



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-498

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Análisis espacial de la evolución del decaimiento de *Quercus*: relación con las estructuras lineales del paisaje

ABELLANAS OAR, B.¹, FERNÁNDEZ REBOLLO, P.¹, HIDALGO FERNÁNDEZ, M.T.¹, LEAL MURILLO, J.R.¹, CARBONERO MUÑOZ M.D.², GONZÁLEZ DUGO, M.P.³

¹ Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba

² IFAPA. Centro Hinojosa del Duque, Córdoba. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía.

³ IFAPA. Centro Alameda del Obispo, Córdoba. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía.

Resumen

Se estudia la evolución de los focos de podredumbre radical de *Quercus* en dehesas del SO peninsular a partir de la determinación visual retrospectiva de focos sobre fotografía aérea, partiendo de focos de *Phytophthora cinnamomi* conocidos. Se utilizan fotografías aéreas que cubren gran parte del período de dispersión de la enfermedad: 1980, 1998 y 2009. Se analiza la densidad y estructura espacial de las áreas afectadas identificadas y su evolución en el tiempo. Se estudia la relación espacial de los focos con dos de las estructuras lineales más relevantes del paisaje y posibles vías de dispersión de la enfermedad: los cursos de agua y las vías de comunicación humanas. Los resultados obtenidos señalan que la incidencia de los daños en el área estudiada ha aumentado exponencialmente durante el período considerado. La distribución espacial de los focos presenta agrupación, predominando aún el patrón espacial generado por los focos originales. Se observa una asociación significativa entre los focos del último muestreo (2009) y las vías de comunicación, no ocurriendo lo mismo con los cursos de agua, lo que parece indicar un mayor peso de la actividad humana sobre la dispersión de la enfermedad frente a los factores de dispersión de carácter ambiental.

Palabras clave

Phytophthora cinnamomi, dehesa, dispersión espacial territorial, decaimiento forestal

1. Introducción

La podredumbre radical provocada por el oomiceto *Phytophthora cinnamomi* es una de las principales causas del decaimiento que se observa desde hace varias décadas en árboles de las dehesas de *Quercus* del cuadrante suroccidental de la península Ibérica (BRASIER *et al.* 1993; BRASIER 1996; GALLEGO *et al.* 1999; SÁNCHEZ *et al.* 2002, 2006, SERRANO *et al.* 2013, SAMPAIO *et al.* 2013; CORCOBADO *et al.* 2013). Fenómenos similares se han observado en otros lugares del mundo provocados por esta u otras especies del género (LARKIN *et al.* 1995, RISTAINO y GUMPERTZ 2000, RIZZO *et al.* 2002; LIU *et al.* 2007, JIANG *et al.* 2016) En la expansión de la enfermedad hay muchos factores implicados que hacen complejo su análisis y control (ERWIN y RIBEIRO, 1996; SÁNCHEZ *et al.* 2002). Existen múltiples especies hospedantes, tanto leñosas como herbáceas, que conviven en estos sistemas. Las vías de propagación son variadas, tanto por cauces naturales (flujos hídricos o aéreos o vectores bióticos) como por la actividad humana, a través de la movilización de suelo o material vegetal infectado. Por ello, la lucha contra la enfermedad debe abordarse también desde distintos ámbitos: el manejo del material vegetal, los tratamientos culturales y fitosanitarios de

los sistemas, la gestión de los recursos hídricos a diversas escalas o la vigilancia de los movimientos humanos que puedan estar ligados a la expansión de la enfermedad, y éstos no siempre directamente relacionados con el manejo del sistema dehesa, como el uso recreativo u otros.

