

9CFE-1187



Evaluación del estado del sistema hidráulico de pino canario tras el gran incendio forestal de Tenerife en 2023.

Luis Díaz, V.C (1), González Rodríguez, A.M (1), Puértolas Simón, J (1), Mayr, S (2).

(1) Departamento de Botánica, Ecología y Fisiología Vegetal, Universidad de La Laguna, Tenerife.

(2) Departamento de Botánica, Universidad de Innsbruck

Resumen

El pino canario es uno de los pinos más resistentes al fuego dada su variedad de estrategias de persistencia tras incendios. El presente estudio muestra datos preliminares de la evaluación de efectos del fuego en el sistema hidráulico de *Pinus canariensis* tras 8 meses del gran incendio forestal de agosto de 2023 en Tenerife. Se realizaron medidas de tomografía de resistividad eléctrica en árboles de distintos diámetros y grados de vitalidad en zonas que sufrieron alta severidad de incendio y en una zona sin afección. La hipótesis de partida fue que árboles con mayor grosor de la corteza tendrían menores daños debidos al fuego. La mayoría de los árboles evaluados mostraron el patrón típico para coníferas, con resistividad mucho más alta en el centro y un anillo de baja resistividad en la periferia, correspondiente a la mayor humedad de la albura. Los árboles pequeños y con menor grosor de corteza mostraron una resistividad media más baja. Sorprendentemente, los pinos resultaron estar poco afectados, aun cuando el daño visual fue de un 100% (totalmente calcinados y sin presentar rebrotes), lo que sugiere que la corteza del pino canario parece aislar perfectamente el sistema hidráulico del calor. Es necesaria más investigación en zonas con distintos índices de severidad para extraer conclusiones generales para esta especie.

Palabras clave: Tomografía, *Pinus canariensis*, grosor de corteza, resiliencia, efecto del fuego.

1. Introducción

Los incendios forestales constituyen una de las perturbaciones más importantes en los ecosistemas mediterráneos, generando impactos profundos tanto a nivel de bosque, en su estructura y composición, como a nivel de planta.

En este contexto, el pino canario (*Pinus canariensis* Chr. Sm. ex DC), endémico de las Islas Canarias, representa un modelo único de adaptación al fuego gracias a una serie de rasgos funcionales distintivos (CLIMENT *et al.*, 2004; MANTGEM & SCHWARTZ, 2003). Entre ellos, el grosor de su corteza destaca como un factor clave en la protección frente a los efectos térmicos de los incendios, ya que posee una de las cortezas más gruesas dentro del género *Pinus*, alcanzando entre 3 y 5 cm en árboles adultos y hasta 18 cm en ejemplares monumentales (CLIMENT *et al.*, 2007). Además de este grosor, el pino canario presenta una alta capacidad de rebrote gracias a la existencia de yemas epicórmicas que le permite regenerarse tras incendios severos (CEBALLOS Y ORTUÑO 1951; CLIMENT *et al.*, 2004). Esta capacidad de rebrote, no muy común en gimnospermas (PAUSAS & KEELY, 2017), junto con la protección que proporciona la corteza, mejora significativamente las probabilidades de supervivencia de esta especie frente a perturbaciones recurrentes. Aunque la información cuantitativa sobre la capacidad del pino canario para resistir al fuego es muy escasa, distintos autores indican una supervivencia casi total al fuego (FERNANDES *et al.*, 2008).



Los daños por incendios forestales pueden afectar al sistema hidráulico ya sea por deformaciones de los tejidos xilemáticos, que pueden aumentar la vulnerabilidad a la formación de embolismos, o produciéndolos directamente (MICHALETZ *et al.*, 2012; BÄR *et al.*, 2019) incrementando la vulnerabilidad tanto a la sequía como a otros factores de estrés. La magnitud de estos daños depende de un complejo entramado de factores, como la intensidad del fuego, el tiempo de exposición y las propiedades termofísicas de las copas (VAN WAGNER, 1973; MICHALETZ & JOHNSON, 2006). Tradicionalmente, la resistencia del cambium al estrés térmico se ha venido estimando a partir del grosor de la corteza, siendo los árboles más pequeños con menores grosores de corteza los más sensibles (MANTGEM & SCHWARTZ, 2003). Sin embargo, el estudio de la anatomía del xilema se ha mostrado también como un buen indicador de la respuesta de la madera a fuegos intensos (DE MICCO *et al.*, 2013; BATTIPAGLIA *et al.*, 2014).

En este contexto, técnicas innovadoras como la tomografía de resistividad eléctrica (ETR) han demostrado ser herramientas útiles para evaluar de manera no invasiva el daño interno por estrés o decaimiento en árboles (DIVAKARA & CHAITHRA, 2022). La tomografía de resistividad eléctrica es una técnica mínimamente invasiva (DAYLI *et al.*, 2005) que permite estudiar el sistema hidráulico de árboles vivos a través de la conductancia eléctrica de la madera y ofrecer información detallada in situ (BÄR *et al.*, 2019), permitiendo identificar zonas dañadas y diferenciar incluso entre albura funcional y duramen (BIEKER & RUST, 2010; WANG *et al.*, 2016). La técnica ETR ha sido ampliamente utilizada para evaluaciones de daños por infecciones fúngicas o detección de descomposición de la madera en coníferas (LARSSON *et al.*, 2004; WUNDER *et al.*, 2013; HUMPLÍK *et al.*, 2016). Valores bajos de resistividad eléctrica (RE) pueden indicar altos contenidos de humedad en la madera, alta proporción de electrolitos o baja densidad de madera, siendo todos estos indicativos de decaimiento (GANTHALER *et al.*, 2019). Los patrones típicos de las tomografías de RE para coníferas sanas muestran dos anillos concéntricos con una zona periférica con RE más bajas y un anillo central, que varía de grosor según las especies, con valores RE más altos (BÄR *et al.*, 2019, GANTHALER *et al.*, 2019). En árboles dañados los patrones muestran zonas deformadas o sin anillo central (DIVAKARA & CHAITHRA, 2022).

