



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

9CFE-1504

Organiza





Resistencia a la perforación como método poco invasivo para la detección precoz de *Fistulina hepatica* en plantaciones productivas de *Castanea sativa*

MEIJER, A. (1), MUÑOZ-ADALIA, E.J. (1,2), CORREAL-MÒDOL, E. (1) y COLINAS, C. (1,3)

(1) Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña (CTFC), Carretera St. Llorenç de Morunys, km.2 Solsona, E-25280, España

(2) Departamento de Ciencias Agroforestales - iuFOR, Universidad de Valladolid, Av. de Madrid 57, Palencia, 34004, España

(3) Departamento de Ciencia e Ingeniería Forestal y Agraria, Universidad de Lleida, Av. de l'Alcalde Rovira Roure 191 Lleida, E-25198, España

Resumen

La mancha roja del castaño es una decoloración del duramen que afecta a rodales productivos de *Castanea sativa* Mill. en Cataluña. Aunque en las primeras etapas de la infección las propiedades estructurales de la madera no se ven alteradas, su valor económico puede disminuir hasta un 70% debido al rechazo por parte de la industria. Esta enfermedad, causada por el hongo *Fistulina hepatica* (Schaeff.) With., supone un desafío para los gestores forestales, ya que es casi imposible detectar la infección antes del apeo. Con el objetivo de desarrollar un método de detección eficiente para identificar la presencia de *F. hepatica* en las primeras etapas del turno, se analizaron 72 castaños utilizando métodos moleculares y de resistencia a la perforación. Utilizamos trece índices de resistencia a la perforación y su correlación con la presencia del patógeno se evaluó mediante modelos lineales mixtos. Se encontraron diferencias significativas entre árboles sanos e infectados en cuatro de los índices. Los resultados muestran que la detección temprana de *F. hepatica* es posible mediante métodos mecánicos rápidos y económicos. Además, se presenta un nuevo índice de peligro de mancha roja del castaño para estimar la probabilidad de infección por *F. hepática*.

Palabras clave

Mancha roja del castaño, evaluación mecánica, castaño, técnica no destructiva

1. Introducción

El castaño (*Castanea sativa* Mill.) es una especie forestal de múltiples aplicaciones tecnológicas que se ha cultivado durante siglos en Europa tanto por su madera como por su fruto (Conedera et al., 2004; Krebs et al., 2022). Su madera es de alta calidad, rica en taninos, y especialmente resistente a hongos de pudrición, lo que la hace ideal para usos en exterior (Thaler et al., 2014). Sin embargo, desde la década de 1980, en Cataluña, se está produciendo un abandono selvícola generalizado debido a la aparición del chancro del castaño (*Cryphonectria parasitica* (Murrill) M.E. Barr), a las condiciones de mercado inciertas y la aparición de una decoloración del duramen conocida como "mancha roja del castaño" (CRS, por sus siglas en inglés). Esta enfermedad es causada por el hongo *Fistulina hepatica* (Schaeff.) With. y reduce el valor comercial de la madera hasta en un 70 %



(Yurkewich et al., 2017), ya que no se detecta hasta que los árboles son apeados (Regué et al., 2019), lo que genera incertidumbre para los gestores forestales.

La CRS no parece afectar a las propiedades estructurales de la madera en las fases de infección temprana (Correal Mòdol, 2013), pero la decoloración del duramen la hace inadecuada para productos de alta calidad, promoviendo la corta temprana de los árboles y la reducción del periodo de rotación, afectando significativamente a la rentabilidad. En ausencia de métodos rutinarios para detectar la enfermedad en etapas tempranas, muchos propietarios forestales han abandonado la producción de castaño.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio fue desarrollar una metodología eficiente y poco invasiva para la detección temprana de infecciones por *F. hepatica* en árboles en pie de *C. sativa* basada en la técnica de resistencia a la perforación de la madera. Específicamente, se buscó (i) evaluar si la presencia de *F. hepatica* provoca variaciones notables en la resistencia de la madera a la perforación que puedan ser detectadas en árboles en pie, (ii) evaluar el impacto de la infección por *F. hepatica* en la madera de castaño mediante índices basados en la resistencia a la perforación, y (iii) desarrollar un índice específico que pueda apoyar las decisiones forestales considerando el riesgo de infección por CRS.

