



9CFE-1639

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

Organiza



Efecto de la aplicación de tratamientos para el control de *Phytophthora cinnamomi* en un encinar afectado por seca

KREMER, C. (1), ÁVILA, A. (2), MÁRQUEZ, M. (2), USCOLA, M. (3), RUÍZ-GALEA, M. (1), FRIERO, E. (1), CONTRERAS, M. (1), VILLARREAL, C. (1) y HERNÁNDEZ, I. (1).

1. Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA). Finca El Encín. Autovía A-2, km. 38,2. 28805 Alcalá de Henares, Madrid.
2. QUERCUSCARE SL. C/ San Gerardo, 30. 28035 Madrid.
3. Departamento de Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, Universidad Rey Juan Carlos (URJC), Tulipán s/n, 28933 Móstoles, España.

Resumen

En la Península Ibérica y desde hace varias décadas, se llevan produciendo importantes pérdidas en las masas forestales del género *Quercus*, debido a una climatología cada vez más extrema y a la presencia de patógenos como *Phytophthora cinnamomi*, que se ha señalado como causa de la enfermedad de la Seca en encinas (*Quercus ilex*). En un encinar de la Comunidad de Madrid donde se ha aislado este pseudohongo (Manzanares el Real), se ensayaron tratamientos descritos como de control y prevención consistentes en la aplicación de enmiendas calizas al suelo, de fosfonatos en el tronco de los árboles por endoterapia o la combinación de ambas. Para la evaluación de su efectividad, se midió la concentración de clorofila, flavonoles y antocianinas con un sensor DUALEX® como indicadores de estrés, y además se evaluó el grado de severidad o de defoliación de la copa. En las mediciones tomadas antes de los tratamientos y tras 6 meses desde su aplicación, no se observaron diferencias significativas entre los índices de estrés de árboles sanos y enfermos, ni entre tratamientos. Sin embargo, se observó que los tratamientos que incluían endoterapia redujeron el grado de defoliación y tuvieron un efecto positivo en el estado del árbol.

Palabras clave

Dehesa, sanidad forestal, *Quercus ilex*, enmienda caliza, endoterapia.

1. Introducción

La podredumbre radical o “seca” es una enfermedad provocada por el oomiceto *Phytophthora cinamomi* Rands (fitóftora) (BRASIER et al. 1993; SÁNCHEZ et al. 2002; BEAKES et al. 2012; CORCOBADO et al. 2013; CARDILLO 2021) que afecta gravemente a especies mediterráneas, y es una de las principales causas del decaimiento en poblaciones del género *Quercus*. En particular, se ha relacionado con la disminución de la masa forestal tanto de *Quercus ilex* (encina) como de *Quercus suber* (alcornoque), especies de gran importancia ecológica y económica en la Península Ibérica. Este patógeno se encuentra ampliamente distribuido a nivel mundial y causa importantes daños a cerca de 5000 especies de plantas, incluidas muchas de importancia para la agricultura, la horticultura y la silvicultura, como el aguacate, la macadamia y el castaño (LOWER et al. 2000; HARDHAM & BLACKMAN 2018). Entre sus síntomas visibles se encuentran la muerte regresiva de brotes y ramas (puntisecado), clorosis y defoliación temprana, ramas y ramillas muertas, emisión de brotes chupones y, a nivel radical, necrosis y podredumbre. Finalmente acaba con la muerte en los árboles afectados, pero también, en otros casos solo se detecta la muerte súbita del árbol sin sintomatología previa (MONTROYA et al. 1993). La fitóftora infecta las raíces finas o

secundarias provocando su pudrición e interfiriendo con la absorción y el transporte de agua al resto de la planta, lo que conlleva al marchitamiento

y clorosis del follaje (HARDHAM & BLACKMAN 2018). La capacidad de *P. cinnamomi* para crecer saprofíticamente en el suelo o en plantas infectadas asintomáticas es un factor importante que contribuye a la supervivencia a largo plazo del patógeno. Sus clamidosporas, sus estructuras asexuales y los agregados de hifas intracelulares permiten que este patógeno sobreviva durante largos períodos en condiciones adversas por lo que la erradicación completa de la enfermedad es extremadamente difícil (JUNG et al. 2013). Además, ha mostrado una gran adaptabilidad a las nuevas condiciones ambientales, como la sequía, lo que la convierte en una gran amenaza para la conservación del bosque mediterráneo (SERRANO et al. 2020).

Se han descrito diferentes tratamientos para la prevención y control del avance de la enfermedad en Dehesas, entre los que se encuentran una combinación de medidas culturales, control químico y biológico, y programas de mejora genética (CARDILLO et al. 2019). Entre las medidas químicas se han utilizado productos cálcicos, como oxiclورو de calcio (CaO), carbonato de calcio (CaCO_3) o sulfato de calcio (CaSO_4), que, aplicados al suelo como enmiendas calizas, pueden limitar la propagación del inóculo de fitóftora ya que inhiben la formación de esporangios y zoosporas, además de favorecer la producción de raíces absorbentes de las plantas (GARCÍA MORENO et al. 2016; HARDHAM & BLACKMAN 2018; CARBONERO et al. 2021). También se han descrito la aplicación de fosfonatos como el fosfito o el fosetil aluminio inyectados directamente al tronco del árbol ya que reducen los síntomas de la enfermedad (GONZÁLEZ et al. 2017; ROMERO et al. 2019). Sin embargo, poco se sabe de la efectividad conjunta de ambos tratamientos en formaciones de encinares parcialmente adehesados o naturalizados y su eficacia en estas condiciones.

