar este dato. Además, los tratamientos tuvieron un escaso impacto en los contenidos de carbono y macronutrientes del desfronde (ESPINOSA et al., 2020a).

5.2. La influencia en el desfronde de la composición de la masa, la estación y la longevidad del tratamiento de quema prescrita

ESPINOSA et al. (2020a) no registraron diferencias significativas en la cantidad total de biomasa de desfronde recolectada en los dos tipos de masa (lo que puede deberse a que los dos tratamientos se consideraron conjuntamente en el análisis estadístico). No obstante, el análisis bayesiano de los datos presentado en ESPINOSA et al. (2020b) sí mostró diferencias atribuidas a la composición de la masa, principalmente porque se realizó un análisis en profundidad de las variables involucradas en el proceso de desfronde. Por otro lado, después de las quemas prescritas de otoño, no se vieron efectos

del tratamiento en la masa mixta, sin embargo, sí hubo diferencias significativas en la masa pura, agudizadas en la estación de máximo desfronde (verano). En general, se espera un mayor nivel de resistencia y resiliencia y una mayor tasa de recuperación después de una perturbación en una masa mixta (p. ej., LOREAU et al., 2001; JACTEL et al., 2009; FELTON et al., 2010).

Junto con el tipo de masa, el análisis bayesiano de los datos reveló una influencia en el desfronde de la estación de quema, primavera y otoño (ESPINOSA et al., 2020b). El efecto de la quema prescrita de primavera fue más marcado que el de la quema de otoño, al menos durante el primer año (ESPINOSA et al., 2018) y particularmente lo fue en la masa pura. En este sentido, la quema de primavera precede la estación de máximo desfronde, coincidiendo con la época de estrés hídrico de los árboles en la cuenca mediterránea (ESPINOSA et al., 2020b). Sin embargo, la tasa de recuperación fue más lenta después de la quema de otoño, aunque es necesaria más información acerca de los efectos de la perturbación en el suelo para poder contrastar estos datos. Además de lo expuesto, se observó un efecto retrasado de la perturbación en la masa pura después de la quema de otoño, con diferencias significativas entre los meses de noviembre a enero. Este efecto retardado también fue apuntado por BLANCO et al. (2006) y probablemente esté relacionado con el impacto posterior a la quema de eventos meteorológicos, particularmente nevadas y tormentas (ESPINOSA et al., 2020b). De hecho, la quema prescrita debe planificarse cuidadosamente teniendo en cuenta variables meteorológicas, como la temperatura media máxima y condiciones de sequía severa (ESPINOSA et al., 2020b). Además, determinados eventos meteorológicos específicos (nevadas y tormentas durante el invierno-otoño) pueden aumentar las cantidades de desfronde.

El impacto inmediato y la posterior recuperación de la carga y estructura de combustible se consideran críticos para evaluar la efectividad del tratamiento de quema prescrita. En este sentido, las quemas prescritas realizadas en este estudio tuvieron un efecto inmediato (3-4 meses después) (ESPINOSA et al., 2018), que disminuyó con el tiempo (30-24 meses) (ESPINOSA et al., 2020a). Si el efecto de la quema prescrita es severo e inmediato, puede causar un aumento en la biomasa de desfronde, lo que conduce a un mayor riesgo de incendio y una eficacia del tratamiento de quema de corta duración. Evaluar el equilibrio entre el consumo de combustible durante la quema y el desfronde después de la misma puede ayudar a los gestores forestales a mejorar las prescripciones, con el objetivo de reducir la acumulación de combustible y aumentar la permanencia en el tiempo del tratamiento (tiempo requerido para la recuperación de la carga de combustible del estado previo a la quema).

5.3. Influencia de la quema prescrita de baja intensidad en las distintas fracciones de desfronde

La quema prescrita tuvo un efecto limitado en la fracción de acículas.