Aunque su aplicación en árboles afectados por incendios aún es limitada, esta herramienta muestra un potencial prometedor para correlacionar el daño interno con variables externas, como el grosor de la corteza. Comprender mejor los efectos de los incendios y la resistencia al fuego en relación con la hidráulica de los árboles es fundamental para analizar las lesiones causadas por el fuego y la capacidad de supervivencia de los árboles tras un incendio, tanto en las condiciones actuales como en el contexto del cambio global.

En el presente estudio aplicamos la técnica de ETR a *P. canariensis* afectados por el Gran Incendio Forestal (GIF) de Tenerife en 2023, explorando su utilidad para evaluar los posibles daños internos y su relación con variables morfológicas de fácil medida.

Así, nuestras hipótesis de partida fueron: (i) los daños visuales en los pinos se reflejarán en valores medios de resistividad eléctrica más bajos; (ii) los patrones tomográficos de los árboles dañados serán más irregulares y dispersos en comparación con árboles no afectados; y (iii) árboles con cortezas más gruesas mostrarán menor daño interno, presentando resistividades más altas.

Este enfoque busca avanzar en el conocimiento sobre los efectos de los incendios



en la hidráulica arbórea y contribuir al desarrollo de estrategias de gestión forestal frente al aumento proyectado de incendios en un contexto de cambio climático. Los resultados podrían extrapolarse a otras especies mediterráneas, estableciendo una base científica para el uso de técnicas no destructivas en la evaluación post-incendio y en la planificación de medidas de conservación.

2. Objetivos

El objetivo del estudio fue determinar los posibles efectos del fuego a nivel del sistema hidráulico en ejemplares de *Pinus canariensis* afectados por el GIF de 2023 en Tenerife.

3. Metodología

En el GIF de Tenerife 2023 se quemaron un total de 8000 ha de pinar canario, quedando, dentro del perímetro del incendio, zonas afectadas con distinta severidad incluyendo zonas sin quemar (Fig. 1). Los pinos del estudio fueron seleccionados dentro de dos zonas de alta severidad (según datos del Cabildo): zona 1 (28°25'02.6"N 16°24'06.1"O) a 1401 m.s.m; zona 2 (28°25'31.5"N 16°23'13.7"O) a 1122 m.s.m y de una zona control sin quemar, zona 3 (28°25'33.5" N, 16°23'8.2" O) a 1124 m.s.m. Todas las zonas de muestreo se eligieron con la misma orientación S-SE, figura 1 (mapa de severidad elaborado por la unidad de análisis UOFF del Cabildo de Gran Canaria proporcionado por el Cabildo de Tenerife).

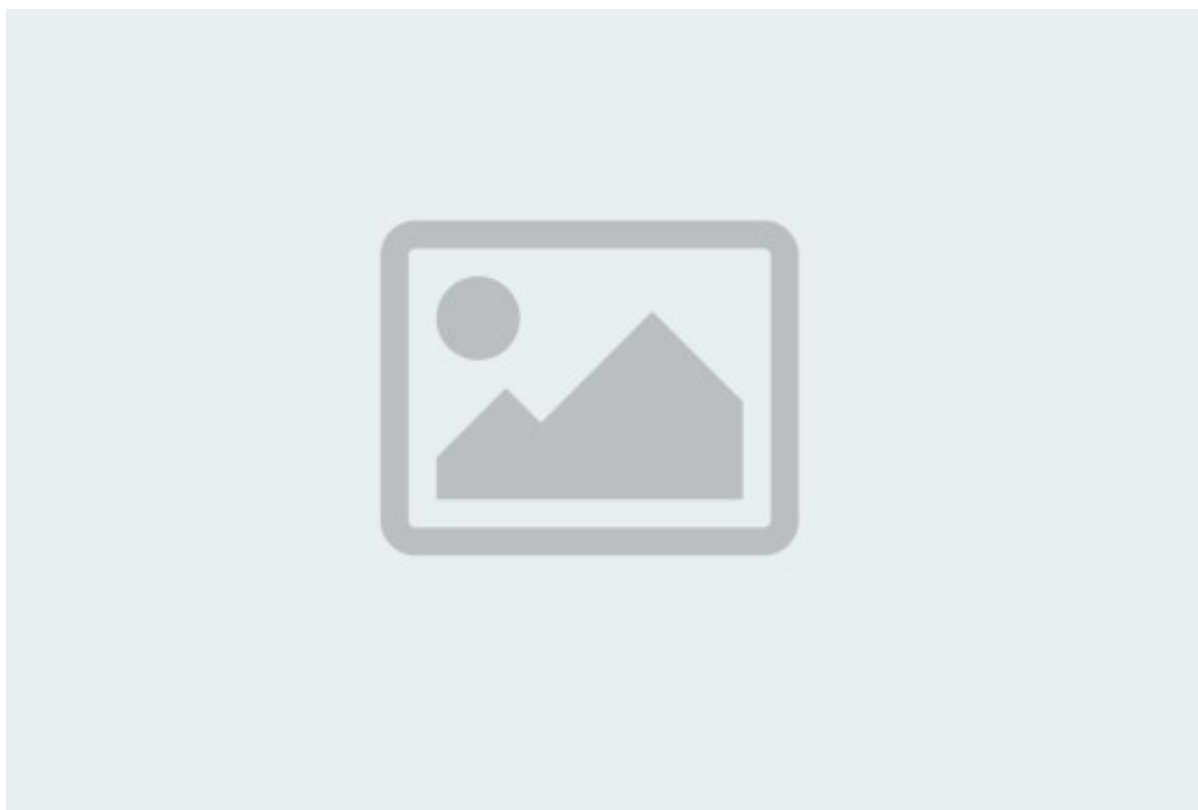


Figura 1. Localización de las zonas de estudio dentro del perímetro del GIF Tenerife. Los puntos 1 y 2 son zonas de alta severidad de fuego y el punto 3, la zona sin afección.