A finales de verano de 2019, aparecieron inesperadamente una gran cantidad de rodales secos en montes de encinar de la Comunidad de Madrid, donde meses anteriores los árboles estaban aparentemente sanos. Aunque este mismo fenómeno fue reportado anteriormente en 2009 y 2015, no se había observado con tanta gravedad. Un estudio de los focos de seca de la región, confirmó que las encinas habían sido afectadas por sucesivas sequías (durante los años 2004, 2005, 2009, 2012, 2019, 2021) y por olas de calor (en los años 2003, 2007, 2009, 2012, 2015, 2019) pero también se detectaron dos focos de podredumbre radical provocados por el patógeno *Phytophthora cinnamomi* (RUÍZ-GALEA et al. 2022). Uno de esos focos está en el Parque Regional de la Cuenca Alta del Manzanares, siendo parte de una de las áreas protegidas más importantes de Madrid, por lo que se debe garantizar su conservación.

Los ensayos se han realizado así en una finca de la Dehesa Boyal de Colmenarejo, que se localiza en el municipio de Manzanares el Real, al noroeste de la Comunidad de Madrid y forma parte del espacio natural protegido Parque Regional de la Cuenca Alta del Manzanares. En trabajos previos se detectó decaimiento del encinar y la presencia de *Phytophthora cinnamomi* (RUÍZ-GALEA et al. 2022). La finca pertenece al piso bioclimático mesomediterráneo y cuenta con un clima mediterráneo típico, según la clasificación climática de Köppen-Geiger, con veranos secos y calurosos e inviernos lluviosos y temperaturas suaves (RIVAS MARTÍNEZ 1987). La litología predominante de la comarca es el granito, con suelos

correspondientes a la categoría de cambisoles, tanto húmicos como dístricos. La vegetación potencial pertenece a la serie de los encinares carpetanos con enebro de la miera (*Junipero oxycedri-Querceto rotundifoliae* S.). Se observan encinas con alto grado de afectación y existe ganado bovino que se desplaza por la finca.

Por otro lado, la aparición de nuevos instrumentos de medición en campo, como el sensor DUALEX®, que determina la concentración de clorofila, flavonoles y antocianinas en las hojas en tiempo real y de forma no destructiva, con la precisión de los análisis clásicos de laboratorio (CEROVIC et al. 2015), podría suponer un importante método para evaluar con precisión la salud de los árboles tratados a lo largo del tiempo.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de los tratamientos químicos de enmienda caliza, inyecciones de fosetil aluminio y su combinación en el control de la enfermedad de podredumbre radical en un encinar afectado por *P. cinnamomi*. Se evaluará el estado fitosanitario de los árboles seleccionados, antes y 6 meses después de la aplicación de los tratamientos, mediante utilización de parámetros de estrés (concentración de clorofila, flavonoles, antocianinas e índice NBI) y se evaluarán los cambios en el porcentaje de defoliación de los árboles tras la aplicación de los tratamientos.

3. Metodología

3.1 Selección de individuos para el ensayo.

Se seleccionaron un total de 80 encinas (*Quercus ilex* L.) en un área de aproximadamente 4 ha de la finca. La zona tiene una parte adehesada, con menor espesura arbórea y una zona de pasto, sin fuertes pendientes ni alta pedregosidad, y otra parte más naturalizada, con mayor espesura y variedad de especies arbóreas y de sotobosque, mayor irregularidad en el terreno y grandes afloramientos rocosos. La selección y marcaje de cada individuo se llevó a cabo en el mes de agosto. Se tomaron las coordenadas GPS de cada individuo seleccionado y se marcaron con un crotal.

Se escogieron árboles con distintos grados de severidad, según el porcentaje de defoliación que presentaban, observada *in situ*. Para ello, se clasificó el grado de severidad en cinco grupos: Severidad 0 (0-10% de defoliación); Severidad 1 (11-25%); Severidad 2 (26-50%); Severidad 3 (51- 75%); Severidad 4 (>75%) (SÁNCHEZ et al. 2003; ROMERO et al. 2007) (Figura 1). Se seleccionaron 20 encinas por grado de severidad 0, 1, 2 y 3, repartidas en el área de estudio.

Para este ensayo no se eligieron árboles que tuvieran un grado de afección superior al 75%, pues se consideró que los individuos en un estado muy grave no tendrían capacidad de respuesta antes los tratamientos.



Figura 1. Imágenes de encinas con distintos grados de defoliación: a. Severidad 0 (0-10%); b. Severidad 1 (11-25%); c. Severidad 2 (26-50%); d. Severidad 3 (51- 75%); e. Severidad 4 (>75%).

3.2 Tratamientos aplicados.

En el mes de octubre se aplicaron los siguientes tratamientos: enmienda (se aplicó solo la enmienda caliza); fosfato (se aplicó solo endoterapia); enmienda + fosfato (se aplicó combinación de enmienda caliza y endoterapia); control (no se aplicó ningún tratamiento). Se asignaron 20 encinas de todas las categorías de defoliación a cada tratamiento, y distribuidas homogéneamente en ambas zonas, adehesada y seminaturalizada.

La enmienda caliza consistió en la aplicación de una mezcla de un 50% de dolomita, compuesta por carbonato cálcico y magnesio $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$, y un 50% de sulfato cálcico $[\text{CaSO}_4]$. La enmienda se aplicó manualmente sobre el suelo, esparciéndose de manera homogénea alrededor del área ocupada por la superficie de la copa del árbol, y calculando previamente la cantidad a aplicar en cada árbol en base a la cantidad recomendada de 1.500 kg/ha (SERRANO et al. 2011) que impide generar cambios bruscos de pH o excedentes de calcio en el suelo (CARBONERO et al. 2021).