3. Metodología

El estudio se llevó a cabo en 2022 en el Parque Natural del Montseny, en el noreste de España, en cinco parcelas experimentales de *C. sativa* con condiciones similares (bloques; 18 años, pendientes promedio de 55,9 %, altitud media de 769 m y orientaciones norte y noreste). Cada bloque se dividió en tres parcelas que recibieron diferentes tratamientos silvícolas: clara baja (eliminación de árboles dominados), clara selectiva mixta (combinación de clara baja y eliminación de competencia directa alrededor de los mejores árboles) y una parcela control sin intervención (dinámica natural).

Se analizaron 72 árboles, de los cuales 38 estaban infectados por *F. hepatica* según resultados moleculares previos (Meijer et al., 2024). La resistencia a la perforación se realizó dos veces en cada árbol en direcciones perpendiculares mediante un dispositivo IML RESI F300-S (IML, Wiesloch, Alemania) a 30 cm del suelo, asegurando el registro de la parte centro del tronco. La aguja se cambió en cada 15 árboles para evitar el efecto del desgaste en la medición.

Los datos obtenidos de los resistogramas se procesaron eliminando previamente los primeros 20 mm de cada medición (corteza) y calculando 13 índices (Tabla 1) para describir las propiedades mecánicas de la madera, con el objetivo de identificar diferencias entre árboles sanos e infectados.

Tabla 1. Descripción de los índices de perforación de resistencia. Unidades; dA: amplitud de perforación. Fuente: Acuña et al. (2011).

MT 7: SANIDAD Y OTROS RIESGOS BIÓTICOS



| Índice | Descripción | Unidades | Fórmula |
|-----------------------------|--|----------|----------------|
| Valor medio | Valor promedio del consumo de energía por centímetro penetrado (A: profundidad de penetración; x: valores de amplitud del resistograma). | dA/cm | $V_{med} =$ |
| Variabilidad | Diferencia de la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV). Dispersión de la muestra, que indica la homogeneidad del material. | dA | $Var = \sigma$ |
| Media de máximos | Consumo medio de energía del duramen tardío (M: valor máximo, n: número de "picos"). | dA | $M_{max} =$ |
| Media de mínimos | Consumo medio de energía del duramen temprano (m: valor mínimo, n: número de "valles"). | dA | $M_{min} =$ |
| Variación de la resistencia | Diferencia de amplitud entre la madera tardía y la madera temprana. | dA | $V_{den} =$ |
| Valor máximo | Valor más alto para detectar nudos o anomalías de densidad extrema. | dA | V_{max} |
| Valor mínimo | Valor más bajo que puede indicar grietas, cavidades u otras anomalías. | dA | V_{min} |
| Variación máxima | Índice para escalar la diferencia entre la media de máximos con respecto al valor medio de consumo de energía. | dA | $D_{max} =$ |



| | | | |
|-----------------------|--|----|---|
| Variación mínima | Índice, en valor absoluto, para escalar la diferencia entre la media de mínimos con respecto al valor medio de consumo de energía. | dA | $D_{min} = \frac{M_{min}}{M_{med}}$ |
| Diferencia de máximos | Diferencia entre el valor máximo y la media de máximos. | dA | $\Delta_{max} = M_{max} - M_{med}$ |
| Diferencia de mínimos | Diferencia entre el valor mínimo y la media de mínimos. | dA | $\Delta_{min} = M_{med} - M_{min}$ |
| Valor J | Diferencia entre el valor máximo absoluto y la media total expresada como porcentaje de la media total. | % | $J = \frac{M_{max} - M_{med}}{M_{med}}$ |
| Valor H | Diferencia entre el valor mínimo absoluto y la media total, expresada como porcentaje de la media total. | % | $H = \frac{M_{med} - M_{min}}{M_{med}}$ |