El análisis espacial de las áreas afectadas y su evolución en el tiempo es una herramienta de gran utilidad para investigar los factores más relevantes implicados en la propagación de la enfermedad a diversas escalas espaciales. A pequeña escala puede ser útil para avanzar en el conocimiento de los procesos de propagación entre plantas vecinas o en relación a las características geoestructurales que pueden predisponer a determinados microhábitat al desarrollo de la enfermedad (HOLDENRIEDER, 2004). A escala de paisaje resulta de gran interés para detectar las principales vías de dispersión a larga distancia. Los patrones espaciales de los fenómenos biológicos o de la presencia de especies constituyen una de las características ecológicas más relevantes para el estudio de los mismos, pues son el resultado final de todos los factores implicados, tanto biológicos como ambientales, que determinan las pautas de dispersión y establecimiento (RISTAINO y GUMPERTZ, 2000; CARDILLO *et al.*, 2009). El análisis espacial es útil también para evaluar, a posteriori, los resultados de posibles medidas de control contra la enfermedad (GOHEEN *et al.* 2009). Los recientes avances metodológicos están facilitando cada vez más la realización de estudios espacialmente explícitos de las relaciones entre huéspedes y patógenos a gran escala, que permiten añadir, al tradicional análisis de corto alcance, la influencia de nuevos factores en los procesos de dispersión que actúan a escalas más globales (LARKIN *et al.* 1995; RISTAINO y GUMPERTZ, 2000; HOLDENRIEDER *et al.*; 2004; LIU *et al.* 2007; CARDILLO *et al.* 2009; PETERSON *et al.*, 2014).

La creciente expansión del decaimiento de árboles del género *Quercus* en las dehesas del suroeste peninsular y la constatación de que, en gran medida, está causado por *P. cinnamomi*, aconseja investigar sobre las principales vías de propagación a larga distancia que están actuando con el fin de poder diseñar medidas eficaces de lucha contra la enfermedad, no sólo a escala de explotación, sino también a escala de planificación territorial. En este aspecto, el análisis espacio-temporal de la presencia de focos se presenta como una de las mejores herramientas a emplear.

1. Objetivos

El objetivo general del trabajo es caracterizar espacio-temporalmente y a escala de paisaje el fenómeno de decaimiento provocado, en gran medida, por la acción del oomiceto *P. cinnamomi* en las dehesas del suroeste de la península Ibérica con el fin de orientar el diseño de posibles medidas de lucha a escala territorial.

Como objetivos específicos se plantean:

-Cuantificar la evolución temporal del grado de afectación de la zona de estudio durante el período de expansión de la enfermedad

-Estudiar la estructura espacial de los focos detectados y, en concreto, analizar la relación espacial de los mismos con dos de las estructuras lineales más relevantes del paisaje y posibles vías de dispersión de la enfermedad: los cursos de agua y las vías de comunicación humanas.

2. Metodología

Zona de estudio

La zona de estudio está constituida por las áreas de dehesa localizadas y georreferenciadas mediante fotointerpretación a partir de ortofotografías aéreas de los años 1980, 1989 y 2009 en la zona occidental de la provincia de Huelva. Se eligió la hoja 958 del mapa 1:50.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) donde existen, al menos, seis focos de *Phytophthora* constatados (fincas “Campo Baldío”, “El Burgo”, “El Morisco”, “Huerto Ramírez”, “Los Bueyes” y “Los Llanos de la Peña”) y parte de las hojas colindantes (936, con 3 focos constatados, 959 con 2 focos y 937). En la figura 1 se presenta la localización del área de estudio. La superficie total de la zona seleccionada es de aproximadamente 355 km².