La endoterapia consistió en una inyección al tronco con el producto fitosanitario fosetil aluminio al 4% (Aliette N.º registro 15.907). Se aplicaron mediante inyectoras a una altura aproximada de 50 cm sobre el nivel del suelo. Las dosis empleadas por árbol variaron en función del perímetro del tronco, suministrando una dosis por cada 15-20 cm de perímetro y aplicándose a distancias homogéneas entre puntos de inyección. Los inyectores se mantuvieron insertos en el tronco durante un par de horas para asegurar la total absorción del producto.

3.3 Evaluación del grado de afectación y de indicadores de estrés de los árboles.

Se estudió el grado de afectación o severidad de cada árbol un mes antes y 6 meses después de la aplicación de los tratamientos. Se observó *in situ* el grado de severidad de cada árbol asignando un valor entre 0, 1, 2, 3 o 4, según se ha descrito anteriormente y se determinó el porcentaje de defoliación con la media de al menos 2 observadores.

Para el estudio de los indicadores de estrés, se ha utilizado el sensor DUALEX®, que mide la concentración de clorofila de la hoja ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) mediante una relación de transmitancia en dos longitudes de onda diferentes, una en el rojo lejano absorbido por la clorofila y otra en el infrarrojo cercano como referencia. Además, gracias a una relación diferencial de fluorescencia de clorofila, es capaz de medir el contenido de flavonoles (una clase de flavonoides) y antocianinas de la epidermis de las hojas. También proporciona el índice de NBI (Nitrogen Balanced

Index) como indicador del estado de nitrógeno de la planta (FORCE-A DUALEX® 2019). Es una técnica de medición no destructiva, que proporciona información a tiempo real del estado de la planta (PADILLA et al. 2018). Las mediciones se realizaron antes de la aplicación de los tratamientos y tras 6 meses del inicio del ensayo a 10 hojas por árbol, encontrándose la mitad de ellas en orientación de solana y la otra mitad en umbría.

3.4 Análisis estadístico.

Para la evaluación de la sensibilidad de mediciones de DUALEX®, concentración de clorofilas, flavonoles, antocianinas y en el índice NBI a los niveles de la severidad de defoliación en el momento previo a la aplicación de los tratamientos, se utilizó un modelo generalizado mixto incluyendo el identificador del árbol como variable jerárquica, ya que no se cumplieron los requisitos para utilizar modelos lineales de normalidad, comprobado con el test de Shapiro, ni de homocedasticidad, comprobada con el test de Levene. Igualmente, el efecto en estos parámetros bioquímicos de la severidad inicial y de los tratamientos se analizó con modelos generalizados mixtos utilizando el identificador del árbol como variable jerárquica. Los modelos se ajustaron con la función *glmer* del paquete *lme4* (BATES et al. 2015).

La severidad de defoliación a los seis meses de los tratamientos se analizó con un modelo multinomial considerando como variables independientes el nivel de defoliación inicial y los tratamientos con la función *multinom* del paquete *nnet* (VENABLES & RIPLEY 2002).

Todos los análisis se realizaron con Rproject versión 4.2.2 (R CORE TEAM 2022).

4. Resultados

4.1 Sensibilidad de las mediciones con DUALEX® en la detección de los niveles de severidad de la afectación.

En las mediciones realizadas a los árboles antes de la aplicación de los tratamientos, entre los niveles de severidad no hubo diferencias estadísticas en la concentración de clorofilas, flavonoles, antocianinas y tampoco en el índice NBI de los valores pretratamiento (Tabla 1).

Tabla 1. Concentración (media $\pm$ SE) de clorofilas, flavonoles, antocianinas e índice NBI (valores DUALEX®) y valores de χ^2 y p en función del nivel de severidad.

Severidad 0	Severidad 1	Severidad 2	Severidad 3	χ^2 ; p		
Clorofilas	40,6 $\pm$ 0,7	42,8 $\pm$ 0,6	40,9 $\pm$ 0,5	42,3 $\pm$ 0,5	χ^2	² =0,599; p=0,897
Flavonoles	1,75 $\pm$ 0,02	1,79 $\pm$ 0,01	1,78 $\pm$ 0,01	1,80 $\pm$ 0,01	χ^2	² =1,2553; p=0,739
Antocianinas	0,154 $\pm$ 0,002	0,157 $\pm$ 0,002	0,144 $\pm$ 0,002	0,155 $\pm$ 0,002	χ^2	² =3,26; p=0,351
NBI	23,2 $\pm$ 0,4	23,9 $\pm$ 0,3	23,0 $\pm$ 0,3	23,6 $\pm$ 0,3	χ^2	² =0,67; p=0,879

4.2 Efecto de los tratamientos para el control de la enfermedad de podredumbre radical.

A los 6 meses de aplicación del tratamiento se observó que, a mayor nivel de severidad inicial, se produjo una mayor severidad final (χ^2 =83,4; p<0,001; Figura

2), siendo este efecto independiente del tratamiento aplicado (sin interacción severidad inicial $\times$ tratamiento $\chi^2=7,90$; $p=0,79$). Sin embargo, los tratamientos influyeron significativamente en el nivel de severidad alcanzada a los 6 meses ($\chi^2=26,4$; $p=0,0094$). En este sentido, árboles inicialmente sanos (severidad=0) a los 6 meses presentaron un 50% de probabilidad de enfermar y presentar algún nivel de defoliación en todos los tratamientos menos cuando el tratamiento fue la endoterapia, en el cual ningún árbol inicialmente sano enfermó. Además, el nivel de defoliación a los 6 meses de estos árboles inicialmente sanos y que luego presentaron síntomas, medido como un aumento en el nivel de defoliación, también dependió del tratamiento. En los tratamientos control y enmienda aproximadamente el 25% de los árboles inicialmente sanos pasaron a tener severidad 1 y el otro 25% a severidad 2, sin que se encontraran árboles con severidad 2 cuando ambos tratamientos se aplicaron conjuntamente (enmienda + fosfato).