Para determinar el alcance del efecto del tratamiento en las fracciones de conos e inflorescencias se requiere un estudio a largo plazo. En el caso de que la fructificación sea similar en parcelas quemadas y no quemadas, las inflorescencias no serían buenos indicadores de la fructificación potencial; probablemente porque la quema prescrita no afecta a las flores femeninas que se encuentran en las partes más apicales de los árboles. Sin embargo, un mayor número de conos en las parcelas sin quemar podría ser un signo de afectación de la quema prescrita a la regeneración de las masas de *Pinus nigra*. Si bien es difícil determinar el alcance de los efectos del fuego en las fracciones de conos e inflorescencias, dadas las características particulares de fructificación de esta especie, así como otros factores externos que pueden influir en ella (DEL CERRO BARJA et al., 2009). En cualquier caso, estos hallazgos son de vital importancia para los gestores forestales, que podrían planificar las quemas prescritas en años sin vecería o sin reclutamiento inicial de plántulas para asegurar la fructificación periódica y la regeneración natural, contribuyendo así a la persistencia de los bosques de *Pinus nigra*.

La quema prescrita de otoño aumentaría el número de ramas caídas como resultado de una combinación del daño térmico y días de nieve o tormenta (ESPINOSA et al., 2020b). Sin embargo, las quemaduras prescritas de baja intensidad de este estudio, junto con la considerable altura de la primera rama viva de las masas estudiadas no permitieron contrastar esta afirmación.

Al igual que con las ramas, los eventos meteorológicos pueden influir en la caída de la corteza. Aunque no es significativo, la cantidad de corteza recolectada el primer año fue mayor en las parcelas quemadas en ambas masas, lo que podría sugerir un efecto de la altura de chamuscado del tronco en esta fracción. Las diferencias significativas en esta fracción entre zonas pueden deberse a las características particulares de la corteza de *Pinus pinaster*, que siendo laminada, se puede desprender fácilmente durante la combustión (FERNANDES & RIGOLOT, 2007). Sin embargo, este hecho no se puede confirmar dada la irregularidad en los patrones de la fracción de corteza.

Se observaron varios picos en la fracción de miscelánea. Algunos picos invernales pueden atribuirse a las hojas de otras especies caducifolias, principalmente *Quercus* spp., aunque éstas son escasas en la zona de estudio. Los picos de febrero y mayo-julio pueden corresponder a la caída de semillas. Otros picos pueden estar asociados a fuertes lluvias y tormentas (NAVARRO et al., 2013).

5.4. Cambios en la concentración de nutrientes en el desfronde tras el tratamiento de quema prescrita

Las diferencias entre las masas en cuanto a las concentraciones de carbono (C) y macronutrientes (nitrógeno, N; fósforo, P; potasio, K; calcio, Ca; y magnesio, Mg) en el desfronde reflejaron las características particulares de cada uno de los sitios de estudio. Los tratamientos de quema tuvieron escaso efecto en la concentración de C en las diferentes fracciones en ambos tipos de masa. Se registró un ligero aumento de N, P y K, siendo estos nutrientes críticos para la recuperación del arbolado.

Los valores de N en el desfronde están dentro del rango de valores de la acícula madura (ICP Forests). Se detectó un aumento en todas las fracciones, al menos a corto plazo, en las concentraciones de P (particularmente en la masa mixta). No obstante, el calcio es un elemento abundante en los suelos de la zona de estudio por lo que no era esperable que fuese un elemento limitante. El contenido de magnesio no mostró una tendencia clara, con reducciones en algunas fracciones probablemente debido a la competencia con otros cationes.

5.5. Respuesta a corto plazo del crecimiento del árbol

Los resultados mostraron que, a corto plazo, la quema prescrita apenas afectó el crecimiento de los árboles, aunque se observó una ligera reducción en términos generales. La reducción de crecimiento se ha descrito como una tendencia a corto plazo (1-3 años), regresando las tasas de crecimiento a los niveles pre-quema a partir de entonces (SEIFERT et al., 2017). Por lo tanto, pueden ser necesario un estudio a más largo plazo para establecer la tasa de recuperación de las masas.