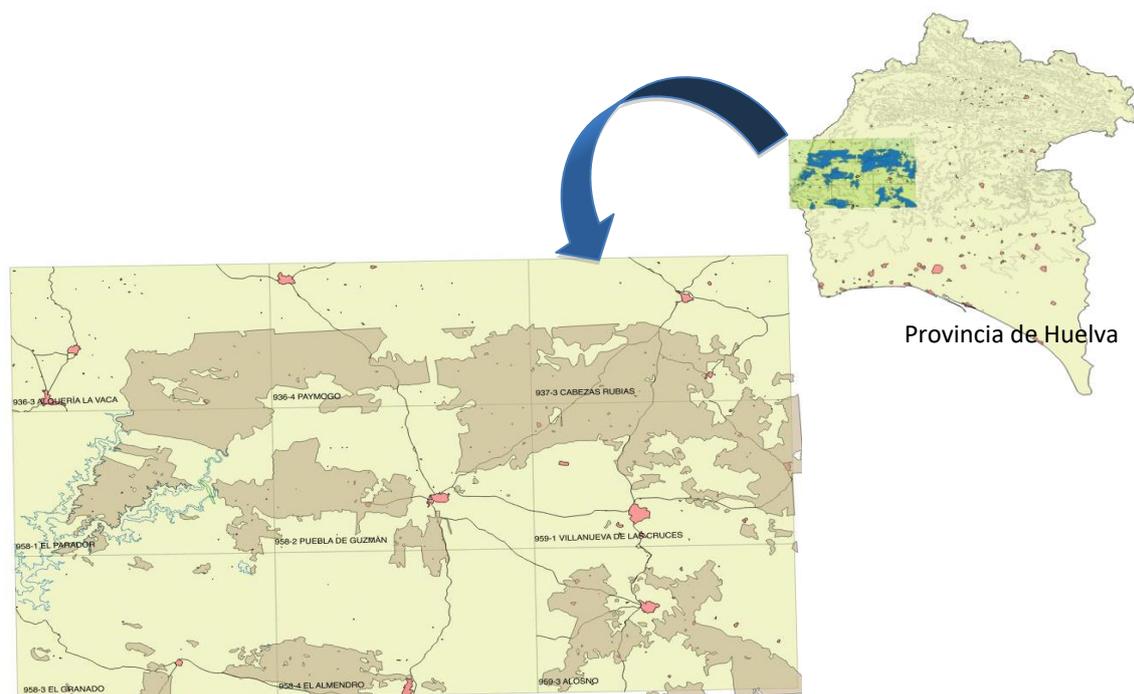


Figura 1 Localización del área de estudio. La zona de trabajo aparece sombreada y corresponde a las áreas de dehesa

Identificación de focos de seca

Para la identificación de focos se utilizaron ortofotografías aéreas (PNOA) de los años 1980 (1977-83), 1998 y 2009 del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Sobre estas fotografías, se superpuso una rejilla de malla rectangular de 700m x300m sobre la zona de estudio seleccionada, constituyendo estas cuadrículas las unidades básicas de estimación de la presencia de la enfermedad para el análisis temporal.

Mediante apreciación visual sobre la fotografía a escala de detalle, se identificaron los focos de seca existentes en cada cuadrícula, considerándose como foco a un grupo de árboles cercanos (mínimo 3 árboles próximos) con síntomas evidentes de defoliación, incluida la defoliación total. Se excluyeron los grupos de árboles que, aun presentando síntomas de defoliación total o parcial, se encontraran en las proximidades de cercas ganaderas o en el entorno inmediato de las orillas de pantanos, charcas o abrevaderos (CARDILLO *et al.*, 2009).

Las cuadrículas se consideraron como afectadas si presentaban al menos un foco de seca y asintomáticas en el caso de que no se observara ninguno, aun cuando pudieran detectarse árboles secos aislados.

Para la cuantificación, se han considerado como unidades muestrales los centroides de las cuadrículas o fracciones de éstas incluidas en el área de dehesa. Cada unidad muestral se ha calificado como afectada (S) o asintomática (A) de acuerdo con los criterios anteriores.

El análisis espacial detallado se ha realizado en la fotografía más reciente (2009). En este caso, se han georreferenciado mediante fotointerpretación todos los focos existentes en la zona de estudio, constituyendo estos registros los datos para el análisis en lugar de las cuadrículas.

Análisis de la evolución temporal del grado de afectación

Se han obtenido mediante SIG (Qgis) mapas de afectación binarios, con identificación de cuadrículas sanas y afectadas. Se ha considerado la proporción de cuadrículas afectadas como estimación del grado de afectación en cada año. Se ha modelizado la evolución en el tiempo mediante el ajuste de una función exponencial a los valores obtenidos.