Igualmente, en árboles inicialmente enfermos, la probabilidad de aumentar el nivel de defoliación fue mayor en el control. Este patrón fue muy similar al encontrado con los árboles tratados con enmienda. Por el contrario, la probabilidad de aumentar el nivel de defoliación fue mucho menor cuando se aplicaron ambos tratamientos y, especialmente, cuando el tratamiento aplicado fue fosfato.



Figura 2. Proporción de árboles agrupados por severidad de defoliación a los seis meses de los tratamientos en función del nivel de severidad inicial.

En la Figura 3 se muestra el porcentaje de árboles que experimentaron cambios en el grado de defoliación. El 55% de los árboles mantuvieron su estado inicial de defoliación, un 17 % empeoró su estado y un 28% presentó un menor grado de defoliación que el observado al inicio del ensayo.

Del 28% de los árboles en los que se observó un menor grado de defoliación

respecto al inicial (Fig. 3), se determinó en qué porcentaje se puede atribuir este efecto a cada tratamiento (Fig. 4). Este análisis nos muestra que los mayores porcentajes de mejoría se obtuvieron con la aplicación de fosfatos en el tronco del árbol (43%) y con la combinación de enmienda+fósforo (33%).

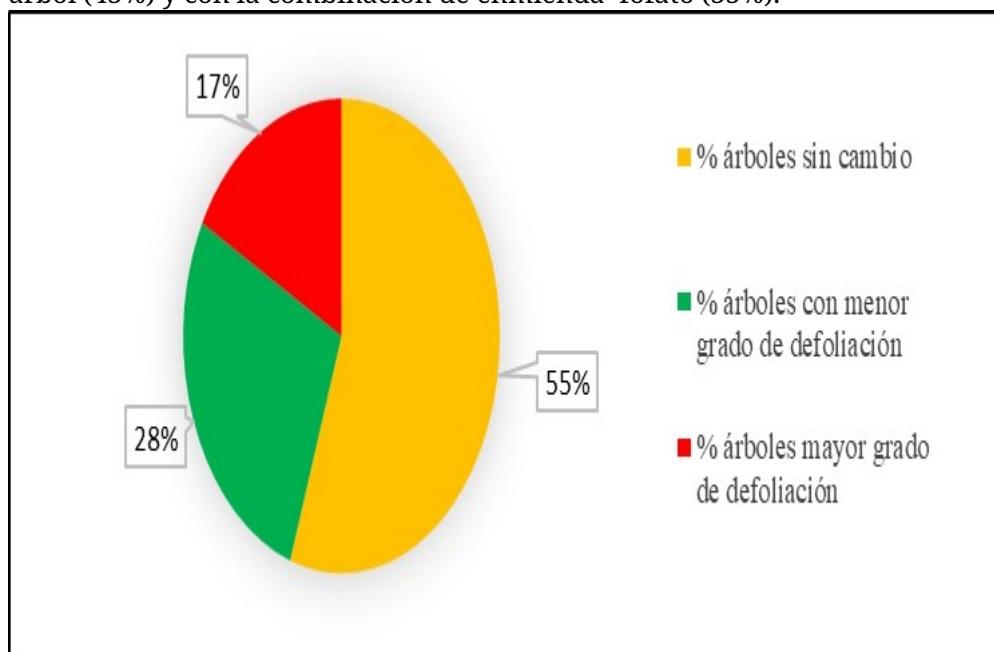


Figura 3. Porcentaje de árboles con mayor, menor o sin cambios en su estado de defoliación tras seis meses de aplicación de los tratamientos, en relación a su estado inicial.