El clima de la zona es mesomediterráneo pluviestacional seco (RIVAS-MARTÍNEZ, 2011) con precipitaciones anuales de 400 mm de media.

Las medidas fueron realizadas en ejemplares adultos de pino canario (*Pinus canariensis* Chr Sm ex DC) en zonas de pinares de repoblación de más de 50 años. Se seleccionaron 18 árboles de distintos tamaños en función de su grosor (diámetro a la altura del pecho) y del grado de afectación visual por el fuego.

La altura de los árboles (m) se midió con un telémetro láser True Pulse 200B y el DBH con una cinta métrica. Para medir el grosor de la corteza, se eliminó una porción de esta siempre en orientación sur y se midió la profundidad con un calibrador de corteza.

Además, para cada árbol se midió la altura del daño (m), como la altura máxima a la que se observan estructuras quemadas (corteza o acículas) y un índice de vitalidad en una escala de valores enteros entre 0-10. Para la determinación de este índice se tuvo en cuenta el porcentaje de daño (% del pino que se observaba quemado), la presencia/ausencia de acículas en la copa, así como su estado y el rebrote. De esta forma un 0 de vitalidad indica ejemplares totalmente calcinados desde su base hasta el final de la copa, sin acículas ni rebrotes mientras que el 10 representa ejemplares sin ningún tipo de daños visuales por efecto del fuego.

Tomografía de resistividad eléctrica.

Las medidas de tomografía se realizaron en 18 pinos durante 3 días de medida consecutivos en el mes de marzo de 2024. La geometría del árbol y las posiciones de los puntos de medida (PM) se determinaron con un calibre electrónico (PiCUS Calliper Standard Version, Argus Electronic GmbH, Rostock, Alemania) tal y como se muestra en la Figura 2A. Los datos fueron procesados con el software PiCUS (PiCUS Q73, Argus Electronic GmbH).

Para realizar cada tomografía, se instalaron 24 PM a la altura del pecho (130 cm) alrededor de la circunferencia del árbol (Figura 2B). En cada PM se colocó un clavo insertado en el tronco en sentido antihorario, empezando (PM1), hasta establecer contacto con la albura. Todos los clavos se conectaron mediante electrodos a un sistema de resistividad de 24 canales (PiCUS: TreeTronic, Argus Electronic GmbH, Figura 1C) y se aplicaron voltajes eléctricos paso a paso a todos los PM aplicando voltajes de entre 3 y 5. Los datos sobre el campo eléctrico se enviaron al software de un ordenador portátil, con el que se calculó la distribución transversal de resistividad eléctrica (RE) para cada árbol y se generó la tomografía correspondiente.



Figura 2. A) Medidas de las posiciones de los puntos de medida (PM) con el calibre electrónico; B) Puntos de medida en pino dañado; C) Sistema PiCUS TreeTronic instalado en pino sin quemar.

La reconstrucción de la distribución espacial de las resistividades se basa en un esquema de inversión que utiliza una simulación de elementos finitos que opera con tetraedros dispuestos regularmente (GÜNTHER 2004; GÜNTHER *et al.*, 2006; RÜKER *et al.*, 2006). A continuación, el software incluye los datos de origen en un modelo 2D y proporciona una malla plana triangular en el nivel de medida. Cada triángulo está coloreado según su resistividad para una mejor visualización de los patrones, en una escala de color que varía de azul para las resistividades más bajas a verde aguamarina-amarillo-naranja-rojo hasta marrón oscuro para las más altas, y la información sobre el tamaño del triángulo, la posición y los valores RE puede exportarse para análisis posteriores. Como las áreas de los triángulos varían en función de su posición radial, la RE ponderada (RE_w; Ω m) se calculó para cada triángulo según la ecuación:

$$RE_w = (RE \cdot A) / A_{media}$$

Donde A (cm²) es el área de cada triángulo y A_{media} (cm²) es la media de todos los triángulos. La RE promedio de cada sección transversal completa se calculó entonces como la media de RE_w de todos los triángulos. La RE central y periférica se calcularon usando las medias de RE_w de los triángulos entre las distintas posiciones radiales desde 0-10% en el centro hasta 90-95% en la periferia. Estas áreas fueron definidas para tomar los valores representativos de las regiones de duramen y albura y excluir las variaciones de RE alrededor de los electrodos.

Análisis de datos

Para el análisis de datos se comprobó la distribución gaussiana de los datos (prueba de Shapiro-Wilk) y la homogeneidad de las varianzas (prueba de Levene). Se realizó un test de ANOVA multivariante para ver las diferencias de los

parámetros morfométricos y de resistividad eléctrica. Las diferencias entre grupos fueron analizadas con un test de Tukey. Todas las pruebas fueron realizadas con R versión 3.4.2 con diferencias significativas de $p < 0.05$.

4. Resultados

Para una mejor interpretación de los datos los árboles medidos se separaron en dos grupos en función de sus DBH, un grupo llamado “pinos pequeños” de DBH inferiores a 25 cm y otro “pinos grandes” con valores superiores.

La Tabla 1 muestra las medias y desviaciones de los datos morfológicos.

Tipo	Altura (m)	DBH (cm)	Grosor corteza (cm)	Corteza (%)
Grandes	$31.85 \pm 4,0$ a	$77.19 \pm 3,3$ a	$6.45 \pm 1,4$ a	$30.69 \pm 7,6$ a
28.33 $\pm$ 3,8 ab	76.34 $\pm$ 11,9 a	6.43 $\pm$ 1,4 a	30.84 $\pm$ 4,1 a	
Pequeños	$16.05 \pm 2,3$ c	$19.50 \pm 3,4$ b	$4.70 \pm 2,5$ a	$69.94 \pm 18,9$ b
21.69 $\pm$ 3,5 bc	22.28 $\pm$ 2,8 b	1.60 $\pm$ 0,4 b	26.58 $\pm$ 6,4 a	

Tabla 1. Medias y desviaciones estándar de los ejemplares medidos, en negrita los quemados. El dato de vitalidad sólo se muestra la media del índice. Letras diferentes indican diferencias significativas entre grupos (Test de Tukey).