5.6. Influencia de las características del árbol sobre su crecimiento

Las variables del árbol incluidas en el análisis estadístico (porcentaje de altura de copa viva y diámetro a la altura normal) resultaron ser factores significativos en todos los modelos testados (ESPINOSA et al., 2021). Por lo tanto, independientemente del tipo de masa (mixta o pura), las características particulares de cada árbol pueden explicar más variabilidad en el crecimiento tras el tratamiento de quema. Esto puede explicarse en parte por el bajo porcentaje de *Pinus pinaster* en la

masa mixta (con un porcentaje promedio del 11%) y las propias características de la quema (baja intensidad).

5.7. Influencia de las características de la masa sobre el crecimiento del árbol

La diferente composición de la masa no explicó la variabilidad en el crecimiento de los árboles después del tratamiento de quema prescrita. A este respecto, se reconoce en términos generales que las masas mixtas son más estables que las masas puras (p. ej., FELTON et al., 2010); esto a pesar de que se detectaron escasos efectos en las masas mixtas después de la quema prescrita en relación con el desfronde (ESPINOSA et al., 2020b) y las propiedades del suelo (PLAZA-ÁLVAREZ et al., 2017) en las mismas parcelas experimentales. Sin embargo, los presentes hallazgos no permitieron confirmar este punto en relación con el crecimiento de los árboles.

5.8. Influencia de la estación de quema prescrita y las variables de severidad del fuego sobre el crecimiento del árbol

La estación de quema (primavera & otoño) influyó en el crecimiento de los árboles, como también se observó esta influencia en los estudios de desfronde (ESPINOSA et al., 2018 y 2020a). El tiempo durante el cual la temperatura estuvo por encima de 60 °C en el cambium (t60) y el tiempo durante el cual la temperatura estuvo por encima de 300 °C en la corteza (t300) tuvo efectos significativos en las quemaduras de primavera. Además, aunque la altura máxima de chamuscado fue significativa después de la quema de primavera y otoño, pareció tener un efecto mayor después del tratamiento de primavera. En general, algunos estudios han apuntado que las quemaduras de primavera pueden ser más perjudiciales para los árboles porque las reservas de carbohidratos están en sus niveles más bajos al comienzo del período de crecimiento anual (HOUGH, 1968; GARRISON, 1972). Además, la abundancia de raíces finas durante este período puede implicar un mayor nivel de daño (SWEZY & AGEE, 1991; HARRINGTON, 1993). Sin embargo, también los combustibles se han descrito como típicamente más secos al inicio de la temporada de la quema en otoño (SKINNER & CHANG, 1996), lo que puede implicar tasas de mortalidad más altas (THIES et al., 2005).

La altura máxima de chamuscado tuvo una influencia significativa en el crecimiento de los árboles después de la quema de primavera y otoño. En este sentido, una mayor altura de chamuscado puede implicar un mayor nivel de estrés en los árboles, particularmente en la zona del cambium. La altura de chamuscado es una variable fácilmente medible en el campo por lo que este dato podría contribuir a una mejora de las prescripciones. No obstante, la altura de chamuscado no fue una variable significativa respecto al desfronde en las mismas parcelas experimentales (Espinosa et al., 2020b), aunque esto probablemente se debió a que esta altura estuvo por debajo, de media, que la altura de primera rama viva.

El desfronde recolectado un año después del tratamiento de quema prescrita, no fue una variable que condicionara el crecimiento. Como ya se ha mencionado, la baja intensidad de la quema prescrita y la adaptación de *Pinus nigra* al fuego de superficie pueden amortiguar el efecto de la perturbación. En este contexto, la quema prescrita podría mejorar la eficiencia del árbol al eliminar las ramas inferiores improductivas (VILLARRUBIA & CHAMBERS, 1978) y las acículas menos eficientes, desde el punto de vista fotosintético, de la parte inferior de la copa (CERTINI, 2005; RETZLAFF et al., 2018). Por el contrario, la quema prescrita puede reducir el crecimiento de los árboles como consecuencia de la alteración de la copa (BUSSE et al., 2000), que representa el tejido fotosintéticamente activo del árbol además de una fuente de energía (p. ej., DE MICCO et al., 2013; POLJANŠEK et al., 2015).