Análisis de la distribución espacial de los focos de seca

Se ha estudiado la distribución espacial de los focos de seca en el año 2009 mediante índices de vecindad (NNI, Z) y características de segundo orden de los patrones de puntos (SOC) (función de correlación de pares). Se han contrastado los valores de estos índices con los obtenidos para una muestra aleatoria de puntos asintomáticos. Teniendo en cuenta que la zona de estudio se ha restringido a superficies de dehesa y que la prospección visual de la zona ha sido exhaustiva, podemos considerar que cualquier punto de dicha zona fuera del área de influencia de los focos detectados puede considerarse como un lugar asintomático. Para la selección de los puntos asintomáticos de referencia se eligieron un número de puntos similar al de focos, de forma aleatoria, dentro del área de estudio, pero con la restricción de encontrarse a más de 50 m de cualquier foco existente.

Se han calculado los índices de vecindad utilizando los geoalgoritmos proporcionados por Qgis NNI y Z, que relacionan la distancia media al vecino más próximo con la esperada en una distribución aleatoria de la misma densidad, si bien ha sido necesario corregir los valores con el área real de la zona de estudio, ya que, por defecto el programa utiliza los valores extremos de las coordenadas de los puntos, lo que en nuestro caso sobreestimaba considerablemente las distancias medias esperadas a los vecinos más próximos:

$$\text{NNI} = d_o/d_e$$

$$Z = (d_o - d_e)/SE$$

siendo:

d_o = distancia media observada al vecino más próximo del conjunto de puntos considerados

$d_e = 0,5/(N/A)^{0,5}$, distancia media esperada en una distribución aleatoria del mismo número de puntos (N es el número total de puntos y A la superficie total)

$$SE = 0,26136 / (N^2/A)^{0,5}$$

Las funciones de correlación de pares se han obtenido con R a partir de las coordenadas de los puntos afectados y asintomáticos.

Se han obtenidos mapas de densidad de focos (kernel) para los años 1998 y 2009. El análisis espacial no se ha realizado para el año 1980 por la escasez de focos en esta fecha.

Análisis de la relación espacial entre los focos de seca y las estructuras lineales del paisaje (cursos de agua y vías de comunicación)

La hipótesis de partida es que tanto los cursos de agua como las vías de comunicación humanas pueden constituir vías de dispersión a larga distancia de la enfermedad (LARKIN *et al.* 1995; RISTAINO y GUMPERTZ 2000; HOLDENRIEDER *et al.* 2004; LIU *et al.* 2007; CARDILLO *et al.* 2009; PETERSON *et al.* 2014a,b; JIANG *et al.* 2016). Si esto fuera así, cabría esperar mayor densidad de focos en las proximidades de estas estructuras que en el conjunto de la zona.

Para indagar sobre esta circunstancia se han comparado las distancias de los focos de seca a ambas estructuras lineales con las distancias equivalentes de puntos asintomáticos elegidos aleatoriamente tal como se ha explicado antes. Estas distancias se han obtenido mediante SIG (Qgis) utilizando el plugin *NNJoin (Nearest Neighbour Join)* de *Phyton*, que permite obtener las distancias mínimas entre los objetos de dos capas vectoriales diferentes, incluso si se trata de objetos de diferente geometría como es nuestro caso, al tratarse de puntos (focos de seca) y líneas (cursos de agua o vías de comunicación). De esta forma se han obtenido bases de datos con las distancias mínimas de cada foco a los cursos de agua y a las vías de comunicación.

Las capas vectoriales utilizadas para los cursos de agua y las vías de comunicación se han generado a partir de las capas vectoriales temáticas del proyecto BTN25 (Base Topográfica Nacional de España a escala 1:25.000) (IGN 2009) para estos elementos del paisaje, uniendo los elementos de distinto orden en cada caso.

Se han analizado las diferencias existentes de la variable *distancia* así obtenida entre los lugares calificados como afectados y como asintomáticos (puntos en 2009, centroides de cuadrículas en 1998) mediante tests paramétricos (t de Welsch) o no paramétricos (Wilcoxon ó U de Man-Whitney). Gráficamente se han comparado las funciones de densidad de la variable de ambos grupos y se han representado las diferencias mediante gráficos de cajas y bigotes y/o intervalos de confianza de los valores medios de cada grupo.