Todas las variables morfológicas presentaron diferencias significativas entre pinos grandes y pequeños. Los pinos grandes presentaron alturas superiores a los 25 m y DBH superiores a 75 cm. El grosor de la corteza mostró diferencias significativas entre los pequeños quemados, mostrando estos valores inferiores a 2 cm, y el resto de pinos. El porcentaje del tronco ocupado por la corteza estuvo en torno a 30% para los pinos grandes sin mostrar diferencias entre los quemados y los no quemados y alrededor de 26% para los pequeños quemados, sin embargo, los pinos pequeños no quemados mostraron diferencias significativas con los demás alcanzando valores muy superiores, de casi un 70% del tronco ocupado por la corteza. Dentro de los pinos pequeños, aunque no se dieron diferencias significativas en altura y diámetro entre los pinos quemados y no quemados, el grosor de la corteza y, por tanto, el porcentaje de corteza en relación con el resto del tronco, fue significativamente superior para los ejemplares pequeños quemados. En el caso de la vitalidad, los pinos no quemados tenían una vitalidad de 10 ya que no estuvieron afectados por el fuego, mientras que los quemados presentaron un alto grado de daño, quemados hasta el final de la copa, sin acículas y muchos sin ni siquiera rebrotes, con una vitalidad media de entre 2 y 3 tanto para los grandes como para los pequeños (datos no mostrados).

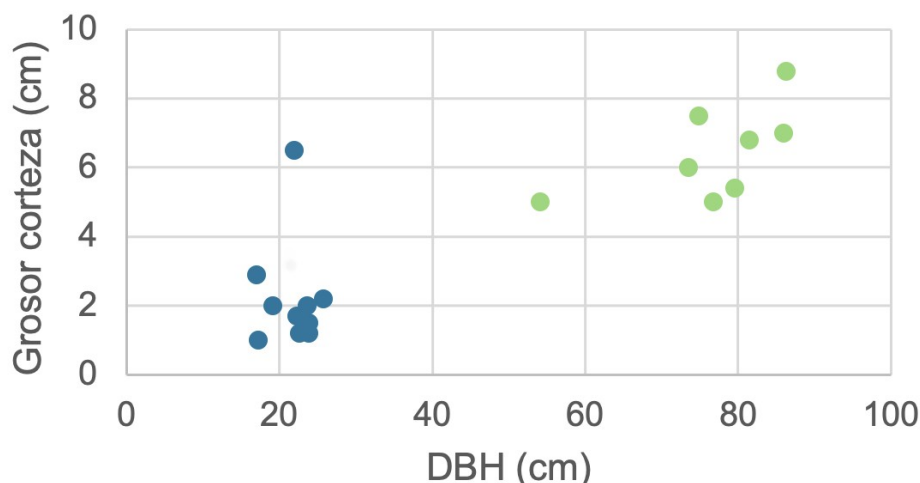


Figura 3. Relación entre el DBH (cm) y el grosor de la corteza (cm) en pinos pequeños (azul) y grandes (verde)

En la figura 3 se muestra la relación entre el DBH y el grosor de la corteza para los pinos medidos. Se observa claramente que se separan en dos grupos, los pequeños (en azul en la figura), con DBH menores de 25 cm y los grandes (verde) con DBH superiores a 50 cm. La regresión entre el DBH y el grosor de la corteza no fue significativa dado el bajo tamaño muestral y la diferencia de grosor entre los quemados pequeños y el resto de árboles.

Medidas de resistividad eléctrica

Las resistividades medias de las secciones transversales de los troncos variaron entre 800 y 2200 Ωm (figura 4A) mostrando los árboles grandes sin quemar los valores mayores y los pequeños quemados los valores más bajos, aunque sin llegar a presentar diferencias significativas, probablemente debido al bajo tamaño muestral. La resistividad central (figura 4B) mostró valores mayores que la resistividad periférica (figura 4C) tanto para árboles grandes como pequeños, mostrando el típico anillo de albura con resistividades mayores en el centro (duramen) que en el exterior (albura). En los árboles grandes no se observaron diferencias en los patrones transversales de resistividad, aunque en todos los pinos pequeños quemados se registraron resistividades más bajas.