El análisis estadístico se realizó en el entorno de programación R (R Core Team 2023) utilizando modelos lineales mixtos generalizados (GLMMs) [función “lmer”; *lme4* (Bates et al., 2015)] para evaluar el efecto de la presencia de *F. hepatica* en los diferentes índices de resistencia a la perforación. Los modelos combinaron efectos fijos [presencia de *F. hepatica* (F) y el tratamiento silvícola (T)], y efectos aleatorios [árbol (I), parcela (P), orientación de la parcela (O) y diámetro del árbol (D)]. Se generaron un total de dieciséis modelos para cada índice. La selección de modelos se basó en el criterio de información de Akaike [AIC; paquete *AICcmodavg* (Mazerolle, 2023)] y la prueba del χ^2 para comparar los mejores modelos con el modelo más simple para cada índice (modelo nulo). La calidad del ajuste de los modelos elegidos se realizó mediante el análisis de residuos e inspección visual mediante el paquete *DHARMA* (Hartig, 2022) y el ajuste global mediante el paquete *MuMIn* (Barton, 2020).

Adicionalmente, se calcularon 20 modelos logísticos (modelos generalizados

mixtos; distribución binomial) combinando los índices que variaron significativamente con la presencia de *F. hepatica*, con tal de desarrollar un modelo predictivo del riesgo de infección.

4. Resultados

Una evaluación preliminar de los resistogramas no permitió discriminar claramente entre árboles infectados y sanos (Figura 1). Sin embargo, el análisis estadístico posterior mostró una reducción general de los valores de 10 de los 13 índices cuando *F. hepatica* estaba presente en el árbol (Tabla 2). La presencia del hongo alteró significativamente el valor alcanzado por cuatro de los índices (p -valor $<0,05$ en todos los casos): la media de máximos (Mmax), la media de mínimos (Mmin), el valor mínimo (Vmin) y la variación máxima (Dmax).

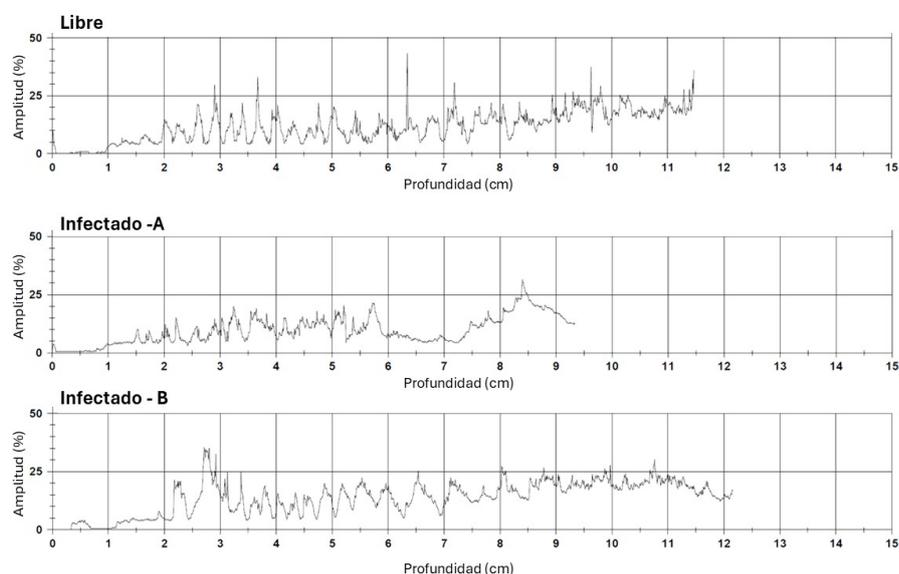


Figura 1. Perfiles de resistencia a la perforación de un árbol libre de *F. hepatica* (Libre, arriba; ID: C3-52-S; dirección de muestreo norte-sur; diámetro del árbol: 20 cm) que muestra un patrón de crecimiento anual bien definido; un árbol infectado (Infectado-A, centro; ID: N3-29-E; dirección de muestreo este-oeste; diámetro del árbol: 16 cm) que presenta un patrón de crecimiento anual menos definido junto con una pudrición evidente entre 6 y 7,5 cm de profundidad de la muestra; y un árbol infectado (Infectado-B, abajo; ID: T4-7-S; dirección de muestreo norte-sur; diámetro del árbol: 21 cm) que presenta un patrón de crecimiento anual bien definido sin signos evidentes de pudrición. Fuente: modificada de Meijer et al. (2025).