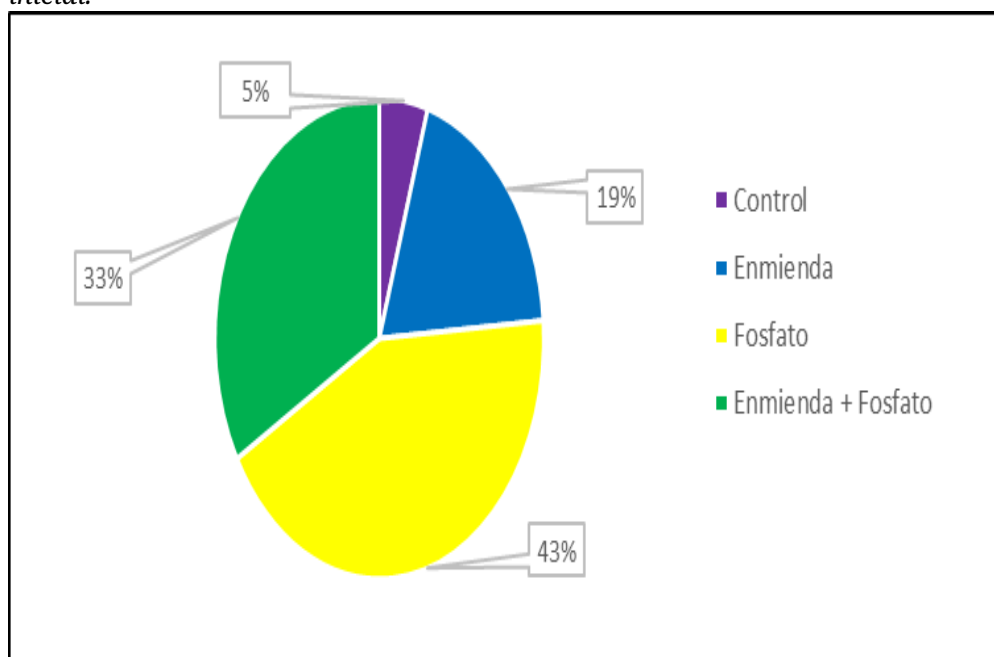


Figura 4. Efecto porcentual de cada tratamiento en aquellos árboles que ha mejorado su estado de defoliación, tras seis meses de su aplicación.

En el análisis estadístico que se realizó con los valores obtenidos en la medición con DUALEX® a los seis meses de la aplicación de los tratamientos no se observaron diferencias estadísticas entre los diferentes tratamientos para ninguno de los



compuestos estudiados. La concentración de clorofilas no difirió significativamente ni en función del nivel de severidad inicial ni en función del tratamiento, presentando un promedio general de $53,3 \pm 0,23$ uds DUALEX®. Igualmente, tampoco difirió la concentración de flavonoles (promedio general de $1,765 \pm 0,002$ uds DUALEX®), ni la concentración de antocianinas ($0,141 \pm 0,001$ uds DUALEX®), ni el índice NBI ($30,3 \pm 0,1$ uds DUALEX®) ($p > 0,60$ en todos los casos; datos no mostrados).

5. Discusión

El sensor DUALEX® proporciona datos cuantitativos y objetivos, minimizando la subjetividad que puede influir en las evaluaciones visuales. En otras especies se ha visto que es capaz de medir con precisión pequeños cambios en los parámetros fisiológicos, como la disminución de la concentración de clorofila o el aumento de la concentración de flavonoles, asociados con el estrés o enfermedades (CHAVES et al. 2011; SERRANO et al. 2012; DI FERDINANDO et al. 2012). Por ello se ha indicado que este sensor puede ser una herramienta muy útil para identificar estrés o desequilibrios antes de que aparezcan síntomas visuales evidentes, permitiendo una intervención más rápida. Otra de las ventajas de este sensor sería que permite realizar mediciones rápidas directamente en el campo, sin necesidad de tomar muestras (destrutivo) ni realizar análisis en laboratorio.

Sin embargo, nuestros resultados en encina indican que este sensor no fue capaz de detectar diferencias significativas en ninguno de los parámetros analizados y diferenciar entre encinas sanas y enfermas, y tampoco de detectar diferencias entre los tratamientos realizados. La falta de respuesta en los parámetros medidos por el DUALEX® podría deberse a varios factores relacionados con la fisiología de las encinas, las características de la enfermedad y las limitaciones de los parámetros medidos.

La encina es una especie altamente resistente a condiciones de estrés, incluyendo enfermedades, sequía y suelos pobres. Esta resiliencia puede hacer que los cambios fisiológicos sean más sutiles o menos evidentes en comparación con otras especies menos adaptadas, incluso si están enfermas. Al ser una especie de desarrollo lento, las plantas pueden aclimatarse, manteniendo niveles fisiológicos relativamente estables. De hecho, las encinas pueden mantener niveles normales de clorofila y antioxidantes mediante ajustes en su metabolismo (WESTERVELD et al. 2004; SERRANO et al. 2012).

Otro de los posibles motivos podría ser que esta enfermedad afecta a solo ciertas áreas del árbol (por ejemplo, raíces y ramas concretas), sin impactar notablemente los tejidos fotosintéticos vivos que fueron los medidos con el sensor. Por otro lado, puede que los parámetros que mide el DUALEX® no se vean afectados por esta enfermedad. En otro estudio tampoco han encontrado efectos de este patógeno ni en las concentraciones de clorofila ni antocianinas en esta especie (SAN-EUFRASIO et al. 2021).

Finalmente, los factores ambientales (suelo, disponibilidad de agua, exposición al sol) pueden tener un impacto mayor en los parámetros medidos que la enfermedad misma, enmascarando las diferencias entre árboles sanos y enfermos.

El grado de daño del árbol en el momento de aplicación de los tratamientos es clave en la respuesta (OLIVA et al. 2023). Cuanto mayor es el nivel de defoliación inicial menor potencial para la recuperación de los árboles. Este hecho enfatiza la

necesidad de realizar un seguimiento continuo de las masas con el objetivo de identificar síntomas de estrés antes de que alcancen niveles de daño elevados y puedan ser aplicados tratamientos preventivos contra la podredumbre radical.

A pesar del corto periodo de evaluación, tan solo 6 meses, se detectaron efectos beneficiosos en el nivel de defoliación de los árboles en todos los tratamientos. Los beneficios de cualquier tratamiento, endoterapias, enmiendas calizas o tratamientos foliares frente a la inactividad se ha demostrado ampliamente (GONZÁLEZ et al. 2020; ÁVILA et al. 2022; WALTON & SMITH 2022; SERRANO et al. 2023). Más aún, en dicha revisión no encontraron tratamientos que perjudicara el desempeño de los árboles. Igualmente, nuestros resultados refuerzan la necesidad de realizar tratamientos fitosanitarios tanto preventivos como curativos para reducir los efectos de la enfermedad.