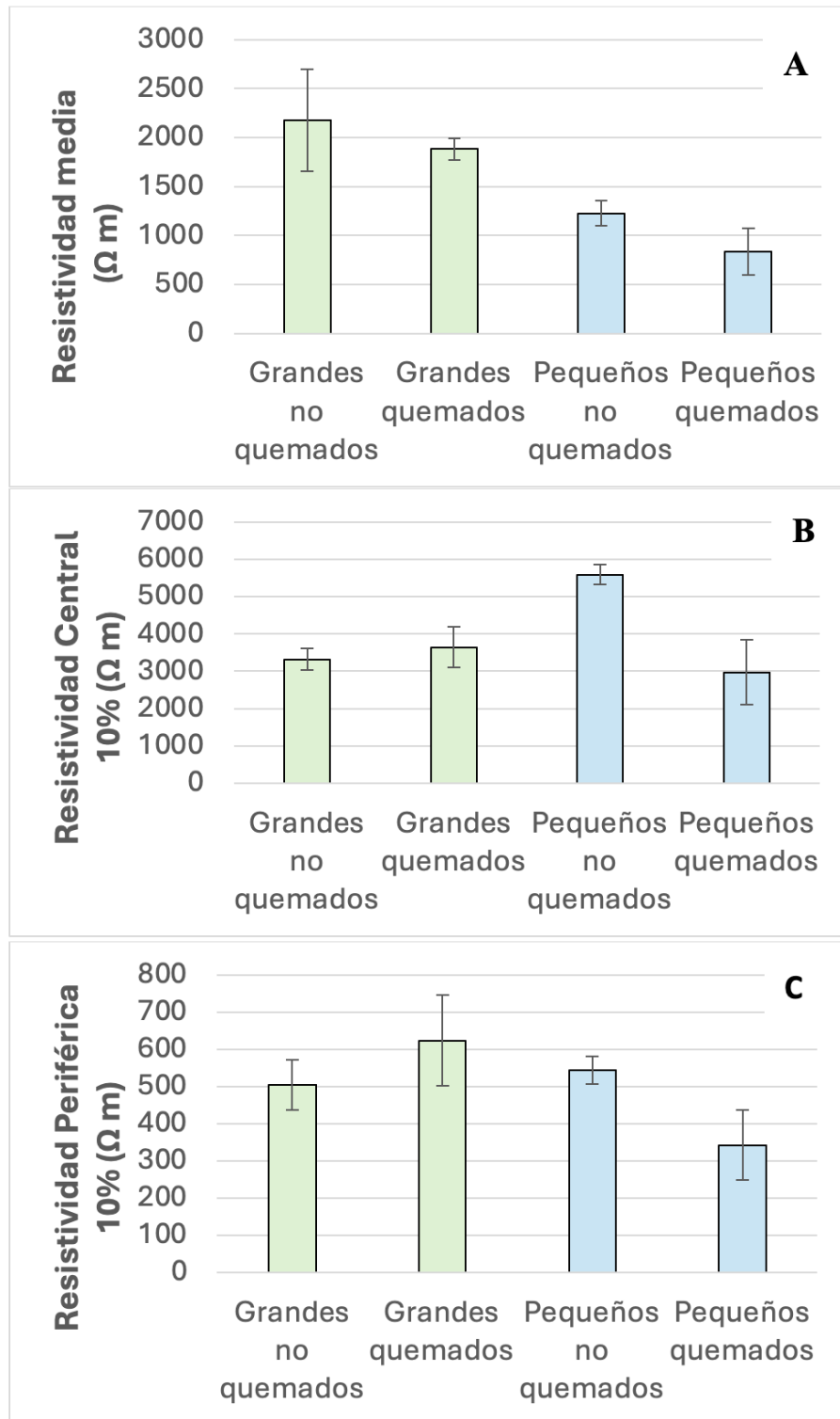


Figura 4. Resistividad eléctrica en árboles grandes (barras verdes) y árboles pequeños (barras azules). A) RE media, B) RE central y C) RE periférica en árboles quemados y no quemados.

En las figuras siguientes se muestran ejemplos de las tomografías de resistividad eléctrica de los pinos grandes (figura 5) y de pinos pequeños (figura 6) a una escala

de 200-4000 Ωm . En ambos casos se observó un patrón regular típico para coníferas con resistividades mucho más altas en el centro (zonas coloreadas en rojo) y un anillo de albura claramente visible en la periferia (zonas coloreadas en azul). Los pinos pequeños y con menor grosor de corteza mostraron en general una resistividad media más baja.

Cuando existen daños a nivel del sistema conductor, este patrón concéntrico desaparece mostrando deformaciones en el campo eléctrico que se traducen en manchas de colores con formas irregulares. De manera general, y al contrario de lo que esperábamos encontrar, los pinos resultaron estar poco afectados, aun cuando el daño visual fue de un 100% (totalmente calcinados, sin acículas y sin rebrotes).

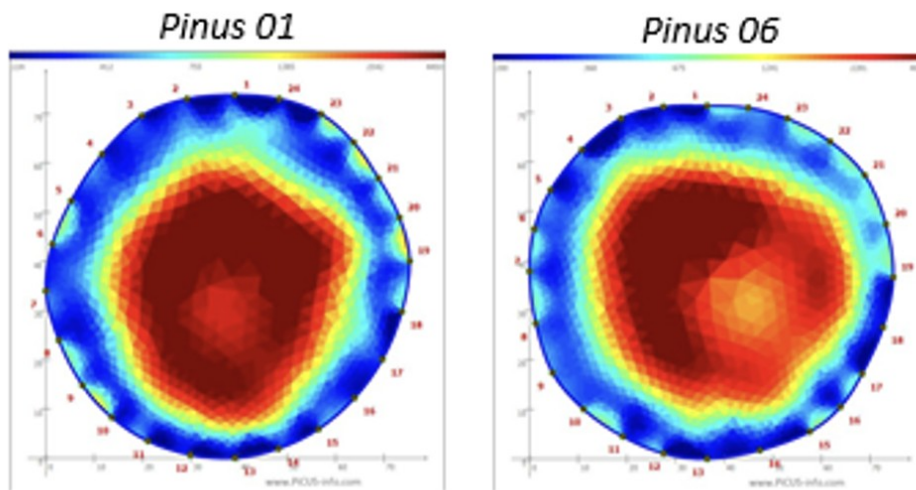


Figura 5. Tomografía de resistividad eléctrica en árboles grandes (escala 200 – 4000 Ωm). El pino 1 es un ejemplo de los no quemados y el 6 de los quemados.

En el caso de los pinos pequeños, y más concretamente en tres de ellos, los valores de resistividad fueron más bajos que los demás en la zona central, desapareciendo el típico patrón rojo en el centro con resistividades más altas, lo que indica que puede haber un daño del sistema hidráulico. En estos tres casos los grosores de corteza fueron inferiores a 1,5 cm.