6. Conclusiones

Las quemas prescritas de baja intensidad, tanto las ejecutadas en primavera como en otoño, tienen un efecto limitado a medio plazo (que disminuye progresivamente con el paso del tiempo) sobre la dinámica de desfronde (en términos de cantidad y contenido de nutrientes) en masa mixtas de *Pinus nigra* y *Pinus pinaster* y puras de *Pinus nigra*.

La variabilidad en el desfronde se ve afectada por la composición y características de la masa. Junto con el tipo de masa, la época en que se realiza la quema prescrita también influye en la dinámica de desfronde. El efecto de la quema prescrita de primavera fue más acentuado que el de la quema prescrita de otoño en la masa pura, al menos a corto plazo, aunque la tasa de recuperación fue más rápida después de la quema de primavera. La quema prescrita en primavera debe planificarse cuidadosamente, particularmente cuando las temperaturas máximas son altas y las condiciones de sequía severas. Además, se observa un efecto retardado de la perturbación en la masa pura después de la quema prescrita de otoño. También un impacto mayor posterior al fuego relacionado con eventos de nevadas y tormentas. De hecho, las variables meteorológicas resultaron ser más significativas que las asociadas a las características de la propia masa o que las características de la quema prescrita de baja intensidad.

Teniendo en cuenta que las acículas constituyen un importante sumidero de nutrientes, la quema prescrita no parece perturbar el retorno de nutrientes al suelo. La fracción de inflorescencias se redujo de manera significativa después de la quema prescrita de primavera en las dos masas, lo que sugiere que los órganos reproductores podrían verse afectados por el calor. Las fracciones de ramas, corteza y miscelánea se distribuyeron irregularmente a lo largo del año, principalmente afectadas por fenómenos meteorológicos. En particular, las nevadas y tormentas durante el otoño-invierno pueden causar picos en la fracción de ramas. Las diferencias significativas en la fracción de corteza entre las dos masas pueden deberse a las propias características de la corteza de *Pinus pinaster*.

Aunque hubo diferencias en la concentración de nutrientes entre las dos masas y entre fracciones, el contenido de nutrientes tuvo una tendencia similar en las parcelas tratadas y no tratadas con quema prescrita, lo que sugiere que el impacto del fuego en el ciclo de nutrientes es escaso. El contenido de nitrógeno de las acículas recolectadas en el desfronde se correspondía con valores propios de acículas maduras, por lo que no se esperan daños graves en la copa de los árboles; este dato también se confirmó a través del análisis del Índice de Área Foliar que se realizó durante el primer año de estudio. La quema prescrita también tuvo un efecto escaso sobre la concentración de carbono. En general, se detectó un ligero aumento de nitrógeno, fósforo y potasio, siendo estos nutrientes clave para la recuperación del árbol después de una perturbación.

A corto plazo, los resultados muestran que la quema prescrita de baja intensidad tiene un efecto escaso en el crecimiento. Las características propias del árbol demostraron ser más decisivas para el crecimiento que el tipo de masa. La estación en la que se ejecuta la quema prescrita influye en el crecimiento. La inclusión de variables de severidad post-quema por primera vez en modelos de crecimiento mostró que la altura máxima de chamuscado influye en el crecimiento del árbol. Se debe prestar especial atención a las variables relacionadas con la exposición a temperaturas críticas en la corteza y el cambium, particularmente después de la quema de primavera. El desfronde, un año después de la quema prescrita, no fue una variable significativa para el crecimiento.

Para concluir, y a la vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que la quema prescrita de baja intensidad (ejecutada en primavera y otoño) es una herramienta de manejo forestal potencialmente valiosa para reducir el riesgo de incendio, aumentando la resiliencia en masas mixtas y puras de *Pinus nigra* del sistema Ibérico.