3. Resultados

Evolución de la superficie afectada 1980-2009

Los resultados obtenidos para los tres años investigados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Evolución del grado de afectación en la zona estudiada. Los puntos corresponden a cuadrículas de 300mx700m en que se ha dividido la superficie

Fecha vuelo	Nº puntos muestrales	Nº puntos afectados		Nº puntos asintomáticos
1977/83	2396	5	0.21 %	2391
1998	2396	144	6.01 %	2252
2009	2347	960	40.9 %	1387

Se observa una evolución exponencial del área afectada durante el período, pasando de una afectación irrelevante en 1980 a una incidencia de más del 40% en el año 2009 (Figura 2). En la figura 3 se representa la distribución de las cuadrículas afectadas en los tres años estudiados.

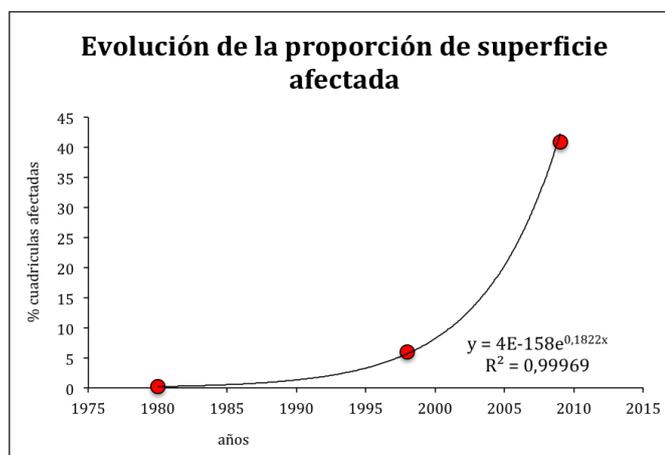


Figura 2 Evolución del porcentaje de superficie afectada 1980-2009

Análisis de la distribución espacial de los focos de seca

Todos los análisis realizados indican una distribución claramente agrupada de los focos, indicando un importante predominio de la dispersión a partir de los focos iniciales.

Tabla 2. Índices de vecindad para los puntos afectados (S) y asintomáticos (A). 2009

Tipo	NNI	Z	Nº puntos	SE
S	0,4375	-45,4317	1059	4,644
A	1,1248	8,269	1199	4,1018

La distancia media al vecino más próximo en el conjunto de puntos de seca en 2009 es menos de la mitad del valor esperado en una distribución aleatoria (NNI=0,4375), presentando un valor de Z muy negativo, mientras la de los puntos asintomáticos elegidos aleatoriamente dentro del mismo área es semejante a la esperable (NNI=1,1248), con un valor de Z positivo bajo, lo que indica una clara agrupación de los primeros a diferencia de los segundos.

Esto se comprueba también en las respectivas funciones de correlación de pares (Figura 4). Aunque no se aprecia en la figura (debido a la escala de los valores de los focos), ninguna de las dos curvas representadas se puede considerar procedente de un patrón de puntos aleatorios. La envolvente de confianza obtenida mediante la simulación de 100 conjuntos de puntos aleatorios dentro de la zona y sus respectivas funciones de correlación de pares, deja fuera a ambas curvas. Pero esto es debido a la forma irregular del área de estudio elegida. No obstante, en la Figura 4 se observa la diferencia entre la distribución de los focos de seca, con una alta tendencia a la agrupación que se mantiene hasta distancias de más de 2000 m, y la distribución de los puntos asintomáticos aleatorios elegidos como referencia.