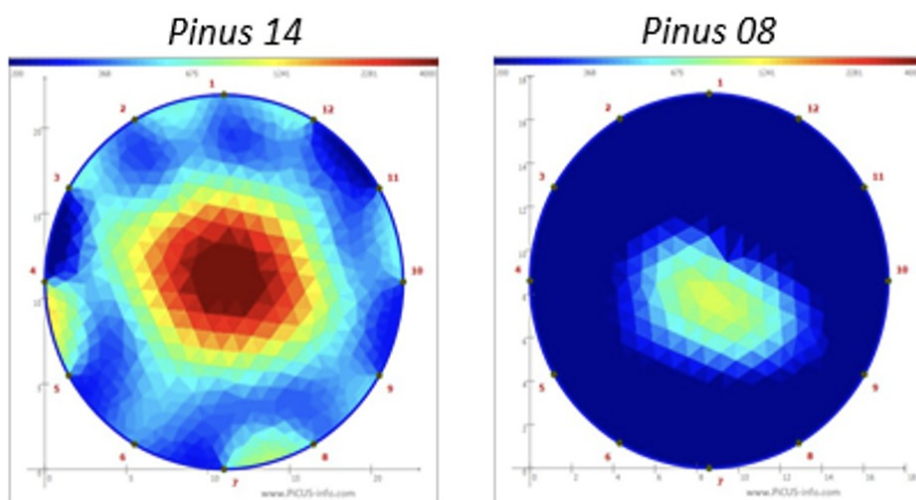


Figura 6. Ejemplos de tomografía de resistividad eléctrica en árboles pequeños (escala 200 – 4000 Ωm). El pino 14 es un árbol no quemado y el 8 uno quemado.

En la figura 7 se muestra la variación de la resistividad desde el centro del tronco (0%) hasta la zona más exterior (95%), observándose diferentes patrones entre pinos grandes y pequeños. En los pinos grandes la resistividad aumenta del centro hasta la mitad del tronco aproximadamente, sin mostrar diferencias significativas entre pinos quemados y no quemados, para luego descender desde mitad del tronco hasta el exterior. Sin embargo, en los pinos pequeños, la resistividad disminuye de manera continuada desde el centro hacia el exterior alcanzando más o menos las mismas resistividades que los pinos grandes en la zona de la albura, pero mostrando diferencias significativas entre pinos quemados y no quemados en la zona central del tronco.

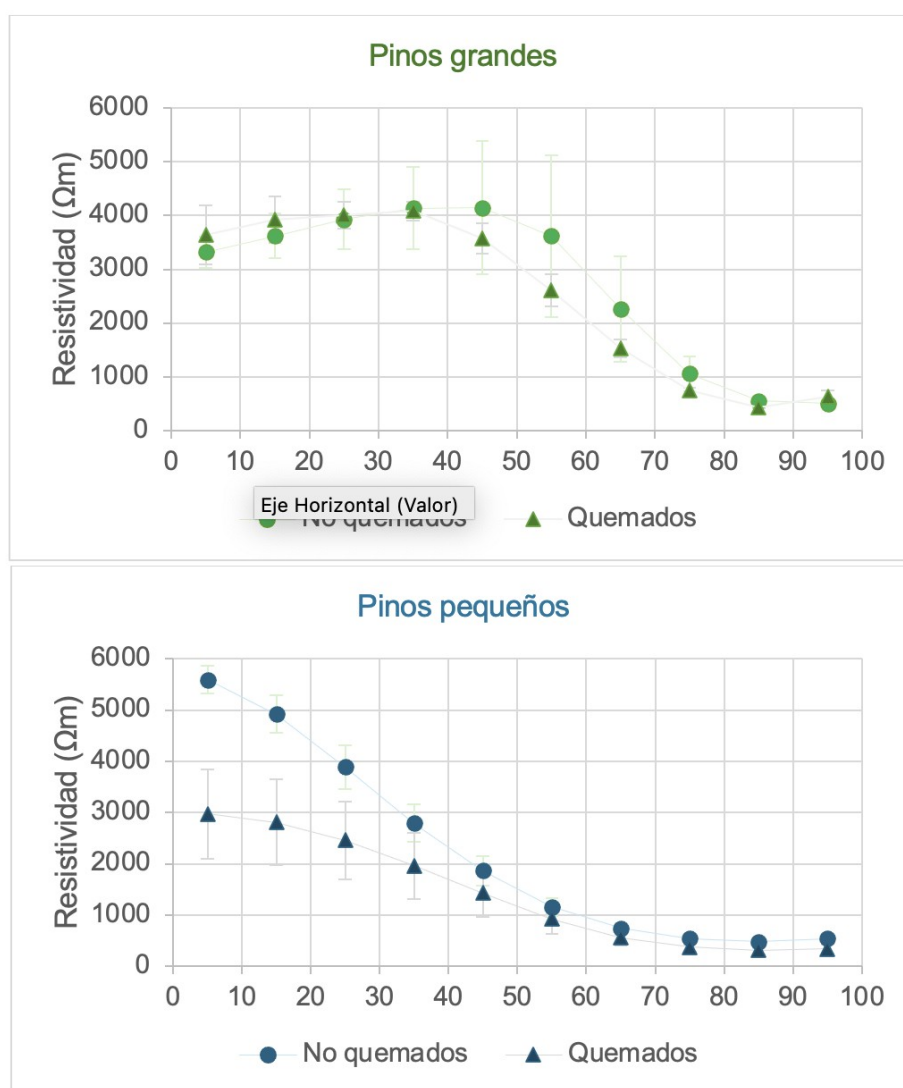


Figura 7. Cambios en la resistividad eléctrica desde el centro del tronco (0%) hasta el exterior (100%) para los pinos pequeños quemados y los no quemados.