7. Agradecimientos

Los estudios científicos en los que se basa este documento fueron cofinanciados por el INIA (FPI-SGIT 2015) y el Fondo Social Europeo a través de un contrato a Juncal Espinosa Prieto. Los estudios se enmarcaron dentro de los proyectos nacionales de I+D+i, GEPRIF (Reducción de la Severidad del Fuego Mediante Nuevas Herramientas y Tecnologías para la Gestión Integrada de la Protección contra los Incendios Forestales) y VIS4FIRE (Vulnerabilidad Integral de los Sistemas Forestales Frente a Incendios: Implicaciones en las Herramientas de Gestión Forestal) (RTA2014-00011-C06-01 y RTA2017-00042-C05-01 respectivamente). GEPRIF y VIS4FIRE fueron cofinanciados por la Unión Europea a través del programa de fondos FEDER. Dario Martin-Benito tuvo, además, la financiación de los siguientes proyectos: AGL2015-73190-JIN, RYC-2017-23389 y PID2019-110273RB-I00.

8. Bibliografía

AGEE, J.K., SKINNER, C.N., 2005. Basic principles of forest fuel reduction treatments. *Forest Ecology and Management*, 211(1-2), 83-96.

AGREN, G., KNECHT, M., 2001. Simulation of soil carbon and nutrient development under *Pinus sylvestris* and *Pinus contorta*. *Forest Ecology and Management*, 141(1-2), 117-129.

BATTIPAGLIA, G., SAVI, T., ASCOLI, D., CASTAGNERI, D., ESPOSITO, A., MAYR, S., NARDINI, A., 2016. Effects of prescribed burning on ecophysiological, anatomical and stem hydraulic properties in *Pinus pinea* L. *Tree physiology*, 36(8), 1019-1031.

BIGLER, C., BUGMANN, H., 2004. Predicting the time of tree death using dendrochronological data. *Ecological Applications*, 14, 902-914.

BIONDI, F., 1999. Comparing tree-ring chronologies and repeated timber inventories as forest monitoring tools. *Ecological Applications*, 9 (1), 216-227.

BLANCO, J., IMBERT, J., CASTILLO, F., 2006. Influence of site characteristics and thinning intensity on litterfall production in two *Pinus sylvestris* L. forests in the western Pyrenees. *Forest Ecology and Management*, 237(1-3), 342-352.

BUSSE, M.D., SIMON, S.A., RIEGEL, G.M., 2000. Tree-growth and understory responses to low-severity prescribed burning in thinned *Pinus ponderosa* forests of central Oregon. *Forest Science*, 46 (2), 258-268.

CASTELLNOU, M., GUIOMAR, N., REGO, F., FERNANDES, P.M., 2018. Fire growth patterns in the 2017 mega fire episode of October 15, central Portugal. *Advances in forest fire research*, 447-453.

CERTINI, G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143(1), 1-10.

CHAS-AMIL, M.L., TOUZA, J., GARCÍA-MARTÍNEZ, E., 2013. Forest fires in the wildland-urban interface: a spatial analysis of forest fragmentation and human impacts. *Applied Geography*, 43, 127-137.

DE MICCO, V., ZALLONI, E., BALZANO, A., BATTIPAGLIA, G., 2013. Fire influence on *Pinus halepensis*: wood responses close and far from the scars. *IAWA Journal*, 34(4), 446-458.

DEL CERRO BARJA, A., LUCAS-BORJA, M., GARCIA, E.M., SERRANO, F.L., ABELLÁN, M.A., MOROTE, F.G., LÓPEZ, R.N., 2009. Influence of stand density and soil treatment on the Spanish black pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*) regeneration in Spain. *Forest Systems*, 18, 167-180.

ESPINOSA, J., MADRIGAL, J., DE LA CRUZ, A.C., GUIJARRO, M., JIMÉNEZ, E., HERNANDO, C., 2018. Short-term effects of prescribed burning on litterfall biomass in mixed stands of *Pinus nigra* and *Pinus pinaster* and pure stands of *Pinus nigra* in the Cuenca Mountains (central-eastern Spain). *Science of the Total Environment*, 618, 941-951.