Tabla 2. Valores estimados de los índices analizados en árboles sanos e infectados. ¹Abreviaciones de los índices según la Tabla 1. ²Modelos utilizados para estimar las diferencias entre árboles sanos e infectados según los códigos proporcionados en la Tabla 3. Los valores seguidos por la misma letra (a-b) no son significativamente diferentes con un nivel de confianza de 95%. Unidades; dA: amplitud de perforación.

| Índice | Modelo2 | Sano | Infectado | Unidad | |
|--------|---------|------|-----------|----------|-------|
| Vmed | M0 | Vmed | 18.42 a | 16.51 a | dA/cm |
| Var | M0 | Var | 6.71 a | 6.52 a | dA |
| Mmax | M0 | Mmax | 20.37 a | 18.19 b | dA |
| Mmin | M0 | Mmin | 17.34 a | 15.36 b | dA |
| Vden | M0 | Vden | 3.03 a | 2.82 a | dA |
| Vmax | M4 | Vmax | 46.38 a | 42.86 a | dA |
| Vmin | M0 | Vmin | 5.04 a | 4.17 b | dA |
| Dmax | M0 | Dmax | 1.95 a | 1.68 b | dA |
| Dmin | M0 | Dmin | 1.08 a | 1.18 a | dA |
| Δmax | M4 | Δmax | 26.00 a | 24.67 a | dA |
| Δmin | M0 | Δmin | 12.30 a | 11.19 a | dA |
| J | M4 | J | 162.66 a | 167.54 a | % |
| H | M4 | H | 72.51 a | 73.65 a | % |

El tratamiento silvícola (T) no mostró efecto significativo en ninguno de los modelos evaluados (p -valor $> 0,30$ en todos los casos). Los modelos seleccionados como los más explicativos para las medias de máximos (Mmax) y mínimos (Mmin) fueron los modelos nulos ($M0_{Mmax}$ y $M0_{Mmin}$), ya que no presentaron diferencias significativas con modelos más complejos según la prueba χ^2 (p -valor $> 0,35$) y mostraron un mejor ajuste relativo en ausencia de variables explicativas adicionales (Tabla 3).

La variación de Vmin en los modelos que no incluían el diámetro como factor aleatorio se explicó por el efecto significativo de la presencia de *F. hepatica*. En este caso, el modelo más informativo fue el nulo ($M0_{Vmin}$), que solo incluía la presencia de *F. hepatica* como variable explicativa y el árbol como variable aleatoria. No se detectaron diferencias significativas entre el modelo nulo y el siguiente modelo más explicativo según la prueba χ^2 (p -valor $> 0,29$), por lo que se seleccionó $M0_{Vmin}$.

El modelo seleccionado para el índice de variación máxima (Dmax) fue el modelo nulo ($M0_{Dmax}$), ya que presentó el valor de AIC más bajo y no mostró diferencias significativas con los modelos más complejos evaluados.

Tabla 3. Modelos seleccionados (GLMMs) la media de máximos (Mmax), media de

mínimos (M_{min}), valor mínimo (V_{min}) y variación máxima ($M_{max}-V_{med}$) en relación con la presencia de *F. hepatica* (F) y el árbol (I) como factor aleatorio. Los factores aleatorios se muestran entre paréntesis. Df : Grados de libertad; AIC : Criterio de Información de Akaike; R^2 : R^2 condicional.

| Índice | Modelo | Descripción | Df | logLik | Desviación | AIC | R ² |
|-----------|-------------|------------------------|----|---------|------------|--------|----------------|
| M_{max} | $M0M_{max}$ | $M_{max} \sim F + (I)$ | 1 | -409,66 | 819,31 | 825,23 | 0,66 |
| M_{min} | $M0M_{min}$ | $M_{min} \sim F + (I)$ | 1 | -400,42 | 800,85 | 807,10 | 0,64 |
| V_{min} | $M0V_{min}$ | $V_{min} \sim F + (I)$ | 1 | -292,19 | 584,38 | 594,09 | 0,66 |
| D_{max} | $M0D_{max}$ | $D_{max} \sim F + (I)$ | 1 | -112,78 | 225,57 | 240,36 | 0,46 |

Es destacable que el modelo nulo del índice de valor medio de consumo de energía (V_{med}), en el que la presencia de *F. hepatica* se incluyó como factor explicativo resultó casi significativa (p -valor = 0,05).