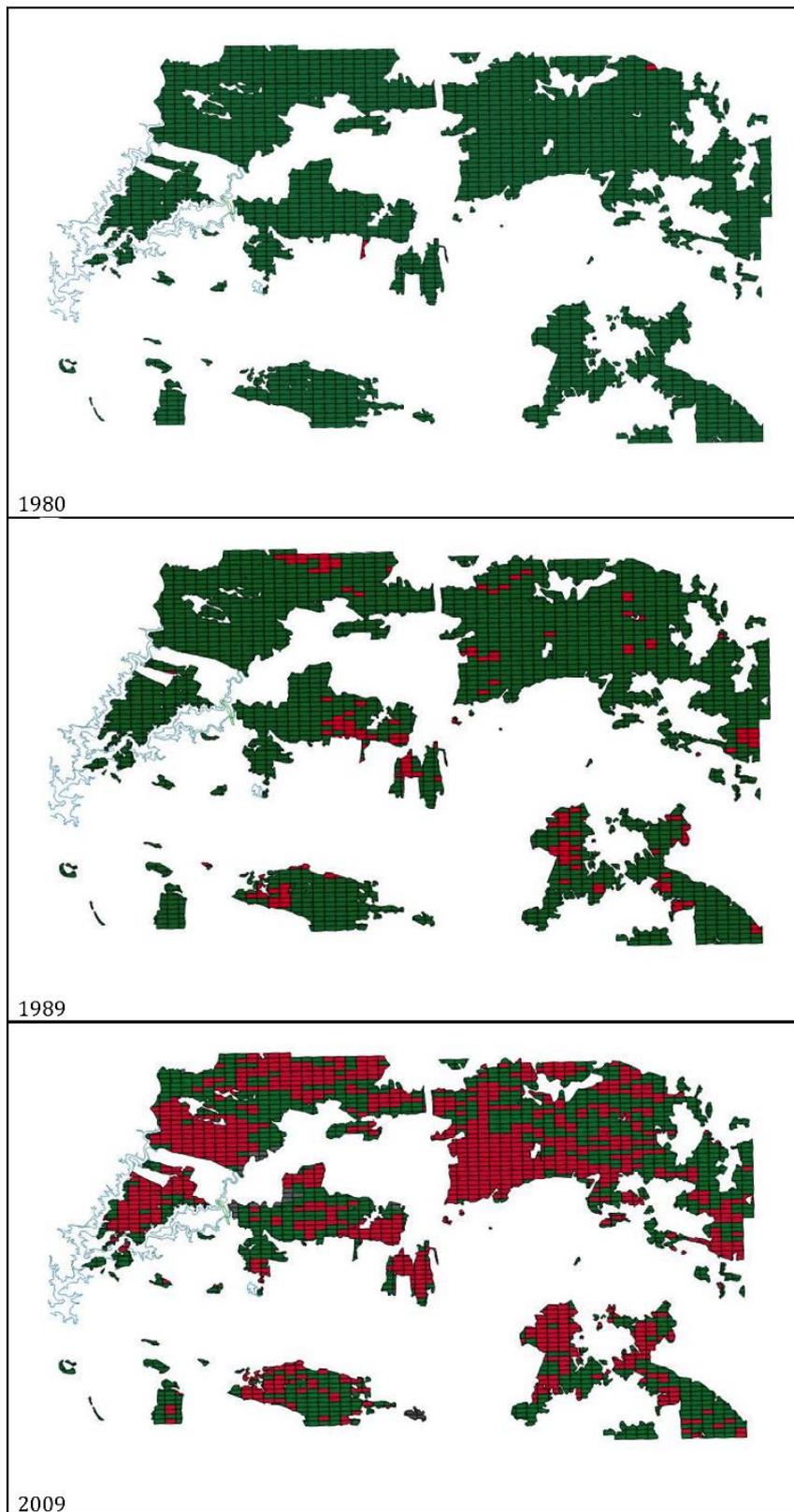


Figura 3 Localización de cuadrículas afectadas (rojo) y asintomáticas (verde) en la zona de estudio en cada uno de los años analizados