ESPINOSA, J., MADRIGAL, J., PANDO, V., DE LA CRUZ, A.C., GUIJARRO, M., HERNANDO, C., 2020a. The effect of low-intensity prescribed burns in two seasons litterfall biomass and nutrient content. *International Journal of Wildland Fire*, 29(11), 1029-1041.

ESPINOSA, J., RODRÍGUEZ DE RIVERA, Ó., MADRIGAL, J., GUIJARRO, M., HERNANDO, C., 2020b. Use of Bayesian modeling to determine the effects of meteorological conditions, prescribed burn season, and tree characteristics on litterfall of *Pinus nigra* and *Pinus pinaster* Stands. *Forests*, 11(9), 1006.

ESPINOSA, J., MARTIN-BENITO, D., RODRÍGUEZ DE RIVERA, Ó., HERNANDO, C., GUIJARRO, M., MADRIGAL, J., 2021. Tree Growth Response to Low-Intensity Prescribed Burning in *Pinus nigra* Stands: Effects of Burn Season and Fire Severity. *Applied Sciences*, 11(16), 7462.

FELTON, A., LINDBLADH, M., BRUNET, J., FRITZ, O., 2010. Replacing coniferous monocultures with mixed-species production stands: an assessment of the potential benefits for forest biodiversity in northern Europe. *Forest Ecology and Management*, 260, 939-947.

FERNANDES, P.M., BOTELHO, H., 2004. Analysis of the prescribed burning practice in the pine forest of northwestern Portugal. *Journal of Environmental Management*, 70(1), 15-26.

FERNANDES, P.M., RIGOLOT, E., 2007. The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management*, 241(1-3), 1-13.

FERNANDES, P.M., MATT DAVIES, G., ASCOLI, D., FERNANDEZ, C., MOREIRA, F., RIGOLOT, E., STOOF, C., VEGA, J.A., MOLINA, D., 2013. Prescribed burning in southern Europe: developing fire management in a dynamic landscape. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11, e4-e14.

FRITTS, H.C., 1976. *Tree rings and climate* London. Academic Press, London.

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

GARRISON, G.A., 1972. Carbohydrate reserves and response to use. General Technical Report GTR-INT-1, USDA Forest Service.

HAMMAN, S.T., BURKE, I.C., KNAPP, E.E., 2008. Soil nutrients and microbial activity after early- and late-season prescribed burns in a Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Forest Ecology and Management*, 256, 367-374.

HARE, R.C., 1965. The contribution of bark to fire resistance of southern trees. *Journal of Forestry*, 4, 248-251.

HARRINGTON, M.G., 1993. Predicting *Pinus ponderosa* mortality from dormant season and growing-season fire injury. *International Journal of Wildland Fire*, 3(2), 65-72.

HOLMES, R.L., 1983. Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. *Tree Ring Bull*, 43, 69-75.

HOUGH, W.A., 1968. Carbohydrate reserves of saw-palmetto: seasonal variation and effects of burning. *Forest Science*, 14, 399-405.

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P., PÖRTNER, H.O., ROBERTS, D., SKEA, J., SHUKLA, P.R., PIRANI, A., MOUFOUMA-OKIA, W., PÉAN, C., PIDCOCK, R., S. CONNORS, J.B.R. MATTHEWS, Y. CHEN, X. ZHOU, M.I. GOMIS, E. LONNOY, MAYCOCK, M. TIGNOR, & T. WATERFIELD (eds.)). World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

JACTEL, H., NICOLL, B.C., BRANCO, M., GONZÁLEZ-OLABARRÍA, J.R., GRODZKI, W., LÅNGSTRÖM, B., MOREIRA, F. et al., 2009. The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Annals of Forest Science*, 66(7), 701.

KNAPP, E.E., ESTES, B.L., SKINNER, C.N., 2009. Ecological effects of prescribed fire season: a literature review and synthesis for managers. USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station. General Technical Report PSW-GTR-224. (Redding, CA).