Se calcularon un total de 20 GLMs adicionales para determinar la combinación de índices significativos que permitieran predecir la infección por *F. hepatica* de forma sencilla. El modelo más explicativo ($M2p$; Tabla 4) consistió en una combinación de dos índices; D_{max} multiplicado por V_{min} , mostrando un valor de AIC más bajo que los tres siguientes mejores modelos (Tabla 4). Una vez confirmada la calidad del ajuste, se derivó la función logística del modelo utilizando sus coeficientes (Ramsey & Schafer, 2013) para crear una ecuación que estimase la probabilidad de infección por CRS basada en los valores experimentales de D_{max} y V_{min} . Esta ecuación fue formulada como un nuevo índice denominado “Índice de Peligro de Mancha Roja del Castaño” (CRSD; Ecuación 1; Figura 2).

*Tabla 4. Modelos lineales generalizados evaluados para determinar la presencia o ausencia de *F. hepatica* (F), considerando los índices D_{max} , V_{min} , M_{max} y M_{min} como variables explicativas. La combinación de índices en una sola variable se muestra entre corchetes. El modelo seleccionado está en negrita. Df : Grados de libertad; AIC : Criterio de Información de Akaike. x : producto.*



| Modelo | Descripción | Df | logLik | Desviación | AIC | ΔAIC |
|--------|-------------------------------|----|--------|------------|--------|-------|
| M2p | F ~ [Dmax x Vmin] | 1 | -89,68 | 179,37 | 183,45 | 0,00 |
| M1p | F ~ [Dmax + Vmin] | 1 | -91,14 | 182,27 | 186,36 | 2,91 |
| M4p | F ~ Dmax + Vmin + Mmin + Mmax | 4 | -90,10 | 180,20 | 190,63 | 7,18 |
| M3p | F ~ [Mmax x Mmin] | 1 | -95,84 | 191,69 | 195,78 | 12,33 |

Ecuación 1. CRSD (Índice de Riesgo de Mancha Roja del Castaño): Probabilidad estimada (0-1) de la presencia de F. hepatica. Dmax: Variación máxima, índice que escala la diferencia entre la media de máximos (Mmax) respecto al valor medio de consumo de energía (Vmed). Vmin: Valor mínimo, el valor más bajo del resistograma que puede indicar grietas, cavidades u otras anomalías.

$$CRSD = \frac{e^{2,248 - 0,271 \times (Dmax \times Vmin)}}{1 + e^{2,248 - 0,271 \times (Dmax \times Vmin)}}$$

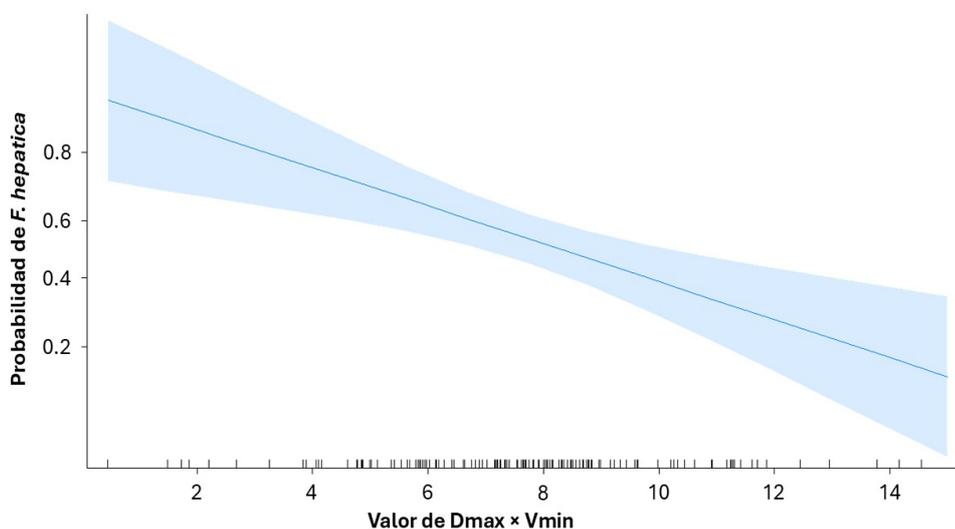


Figura 2. Probabilidad de infección por F. hepatica proporcionada por el modelo M2p. Área sombreada: intervalos de confianza del 95%. Fuente: modificada de Meijer et al. (2025).