Los resultados de este experimento sugieren que la herramienta más eficaz para enfrentar a este patógeno, especialmente cuando ya se detectan efectos negativos en el vigor de los árboles (tratamiento curativo) es la endoterapia. Nuestro resultado es consistente con la generalidad de la literatura ya que la alta eficacia de la endoterapia frente a otros tratamientos aparece de forma frecuente en otros trabajos (WALTON & SMITH 2022), habiéndose también demostrado su beneficio en diversas especies leñosas. Todo ello valida los resultados obtenidos incluso en cortos periodos de evaluación.

La enmienda fue el tratamiento de menor eficacia en todos los casos, sin embargo, mejoró el pronóstico tanto de árboles afectados como sanos respecto a no hacer nada (controles). Posiblemente, el tiempo de evaluación (6 meses) no fue suficiente para la incorporación de la enmienda caliza al suelo o que, a pesar de haberse incorporado en el suelo, los árboles todavía no la hubieran absorbido. La enmienda caliza necesita humedad para disolverse y reaccionar con el suelo, así bajos niveles de humedad edáfica retrasan el proceso de incorporación al suelo (FILIPPI 2017) y, consecuentemente, su posterior absorción por la planta.

Finalmente, la combinación de ambas técnicas produjo resultados también altamente beneficiosos, solo ligeramente más bajos que la endoterapia como tratamiento único. La combinación de tratamientos diversos ha mostrado ser más eficaz que los tratamientos individuales en otros casos (WALTON & SMITH 2022). Como se ha indicado previamente, la baja eficacia de la enmienda a corto plazo podría explicar una menor eficacia de tratamientos combinados en este experimento.

La validación de los tratamientos, especialmente en lo referente a la caliza y sus combinaciones con otros tratamientos, requiere de una evaluación a más largo plazo. Los futuros resultados contribuirán a determinar de forma más específica recomendaciones concretas para cada tipo de tratamiento preventivo o curativo.

6. Conclusiones

El manejo de las enfermedades, como la podredumbre radical, representa un desafío constante en el sector forestal, ya que cada área afectada presenta diferentes condiciones y características y necesita diferentes estrategias de control. El decaimiento forestal de quercíneas debido a *Phytophthora cinnamomi* es un grave problema que debe ser abordado desde una perspectiva tanto preventiva como curativa. El tratamiento temprano, en zonas con árboles con bajos niveles de daño foliar, o en zonas con árboles sin síntomas evidentes del entorno de áreas afectadas, es primordial para reducir los impactos negativos de este patógeno.



Nuestros resultados preliminares, tras un corto periodo de evaluación de seis meses, sugieren una mejoría del arbolado ante la endoterapia o la combinación de endoterapia más enmienda. Sin embargo, se requiere un tiempo de seguimiento a más largo plazo para validar los resultados y para poder detectar posibles efectos retardados de la eficacia de las enmiendas. Para una correcta valoración de los efectos de los tratamientos aplicados, es necesario continuar su evaluación por un periodo más largo de tiempo, lo que permitiría confirmar los resultados y poder dar una respuesta segura ante la seca.

Agradecimientos

Proyecto FITÓFTORA MADRID de QUERCUSCARE S.L. (Ayuda INNOBONOS 2023, financiada por IMIDRA para proyectos empresariales de I+D+i). Proyectos PDR19-SECOMA y FP24-RESTAURA MADRID, financiados por IMIDRA. M. Contreras fue beneficiaria de una ayuda para formación del IMIDRA. Agradecemos a Ana M^a Carracedo Andrés (Parque Regional de la Cuenca Alta del Manzanares. Consejería de Medio Ambiente, Agricultura e Interior. Comunidad de Madrid) su colaboración y apoyo.

7. Bibliografía

- ANDRADE LOURENÇO; D.; BRANCO, I.; CHOUPINA, A.; 2022.A systematic review about biological control of phytopathogenic *Phytophthora cinnamomi*. Mol. Biol. Rep., 49, 9947–9962.<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11033-022-07547-2>
- ÁVILA, A.; SANCHÓ, S.; SANTACRUZ, F.; LÓPEZ-CARRASCO, C.; ESPINOSA, M.; 2022. Tratamientos de prevención y control contra la podredumbre radical causada por *Phytophthora cinnamomi* en dehesas de encina. 8º Congreso Forestal Español. Ed. Sociedad Española de Ciencias Española. Lleida. ISBN 978-84-941695-6-4.
- BATES, D.; MAECHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S.; 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. J. Stat. Softw., 67(1), 1-48. doi:10.18637/jss.v067.i01.
- BEAKES, G.W.; GLOCKLING, S.L.; SEKIMOTO, S.; 2012. The evolutionary phylogeny of the oomycete “fungi”. Protoplasma, 249, 3–19. DOI: 10.1007/s00709-011-0269-2
- BRASIER, C.M.; ROBREDO, F.; FERRAZ, J.F.P.; 1993.Evidence for *Phytophthora cinnamomi* involvement in Iberian oak decline.Plant Pathol., 42(1), 140–145.
- CARBONERO, M.D.; SILLERO, M.L.; BARBACHO, J.J.; AVILA, A.; 2021. Las fertilizaciones cálcicas y su aplicación para el control de la podredumbre radical del arbolado en la dehesa. Hinojosa del Duque: Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera.1-34 pp.
- CARDILLO, E.; FERNÁNDEZ-SANTOS, A.M.; RODRÍGUEZ-MOLINA, M.C.; 2019. Gestión y prevención de Fitóftora en alcornocales y encinares. CICYTEX. Mérida, Badajoz. 1-15 pp.
- CARDILLO, E.; ABAD, E.; MEYER, S.; 2021. Iberian oak decline caused by *Phytophthora cinnamomi*: A spatiotemporal analysis incorporating the effect of host heterogeneities at landscape scale.For. Pathol.,51(2), e12667.
- CEROVIC Z.G.; GHOZLEN N.B.; MILHADE C.; OBERT M.; DEBUISSON S.; MOIGNE M.; 2015. Nondestructive diagnostic test for nitrogen nutrition of grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on dual-ex leaf-clip measurements in the field. J Agric Food Chem. 63(14):3669-80. doi: 10.1021/acs.jafc.5b00304.
- COBOS, J. M.; MONTOYA, R.; TUSET, J. J. 1993, New damage to the Quercus woodlands in Spain. Preliminary evaluation of the possible implication of