MARTINSON, E.J., OMI, P.N., 2013. Fuel treatments and fire severity: a meta-analysis. Res. Pap. RMRS-RP-103WWW. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 38, 103.

MONTES, F., PITA, P., RUBIO, A., CANELLAS, I., 2007. Leaf area index estimation in mountain even-aged *Pinus sylvestris* L. stands from hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145(3-4), 215-228.

MOREIRA, F., REGO, F.C., FERREIRA, P.G., 2001. Temporal (1958–1995) pattern of change in a cultural landscape of north-western Portugal: implications for fire occurrence. *Landscape Ecology*, 16, 557–567.

NÄTHE, K., LEVIA, D.F., TISCHER, A., POTTHAST, K., MICHALZIK, B., 2018. Spatiotemporal variation of aluminium and micro- and macronutrients in the soil solution of a coniferous forest after low-intensity prescribed surface fires. *International Journal of Wildland Fire*, 27, 471-489.

NAVARRO, F.B., ROMERO-FREIRE, A., DEL CASTILLO, T., FORONDA, A., JIMÉNEZ, M.N., RIPOLL, M.A., SÁNCHEZ-MIRANDA, A., HUNTSINGER, L., FERNÁNDEZ-ONDOÑO, E., 2013. Effects of thinning on litterfall were found after years in a *Pinus halepensis* afforestation area at tree and stand levels. *Forest Ecology and Management*, 289, 354-362.

NESMITH, J.C., DAS, A.J., O'HARA, K.L., VAN MANTGEM, P.J., 2015. The influence of prefire tree growth and crown condition on postfire mortality of sugar pine following prescribed fire in Sequoia National Park. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(7), 910-919.

LADO-MONSERRAT, L., LIDÓN, A., BAUTISTA, I., 2016. Erratum to: Litterfall, litter decomposition and associated nutrient fluxes in *Pinus halepensis*: influence of tree removal intensity in a Mediterranean forest. *European Journal of Forest Research*, 135(1), 203-214.

LOREAU, M., NAEEM, S., INCHAUSTI, P., BENGTSSON, J., GRIME, J. P., HECTOR, A., HOOPER, D.U, HUSTON, M.A., RAFFAELLI, D., SCHMID, B., TILMAN, D., WARDLE, D. A., 2001. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 294(5543), 804-808.

LUCAS-BORJA, M., CANDEL-PÉREZ, D., ONKELINX, T., FULE, P., MOYA, D., GÓMEZ, R., DE LAS HERAS, J., 2017. Early Mediterranean pine recruitment in burned and unburned *Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii* stands of central Spain: Influence of species identity, provenances and post-dispersal predation. *Forest Ecology and Management*, 390, 203-211.

RETZLAFF, M., KEANE, R., AFFLECK, D., HOOD, S., 2018. Growth response of whitebark pine (*Pinus albicaulis* Engelm) regeneration to thinning and prescribed burn treatments. *Forests*, 9(6), 311.

STOKES, M.A., SMILEY, T.L., 1968. *An Introduction to tree-ring Dating*. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA.

PAUSAS, J., KEELEY, J., 2009. A burning story: the role of fire in the history of life. *Bioscience*, 59 (7), 593–601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>.

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.

PLAZA-ÁLVAREZ, P.A., LUCAS-BORJA, M.E., SAGRA, J., MOYA, D., FONTÚRBEL, T., DE LAS HERAS, J., 2017. Soil respiration changes after prescribed fires in Spanish black pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*) monospecific and mixed forest stands. *Forests*, 8, 248.

POLJANŠEK, S., LEVANIČ, T., BALLIAN, D., JALKANEN, R., 2015. Tree growth and needle dynamics of *P. nigra* and *P. sylvestris* and their response to climate and fire disturbances. *Trees*, 29(3), 683-694.

REGOS, A., AQUILUÉ, N., RETANA, J., DE CACERES, M., BROTONS, L., 2014. Using unplanned fires to help suppressing future large fires in Mediterranean forests. *PLoS One*, 9(4).