5. Discusión

En este estudio, se evaluaron los efectos de la presencia de *F. hepatica*, agente



causante del CRS, mediante técnicas de resistencia a la perforación. Los resultados presentados aquí revelaron que cuatro de los índices seleccionados (concretamente M_{max} , M_{min} , V_{min} y D_{max}) diferenciaron de forma clara los árboles sanos de aquellos infectados por *F. hepatica*. Así pues, el valor de estos cuatro índices se redujo significativamente en los árboles afectados por el hongo (Tabla 2).

Nuestros resultados coinciden con estudios previos que muestran que *F. hepatica* no produce una variación significativa en la resistencia global de la madera en etapas tempranas (V_{med} , p -valor = 0,05). Sin embargo, el conocimiento sobre la CRS en madera de castaño indica que, aunque no hay cambios importantes en la densidad de la madera entre las muestras decoloradas y las no afectadas, sí se han identificado otras diferencias, como mayor contracción volumétrica y alteraciones en propiedades mecánicas específicas (Correal Mòdol, 2013). Estas evaluaciones se realizaron en árboles que presentaban solo la decoloración de la madera y no síntomas avanzados de pudrición concluyendo que, en esas etapas, la CRS había alterado algunas características sin comprometer las propiedades estructurales de la madera. Esta disminución en propiedades como la dureza ya había sido detectada en castaño con alteraciones visibles en el color del duramen (Tamantini et al., 2022). Los efectos en la resistencia de la madera causados por *F. hepatica* ocurren solo después de largos periodos de colonización, pues este hongo puede subsistir consumiendo compuestos fenólicos y taninos de las células del duramen sin dañar la celulosa de las paredes celulares, en etapas tempranas (Cartwright, 1937; Schwarze, Baum, et al., 2000; Schwarze, Engels, et al., 2000).

A pesar de que las propiedades mecánicas de la madera no parecen verse afectadas en etapas tempranas, los resultados presentados aquí confirman que la presencia de *F. hepatica* en árboles en pie es detectable mediante la evaluación de la resistencia a la penetración. El consumo medio de energía para la penetración de la madera tardía (M_{max}), al igual que en la madera temprana (M_{min}), disminuyó significativamente con la presencia de *F. hepatica* (10,73 y 11,41 %, respectivamente; Tabla 2), lo que sugiere que el hongo coloniza ambos tipos de tejido. Esto queda confirmado por la no detección de la infección de *F. hepatica* mediante el índice de variación de resistencia (V_{den}), que consiste en la diferencia entre M_{max} y M_{min} (Tabla 1). Esto refuerza la hipótesis de que *F. hepatica* no discrimina entre tipos de madera durante las primeras etapas de colonización de su hospedante.

Aunque los resultados no evidencian una preferencia clara por la madera temprana o tardía, el índice de variación máxima (D_{max}) reveló un efecto más notable en la madera tardía (p -valor < 0,05) (índice de variación mínima D_{min} , p -valor > 0,05). Ambos índices amplifican la diferencia del valor medio máximo/mínimo en relación con la media global del consumo de energía, enfatizando las diferencias por encima o por debajo de la media en cada caso. Estos resultados pueden deberse a la importancia de la relación entre madera temprana y tardía en la densidad de la madera (Wiedenhoeft, 2005), ya que esta relación varía entre especies y, en *C. sativa*, la madera tardía es hasta tres veces más abundante que la temprana y contiene menos vasos y éstos son más



pequeños, lo que le confiere una densidad mayor (Romagnoli et al., 2011).