Phytophthora cinnamomi. Proc. Int. Congress "Recent Advances in Studies on Oak Decline". Dipart. di Patología Vegetale, Università degli Studi, Bari (Italia). 163-169 pp.

CORCOBADO, T.; CUBERA, E.; MORENO, G.; SOLLA, A.; 2013. *Quercus ilex* forests are influenced by annual variations in water table, soil water deficit and fine root loss caused by *Phytophthora cinnamomi*. Agric. For. Meteorol., 169, 92–99.

CUENCA, B.; RUEZ, L.; GRAGERA, J.; BERDÓN, J.; LUQUERO, L.; OCAÑA, L.; SOLLA, A.; 2017. Mejora de alcornoques y encinas de Extremadura ante *Phytophthora cinnamomi*: selección de genotipos resistentes. In Actas del 7º Congreso Forestal Español, (pág. 8). Plasencia (España). <https://doi.org/7CFE01-289>.

CHAVES, I.; PASSARINHO J.A.; CAPITÃO, C.; CHAVES M.M.; FEVEREIRO, P.; CÂNDIDO R.; 2011. Temperature stress effects in *Quercus suber* leaf metabolism. J. Plant Physiol., 168(15):1729-34. doi: 10.1016/j.jplph.2011.05.013

DI FERDINANDO, M.; BRUNETTI, C.; FINI, A.; TATTINI, M.; 2012. Flavonoids as antioxidants in plants under abiotic stresses. Abiotic stress responses in plants: metabolism, productivity and sustainability. Springer. 159-179. Nueva York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0634-1_9

FILIPPI, R. D.; 2017. Enmiendas calcáreas. Plan Lechero Watt's/CORFO. 1-8 pp. Temuco, Chile.

FORCE-A DUALEX. (2019). <https://www.force-a.com/wp-content/uploads/2019/09/BROCHURE-DUALEX-1.pdf>

GARCÍA MORENO, A.M.; FERNÁNDEZ REBOLLO, P.; ORTIZ BERROCAL, F.; CARBONERO MUÑOZ, M.D.; 2016. Podredumbre radical, descripción y control aplicado a los ecosistemas de dehesa. Junta de Andalucía. Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul. 1-56 pp.

GONZÁLEZ, M.; CAETANO, P.; SÁNCHEZ, M.E.; 2017. Testing systemic fungicides for control of *Phytophthora* oak root disease. For. Pathol., 47, e12343. <https://doi.org/10.1111/efp.12343>

GONZÁLEZ, M.; ROMERO, M.Á.; SERRANO, M.S.; SÁNCHEZ, M.E.; 2020. Fosetyl-aluminium injection controls root rot disease affecting *Quercus suber* in southern Spain. Eur. J. Plant Pathol., 156(1), 101–109.

HARDHAM, A.; BLACKMAN, L.; 2018. *Phytophthora cinnamomi*. Mol. Plant Pathol., 19, 260-285. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/mpp.12568>

JUNG, T.; COLQUHOUN, I.J.; HARDY, G.E.S.J.; 2013. New insights into the survival strategy of the invasive soilborne pathogen *Phytophthora cinnamomi* in different natural ecosystems in Western Australia. For. Pathol., 43, 266–288.

KÖHL, J.; KOLNAAR, R.; RAVENSBERG, W.J.; 2019 Mode of Action of Microbial Biological Control Agents against Plant Diseases: Relevance Beyond Efficacy. Front Plant Sci., 10:845. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00845>

LOWER, S.; BROWNE, M.; BOUDJELAS, S.; & POORTER, M.D.; 2000. 100 of the world's worst invasive alien species. A selection from the Global Invasive Species Database. The Invasive Species Specialist Group (ISSG) a specialist group of the Species Survival Commission (SSC) of the World Conservation Union (IUCN).

OLIVA, B.; GARCÍA, J.; CAMISÓN, A.; SOLLA, A.; 2023. Preventive and curative effects of phosphite spray and soil amendments against *Phytophthora cinnamomi* in *Quercus ilex* and *Q. suber* seedlings. Cuad. Soc. Esp. Cienc. For. 49(1): 87-104. DOI:



<https://doi.org/10.31167/csecfv5i49.19937>

PADILLA, F. M.; GALLARDO, M.; PEÑA-FLEITAS, M.T.; DE SOUZA, R.; THOMPSON, R.B.; 2018. Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: A review. *Sensors*, 18(7), 2083. <https://doi.org/10.3390/s18072083>

R CORE TEAM; 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. <https://www.R-project.org/>.