RINN, F., 2003. TSAP-Win professional, Time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications. Version 0.3, Quick reference.

RODRÍGUEZ-GARCÍA, C., MONTES, F., RUIZ, F., CAÑELLAS, I., PITA, P., 2014. Stem mapping and estimating standing volume from stereoscopic hemispherical images. *European Journal of Forest Research*, 133(5), 895-904.

ROIG, S., DEL RÍO, M., CAÑELLAS, I., MONTERO, G., 2005. Litter fall in Mediterranean *Pinus pinaster* Ait. stands under different thinning regimes. *Forest Ecology and Management*, 206(1-3), 179-190.

SAN-MIGUEL-AYANZ, J., DURRANT, T., BOCA, R., MAIANTI, P., LIBERTA, G., ARTES VIVANCOS, T., JACOME FELIX OOM, D., BRANCO, A., DE RIGO, D., FERRARI, D., PFEIFFER, H., GRECCHI, R., NUIJTEN, D., LERAY, T., 2020. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2019. EUR 30402 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

SARDANS, J., PEÑUELAS, J., RODÀ, F., 2005. Changes in nutrient use efficiency, status and retranslocation in young post-fire regeneration *Pinus halepensis* in response to sudden N and P input, irrigation and removal of competing vegetation. *Trees*, 19(3), 233-250.

SAS (2013). "SAS/AF® 9.4 procedure guide, 2nd edn." (SAS: Cary, NC, USA).

SEIFERT, T., MEINCKEN, M., ODHIAMBO, B.O., 2017. The effect of surface fire on tree ring growth of *Pinus radiata* trees. *Annals of Forest Science*, 74(2), 34.

SHAKESBY, R.A., BENTO, C.P.M., FERREIRA, C.S.S., FERREIRA, A.J.D., STOOF, C.R., URBANEK, E., WALSH, R.P.D., 2015. Impacts of prescribed fire on soil loss and soil quality: an assessment based on an experimentally-burned catchment in central Portugal. *Catena*, 128, 278–293.

SKINNER, C.N., CHANG, C.R., 1996. Fire regimes, past and present. Technical report. University of California Davis, Centers for Water and Wildland Resources.

SWEZY, D.M., AGEE, J.K., 1991. Prescribed fire effects on fine-root and tree mortality in old-growth ponderosa pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 21, 626-634.

TEDIM, F., LEONE, V., AMRAOUI, M., BOUILLON, C., COUGHLAN, M.R., DELOGU, G.M. et al., 2018. Defining extreme wildfire events: difficulties, challenges, and impacts. *Fire*, 1(1), 9.

THIES, W.G., WESTLIND, D.J., LOEWEN, M., 2005. Season of prescribed burn in ponderosa pine forests in eastern Oregon: impact on pine mortality. *International Journal of Wildland Fire*, 14(3), 223-231.

THOMPSON, M.T., KOYAMA, A., KAVANAGH, K.L., 2017. Wildfire effects on physiological properties in conifers of central Idaho forests, USA. *Trees*, 31(2), 545-555.

UKONMAANAHO, L., PITMAN, R., BASTRUP-BIRK, A., BREDA, N., RAUTIO, P., 2016. Part XIII: Sampling and Analysis of Litterfall. In *Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests*; UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Ed.; Thünen Institute for Forests Ecosystems: Eberswalde, Germany, 15p.

VALOR, T., GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R., PIQUÉ, M., 2015. Assessing the impact of prescribed burning on the growth of European pines. *Forest Ecology and Management*. 343, 101-109.

VALOR, T., 2018. The effects of prescribed burning on the vigour of Mediterranean pine species. Universidad Autónoma de Barcelona. Tesis Doctoral (199 pp).

VILLARRUBIA, C.R., CHAMBERS, J.L., 1978. Fire: its effects on growth and survival of loblolly pine, *Pinus taeda* L. In *Proceedings of the Louisiana Academy of Sciences*.

WADE, D.D., 1989. A guide for prescribed fire in southern forests. US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Region.