El análisis del valor mínimo (V_{min}) indicó que ninguno de los árboles muestreados presentaba oquedades. Sin embargo, los resultados mostraron que la presencia de *F. hepatica* reduce significativamente este índice, lo cual es coherente con el comportamiento esperado de un hongo que consume tejidos leñosos. Esto sugiere que las zonas de baja densidad asociadas con la infección generan menores valores de resistencia. Esta tendencia también se reflejó en la reducción significativa del índice M_{min} . Aunque el índice V_{min} se mostró como un buen indicador para detectar infecciones, es importante destacar que otras anomalías, como grietas o cavidades, también pueden producir valores bajos, lo que señala posibles problemas estructurales en el tronco que afectarían su uso en productos de alta calidad.

Las intensidades de las claras evaluadas no tuvieron efecto significativo en ninguno de los índices de perforación de resistencia analizados, lo que sugiere que la metodología desarrollada en este estudio puede utilizarse indistintamente entre estos diferentes tipos de manejo silvícola.

En este estudio, se evaluó una nueva metodología, basada en técnicas precisas y contrastables (análisis mecánico apoyado con biología molecular para el diagnóstico), para detectar la presencia del agente causante de la CRS en árboles en pie, y poniéndola a prueba en árboles infectados y sanos confirmados. Esta metodología proporciona una imagen precisa y poco invasiva del estado de salud de los árboles, ya que puede localizar infecciones difícilmente detectables por otros medios o a simple vista. Nuestros resultados confirmaron el efecto de la infección por CRS en la madera y respaldaron la efectividad de cuatro índices de resistencia a la perforación (M_{max} , M_{min} , D_{max} y V_{min}) para discriminar árboles infectados por *F. hepatica* mucho tiempo antes del apeo. Además, el nuevo índice CRSD provee a los gestores forestales de una herramienta adicional para evaluar el estado de salud de los tallares de castaño en edades tempranas lo que puede redundar en una optimización de la producción y la conservación del castaño como especie productiva en regiones afectadas por la CRS.

6. Conclusiones

La presencia de *F. hepatica* en *C. sativa* provoca una reducción en la resistencia de la madera a la perforación que puede ser detectada en etapas tempranas del turno mediante el cálculo de índices habituales en el estudio de la resistencia a la perforación (es decir, M_{max} , M_{min} , D_{max} y V_{min}). El índice predictivo desarrollado en este trabajo (CRSD) constituye una herramienta importante que permita a los gestores forestales evaluar el estado de salud de los castañares en edades tempranas, lo que puede integrarse de manera rutinaria en la gestión forestal para reducir la incertidumbre económica.

Este trabajo ha sido publicado en *Wood Science and Technology* bajo el título 'Early detection of heartwood rot caused by *Fistulina hepatica* in *Castanea sativa* productive coppices through low-invasive resistance drilling' (Meijer et al., 2025).



7. Agradecimientos

El estudio fue financiado parcialmente por la Diputació de Barcelona. Queremos expresar nuestro agradecimiento a la Dra. Miriam Piqué y al Sr. Mario Beltrán (CTFC) por el uso de las parcelas de estudio que establecieron tiempo atrás. Los autores también agradecen al Sr. Marcel Vilches por su apoyo y al Sr. Amir H. Khalili por su colaboración en el trabajo de campo.

8. Bibliografía

ACUÑA, L.; BASTERRA, L. A.; CASADO, M. M.; LÓPEZ, G.; RAMÓN-CUETO, G.; RELEA, E.; MARTÍNEZ, C.; Y GONZÁLEZ, A.; 2011. Aplicación del resistógrafo a la obtención de la densidad y la diferenciación de especies de madera. *Materiales de Construcción*, 61(303), 451-464. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.57610>

BARTON, K; 2020. MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.43.17. <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>

BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; & WALKER, S.; 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *J. Sta. Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>

CARTWRIGHT, K. T. S. G.; 1937. A reinvestigation into the cause of "brown oak", *Fistulina hepatica* (HUDS.) fr. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 21, 68-83. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(37\)80006-6](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(37)80006-6).