5. Discusión

El pino canario es una especie bien adaptada, no sólo al fuego, sino a estreses como baja disponibilidad hídrica en el suelo y altos déficits de presión de vapor



(PETERS *et al.*, 2003; LUIS *et al.*, 2005), por lo que cabría esperar que el nivel de daño a nivel del sistema conductor no fuese muy alto. Los daños visuales observados en los pinos no se vieron reflejados en daños del sistema hidráulico, al menos en los pinos grandes, sin diferencias significativas entre árboles quemados y no quemados, y mostrando las tomografías patrones similares, con el patrón típico para coníferas y diferencias entre albura y duramen en la mayoría de los casos. Los troncos de los árboles analizados de *Pinus canariensis* resultaron sorprendentemente poco afectados por el efecto del fuego.

El espesor de la corteza en dicotiledóneas arbóreas es muy variable y se ha encontrado que el grado de aislamiento térmico por la corteza es proporcional a su espesor (PAUSAS, 2015). El pino canario es uno de los pinos que mayor grosor de corteza presenta (CLIMENT *et al.*, 2007), y los datos arrojados en nuestro estudio soportan que la corteza de pino canario parece aislar perfectamente los troncos del calor. Las diferencias encontradas en relación al grosor de la corteza en árboles pequeños quemados pueden deberse a la pérdida de fragmentos de corteza durante el fuego, estrategia esta que les permite disminuir la acumulación de calor en el tronco, lo que facilita la supervivencia tal y como ha sido observado en *Pinus pinea* por BATTIPAGLIA *et al.*, (2016).

Cada especie de árbol difiere en su ensamblaje estructural, concentración iónica y contenido de humedad que influye en el patrón de RE (DIVAKARA & CHAITHRA, 2022), por lo que es difícil sacar conclusiones de las tomografías de RE sin conocer los patrones específicos de cada especie (BÄR *et al.*, 2019). En general, los miembros de la familia pinácea presentan patrones de RE claramente estructurados con dos zonas diferenciadas (BIEKER & RUST, 2010; GUYOT *et al.*, 2013), los pinos de este estudio presentaron, casi en su totalidad dicho patrón sin presentar alteraciones significativas. En los árboles grandes no se observaron anomalías en los patrones de resistividad de sección transversal ni diferencias en los valores absolutos de resistividad entre pinos quemados y no quemados. Tampoco hubo indicios de daños en los árboles pequeños no quemados, sin embargo, las resistividades centrales en los árboles pequeños quemados fueron más bajas, especialmente en el centro. Los árboles con grosores de corteza superiores a 2 cm no mostraron ninguna anomalía en los patrones de RE. En cambio, los árboles pequeños quemados, mostraron patrones anómalos de RE coincidiendo con los menores grosores de corteza medidos, inferiores a 2 cm. GANTHALER y colaboradores (2019), encontraron que, en coníferas, valores bajos de RE estaban correlacionados principalmente con altos contenidos de humedad de la madera. Por tanto, los valores encontrados en las zonas centrales de estos pinos podrían deberse a un aumento del contenido de agua debido a un aumento de la podredumbre. También se ha señalado que pueda deberse a cambios en el contenido de iones debido a la movilización de sustancias almacenadas (GUYOT *et al.*, 2013), indicando una reacción de recuperación del árbol. En cualquiera de los casos estos valores bajos de RE podrían estar apuntando algún tipo de daño. De cualquier manera, es importante destacar que este es el primer estudio en el que se aplica esta técnica a ejemplares de pino canario y por tanto es necesaria más investigación teniendo en cuenta factores como la edad, que influye en la composición de la madera (MARTÍNEZ-VILALTA *et al.*, 2012), o composición química de la misma que podrían influir en los patrones de RE.

Los modelos actuales de predicción de mortalidad en árboles tras incendios combinan descriptores morfológicos con medidas de daños (altura de quemado de la copa, volumen de la misma) e incluyen variables como intensidad del fuego.



Según estos modelos, los árboles más grandes deberían poder sobrevivir a incendios más intensos (FERNANDES *et al.*, 2008). Los datos actuales sobre los daños a nivel fisiológico del sistema conductor de árboles en pie afectados por los incendios forestales son bastante escasos, es por ello que la técnica de la tomografía puede ser prometedora para identificar alteraciones visibles de las estructuras del sistema conductor (BÄR *et al.*, 2019) y cuantificar los daños de los pinos tras los incendios forestales.

6. Conclusiones

El interior de los troncos de los árboles de *Pinus canariensis* resultó poco afectado por el efecto del fuego en parcelas con alta severidad, indicando, tal como se ha venido sugiriendo en la bibliografía, que la corteza parece aislar perfectamente los troncos del calor.

Los daños visuales observados en los pinos no se vieron reflejados en daños del sistema hidráulico, al menos en los pinos grandes, no mostrando diferencias significativas entre árboles quemados y no quemados y mostrando las tomografías patrones similares.

Con respecto a la segunda hipótesis, se confirmó que los pinos pequeños con menores grosores de la corteza mostraron resistividades mucho más bajas indicando algún tipo de daño en el sistema hidráulico.

Los datos actuales sobre los daños a nivel fisiológico del sistema conductor tras los incendios forestales son bastante escasos, la técnica de la tomografía de resistividad eléctrica se propone como una técnica moderadamente sencilla y no invasiva para conocer el estado del sistema hidráulico. Esta técnica, utilizada por primera vez en este estudio en pino canario, abre una vía de estudio inicial sobre el comportamiento de esta especie al fuego. Un mayor seguimiento de esta especie en incendios recurrentes en donde el grosor de la corteza pueda verse afectado será necesario para conocer la resiliencia de esta especie a incendios forestales a nivel del sistema conductor.