RIVAS MARTÍNEZ, S.; 1987. Memoria del mapa de series de vegetación de España 1: 400.000. 268 pp. ICONA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. ISBN 84-85496-25-6

RÍOS, P.; OBREGÓN, S.; GONZÁLEZ, M.; HARO, A.D.; SÁNCHEZ, M.E.; 2016. Screening brassicaceous plants as biofumigants for management of *Phytophthora cinnamomi* oak disease. *For. Pathol.*, 46(6): 652-659. <https://doi.org/10.1111/efp.12287>

ROMERO, M.A.; SÁNCHEZ, J.E.; JIMÉNEZ, J.J.; BELBAHRI, L.; TRAPERO, A.; LEFORT, F.; SÁNCHEZ, M. E.; 2007. New *Pythium* taxa causing root rot on Mediterranean *Quercus* species in southwest Spain and Portugal. *J. Pathol.* 155, 289–295. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2007.01230.x>

ROMERO, M.; GONZÁLEZ, M.; SERRANO, M.; SÁNCHEZ, M.; 2019. Trunk injection of fosetyl-aluminium controls the root disease caused by *Phytophthora cinnamomi* on *Quercus ilex* woodlands. *Ann. Appl. Biol.* 174(3), 313-318. <https://doi.org/10.1111/aab.12503>

RUÍZ-GALEA, M.; MOSTAZA-COLADO, D.; ÁVILA, A.; VALLADARES, S.; MARTÍNEZ, V.; BLASCO-FERNÁNDEZ, F.; CARDO, L.; HERNÁNDEZ, I.; CARREÑO, F.; 2022. Estudio de focos de seca de encinas en la Comunidad de Madrid y detección de árboles sobrevivientes para la obtención de variedades tolerantes. *SECOMA. 8º Congreso Forestal Español*. Ed. Sociedad Española de Ciencias Española. Lleida. ISBN 978-84-941695-6-4.

SÁNCHEZ, M.E.; CAETANO, P.; FERRAZ, J.; TRAPERO, A.; 2002. *Phytophthora* disease of *Quercus ilex* in south-western Spain. *For. Pathol.*, 32, 5-18. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0329.2002.00261.x>

SÁNCHEZ, M.E.; SÁNCHEZ, J.E.; NAVARRO, R.M.; FERNÁNDEZ-REBOLLO, P.; TRAPERO, A.; 2003. Incidencia de la podredumbre radical causada por *Phytophthora cinnamomi* en masas de *Quercus* en Andalucía. *Bol. San. Veg. Plagas*, 29: 87-108.

SAN-EUFRASIO, B.; CASTILLEJO, M.Á.; LABELLA-ORTEGA, M.; RUIZ-GÓMEZ, F.J.; NAVARRO-CERRILLO, R.M.; TIENDA-PARRILLA, M.; JORRÍN-NOVO, J.V.; REY, M.D.; 2021. Effect and Response of *Quercus ilex* subsp. *ballota* [Desf.] Samp. Seedlings From Three Contrasting Andalusian Populations to Individual and Combined *Phytophthora cinnamomi* and Drought Stresses. *Front. Plant Sci.* 19:12:722802. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.722802>

SERRANO, M.S.; FERNÁNDEZ-REBOLLO, P.; SÁNCHEZ, M.E.; 2011. La fertilización cálcica para el control de la podredumbre radical de la encina. *Vida rural*, 335, 14-19

SERRANO, M.S.; VITA, P.D.; FERNÁNDEZ-REBOLLO, P.; HERNÁNDEZ, M.E.; 2012. Calcium fertilizers induce soil suppressiveness to *Phytophthora cinnamomi* root rot of *Quercus ilex*. *Eur. J Plant Pathol.* 132, 271–279.



<https://doi.org/10.1007/s10658-011-9871-6>

SERRANO, M.S.; LEAL, R.; DE VITA, P.D.; FERNÁNDEZ-REBOLLO, P.; SANCHEZ, M.E.; 2014. Control of *Phytophthora cinnamomi* by soil application of calcium fertilizers in a Dehesa ecosystem in Spain. IOBC-WPRS Bulletin, 101, 139-143.

SERRANO, M.S.; ROMERO, M.A.; GÓMEZ-APARICIO, L.; 2020. Climate change impacts on *Phytophthora cinnamomi* population in a Mediterranean mixed oak forest. IOBC-WPRS Bulletin 152: 138-144.

SERRANO, M.S.; GONZÁLEZ, M.; ROMERO, M.Á.; ALCONERO, M.R.; SÁNCHEZ, M.E.; 2023. Mineral nutrients improve phosphonate effectiveness against cork oak root disease. For. Ecol. Manage. 543, 121152. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121152>.

SOLLA, A.; MORENO, G.; MALEWSKI, T.; JUNG, T.; KLISZ, M.; TKACZYK, M.; SIEBYLA, M.; PÉREZ, A.; CUBERA, E.; HRYNYK, H.; SZULC, W.; RUTKOWSKA, B.; MARTÍN, J. A.; BELBAHRI, L.; OSZAKO, T.; 2021. Phosphite spray for the control of oak decline induced by *Phytophthora* in Europe. For. Ecol. Manag., 485, 118938. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118938>.

VENABLES, W.N.; RIPLEY, B.D.; 2002. Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0

WALTON A.; SMITH A.R.; 2022. How effective are methods to induce or facilitate the natural resistance of temperate trees to exotic *Phytophthora* species? A systematic review, Arboricultural Journal, 44:3, 140-162, DOI: 10.1080/03071375.2022.2085917

WESTERVELD, S.M.; MCKEOWN, A.W.; MCDONALD, M.R.; SCOTT-DUPREE, C.D.; 2004. Assessment of chlorophyll and nitrate meters as field tissue nitrogen tests for cabbage, onions, and carrots. HortTechnol., 14(2), 179-188.