CONEDERA, M.; MANETTI, M. C.; GIUDICI, F.; & AMORINI, E.; 2004. Distribution and economic potential of the Sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.) in Europe. *Ecol. Mediterr.* 30(2), 179-193. <https://doi.org/10.3406/ecmed.2004.1458>

CORREAL-MÒDOL E; 2013. Propietats químiques, físiques, mecàniques i resistents de la fusta massissa i laminada de castanyer del sistema mediterrani català (Tesis Doctoral). Lleida, España: Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universitat de Lleida.

HARTIG, F.; 2022. *Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models* (Versión R package version 0.4.6) [Software]. <http://florianhartig.github.io/DHARMA/>

KREBS, P.; ULMKE, F.; TINNER, W.; & CONEDERA, M.; 2022. The Roman Legacy on European Chestnut and Walnut Arboriculture. *Environ. Archaeol.* 1-22. <https://doi.org/10.1080/14614103.2022.2137648>

MAZEROLLE, M. J.; 2023. *Model Selection and Multimodel Inference Based on (Q)AIC(c)* (Versión 2.3-2) [R]. <https://cran.r-project.org/package=AICcmodavg>

MEIJER, A.; MUÑOZ-ADALIA, E. J.; & COLINAS, C.; 2024. Early Thinning: A Promising Tool to Prevent *Fistulina hepatica* Heart Rot in *Castanea sativa* Coppice Stands. *Forests*, 15(9), 1639. <https://doi.org/10.3390/f15091639>

MEIJER, A.; MUÑOZ-ADALIA, E. J.; CORREAL-MÒDOL, E.; & COLINAS, C.; 2025. Early detection of heartwood rot caused by *Fistulina hepatica* in *Castanea sativa* productive coppices through low-invasive resistance drilling. *Wood Sci. Technol.* 59(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s00226-024-01616-4>

R CORE TEAM; 2023. A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria.



- RAMSEY, F. L.; & SCHAFER, D. W.; 2013. *The Statistical Sleuth: A Course in Methods of Data Analysis* (3.^a ed.). Brooks/Cole, Cengage Learning.
- REGUÉ, A.; BASSIÉ, L.; DE-MIGUEL, S.; & COLINAS, C.; 2019. Environmental and stand conditions related to *Fistulina hepatica* heart rot attack on *Castanea sativa*. *For. Pathol.* 49(3), e12517. <https://doi.org/10.1111/efp.12517>
- ROMAGNOLI, M.; CHERUBINI, M.; PRISLAN, P.; GRIČAR, J.; SPINA, S.; & ČUFAR, K.; 2011. Main Phases of Wood Formation in Chestnut (*Castanea sativa*) in Central Italy—Comparison of Seasons 2008 and 2009. *Drvna Industrija*, 269-275. <https://doi.org/10.5552/drind.2011.1124>
- SCHWARZE, F. W. M. R.; BAUM, S.; & FINK, S.; 2000. Dual modes of degradation by *Fistulina hepatica* in xylem cell walls of *Quercus robur*. *Mycol. Res.* 104(7), 846-852. <https://doi.org/10.1017/S0953756299002063>
- SCHWARZE, F. W. M. R.; ENGELS, J.; & MATTHECK, C.; 2000. *Fungal Strategies of Wood Decay in Trees*. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-57302-6>
- TAMANTINI, S.; BERGAMASCO, S.; PORTOGHESI, L.; VETTRAINO, A. M.; ZIKELI, F.; MUGNOZZA, G. S.; & ROMAGNOLI, M.; 2022. Detection, description, and technological properties of colour aberration in wood of standards and shoots from a chestnut (*Castanea sativa* Mill.) coppice stand. *Eur. J. For. Res.* 141(4), 683-698. <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01468-2>
- THALER, N.; ŽLAHTIČ, M.; & HUMAR, M.; 2014. Performance of recent and old sweet chestnut (*Castanea sativa*) wood. *Int. Biodeter. Biodegr.* 94, 141-145. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.016>
- WIEDENHOEFT, A.; 2005. Structure and Function of Wood. En *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites* (pp. 9-33). Taylor & Francis Group.
- YURKEWICH, J. I.; CASTAÑO, C.; & COLINAS, C.; 2017. Chestnut Red Stain: Identification of the fungi associated with the costly discolouration of *Castanea sativa*. *For. Path.* 47(4), e12335. <https://doi.org/10.1111/efp.12335>