8. Bibliografía

- BATTIPAGLIA, G; STRUMIA, S; ESPÓSITO, A; GIUDITTA, E; SIRIGNANO, C; ALTIERI, S; RUTIGLIANO, FA. 2014. The effects of prescribed burning on *Pinus halepensis* Mill. as revealed by dendrochronological and isotopic analyses. *For Ecol Manag* 334:201–208
- BATTIPAGLIA, G; SAVI, T; ASCOLI, D; CASTAGNERI, D; ESPÓSITO, A; MAYR, S; NARDINI, A. 2016. Effects of prescribed burning on ecophysiological, anatomical and stem hydraulic properties in *Pinus pinea* L. *Tree Physiol* 36: 1019-1031.
- BÄR, A; HAMACHER, M; GANTHALER, A; LOSSO, A; MAYR, S. 2019. Electrical resistivity tomography: patterns in *Betula pendula*, *Fagus sylvatica*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. *Tree Physiol*. 39: 1262-1271.
- BIEKER, D & RUST, S. 2010. Non-destructive estimation of sapwood and heartwood width in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Silva Fenn.* 44, 267–273
- CEBALLOS, L Y ORTUÑO, F. 1951. Vegetación y flora forestal de las Canarias Occidentales. IFIE, Madrid.
- CLIMENT, J; GIL, L; PARDOS, JA. 1998. Xylem anatomical traits related to resinous heartwood formation in *Pinus canariensis* Sm. *Trees Struct. Funct* 123: 139-145.



- CLIMENT,J; TAPIAS, R; PARDOS, JA; GIL, L. 2004. Fire adaptations in the Canary Islands pine (*Pinus canariensis*). *Plant Ecol.* 171, Issue 1-2: 185-196.
- CLIMENT,J; LÓPEZ, R; GONZÁLEZ, S; Gil L. 2007. El pino canario (*Pinus canariensis*), una especie singular. *Ecosistemas* 16 (1): 80-89.
- DAYLI W; RAMÍREZ, A; Binley, A; LEBRECQUE, D. 2005. Electrical resistance tomography – theory and practice. *Near Surf. Geophys.*2, 573–598.
- DE MICCO, V; ZALLONI, E; BALZANO, A; BATTIPAGLIA, G. 2013. Fire influence on *Pinus halepensis*: wood responses close and far from the scars. *IAWA J* 34:446–458.
- DIVAKARA, B.N & CHAITHRA, S. 2022. Electric Resistance Tomograph (ERT): a review as nondestructive Tool (NDT) in deciphering interiors of standing trees. *Sensing and Imaging* 23:18.
- FERNANDES, P.M; VEGA, J.A; ENRIQUE JIMÉNEZ, E; RIGOLOT, E. 2008. Fire resistance of European pines. *For. Ecol. Manag.* 256: 246–255.
- GANTHALER, A; SAILER, J; BÄR, A; LOSSO, A; MAYR, S. 2019. Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation. *Front. Plant Sci.*10:1455.
- GÜNTHER, T. 2004. Inversion methods and resolution analysis for the 2D/3D reconstruction of resistivity structures from DC measurements. PhD thesis, Freiberg University of Mining and Technology, Freiberg, Germany.
- GÜNTHER, T; RUCKER, C; SPITZER, K. 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography—II. Inversion. *Geophys J Int* 166:506–517.
- GUYOT, A; OSTERGAARD, K. T; LENKOPANE, M; FAN, J; LOCKINGTON, D. A. 2013. Using electrical resistivity tomography to differentiate sapwood from heartwood: application to conifers. *Tree Physiol.*33, 187–194.
- HUMPLÍK, P; ČERMAK, P; ŽID, T. 2016. Electrical impedance tomography for decay diagnostics of Norway spruce (*Picea abies*): possibilities and opportunities. *Silva Fenn.*50, 1–13.
- LARSSON, B; BENGTSSON, B; GUSTAFSSON, M. 2004. Nondestructive detection of decay in living trees. *Tree Physiol.*24, 853–858.
- LUIS, VC; JIMÉNEZ, M; MORALES, D; KÚCERA, J; WIESSER, G. 2005. Canopy transpiration of a Canary Islands pine forest. *Agric. For. Meteorol.* 135:117-123
- MANTGEM, P Y SCHWARTZ, M. 2003. Bark heat resistance of small trees in Californian mixed conifer forest: testing some model assumptions. *For. Ecol. Manage.* 178: 341-352.
- MARTÍNEZ-VILALTA, J; LÓPEZ, BC; LOEPFE, L; FRANCISCO, L. 2012. Stand- and tree-level determinants of the drought response of Scots pine radial growth. *Global Change Ecol* 168:877–888.
- MICHALETZ ST & JOHNSON, EA. 2006. A heat transfer model of crown scorch in forest fires. *Can. J. For. Res.* 36 (11): 2839-2851
- MICHALETZ, ST; JOHNSON, EA; TYREE, MT. 2012. Moving beyond the cambium necrosis hypothesis of post-fire tree mortality: cavitation and deformation of xylem in forest fires. *New Phytol* 194:254–263.
- PAUSAS, J. 2015. Bark thickness and fire regimes. *Funct. Ecol.* 29: 315–327.



PAUSAS, J y KEELY, JE. 2017. Epicormic resprouting in fireprone ecosystems. *Trends in Plant Science*, 22 (12) 1008-1015.

PETERS, J; MORALES, D; JIMÉNEZ, M.S. 2003. Gas exchange characteristics of *Pinus canariensis* needles in a forest stand on Tenerife, Canary Islands. *Trees* 17: 492–500.

RÜCKER, C; GUNTHER, T; SPITZER, K. 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography—I. Modelling. *Geophys J Int* 166:495–505.

VAN WAGNER, C.E. 1973. Height of crown scorch in forest fires. *Can. J. For. Res.* 3(3): 373–378.

WANG, H; GUAN, H; GUYOT, A; SIMMONS, C. T; LOCKINTONG, D. A. 2016. Quantifying sapwood width for three Australian native species using electrical resistivity tomography. *Ecohydrology* 9, 83–92.

WUNDER, J; MANUSCH C; QUELOZ, V; BRANG, P; RINGWALD, V; BUGMANN, H. 2013. Does increment coring enhance tree decay? New insights from tomography assessments. *Can. J. For. Res.* 43, 711–718