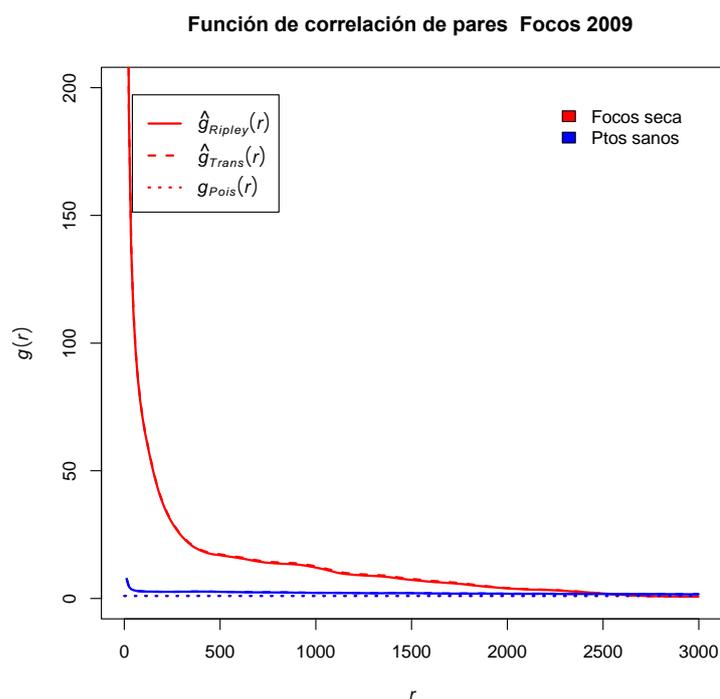


Figura 4 Función de correlación de pares para los puntos afectados (rojo) y asintomáticos (azul) en la zona de estudio. Año 2009

En la Figura 5 se pueden observar los mapas de densidad de focos en los años 1998 y 2009, donde se aprecia la clara concentración de los focos en determinadas zonas, coincidiendo en su mayor parte las zonas de concentración de focos en ambos períodos. Hay que señalar que las figuras indican únicamente la concentración relativa de focos en cada año, no correspondiendo los colores presentados con los mismos valores absolutos en ambos años. Ya se indicó antes que la presencia de focos en 2009 es mucho mayor que en 1998.

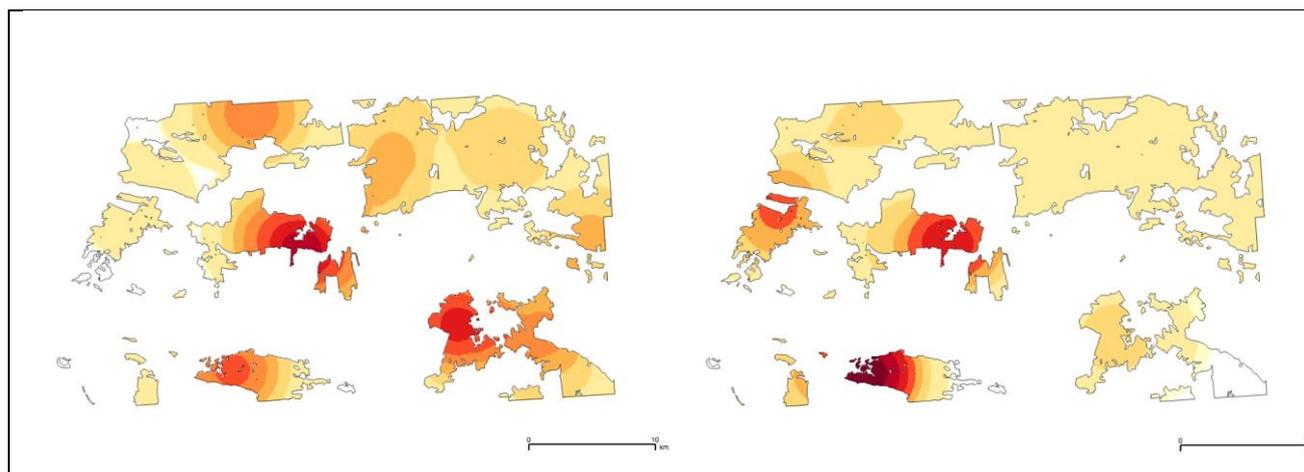


Figura 5 Mapas de densidad de focos de seca en los años 1998 (izquierda) y 2009 (derecha). Los colores rojos oscuros indican mayor densidad de focos y lo contrario los colores amarillos claros. Los colores hacen referencia a las densidades relativas respecto a los valores de cada año, no siendo coincidentes en valor absoluto.

Análisis de la relación espacial entre los focos de seca y las estructuras lineales del paisaje (cursos de agua y vías de comunicación)

Para estudiar la asociación entre los focos de seca y los elementos lineales del paisaje (cursos de agua y vías de comunicación), se comparan las distancias de los focos y de puntos asintomáticos elegidos de forma aleatoria a dichas estructuras lineales.

Como se observa en las funciones de densidad (Figura 6) y se ha comprobado mediante las pruebas de normalidad (Shapiro-Wills y Kolmogorov-Smirnov) de las distancias, tanto a los cursos de agua como a las vías de comunicación, la variable distancia no puede considerarse normal, presentando las distribuciones una clara asimetría por la derecha. No obstante, respecto a las varianzas, sí se han mostrado homogéneas en ambos grupos en casi todos los casos, o bien se han conseguido homogeneizar mediante las transformaciones habituales (raíz cuadrada para la distancia a los cursos de agua en 2009 y logaritmo para la distancia a vías de comunicación del año 2009). La condición de homocedasticidad se cumplió en ambos casos para el año 1998 con la variable sin transformar.

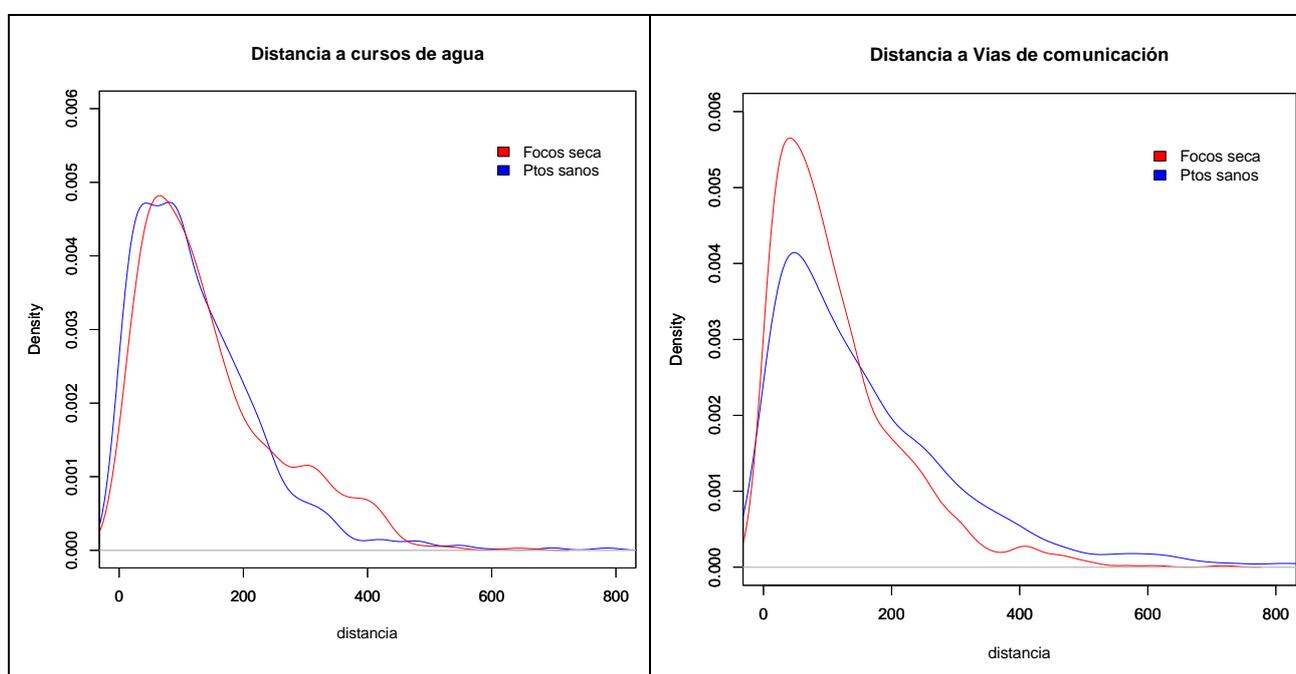


Figura 6 Funciones de densidad de las distancias de los focos de seca (rojo) y de los puntos asintomáticos seleccionados aleatoriamente (azul) a los cursos de agua (izquierda) y a las vías de comunicación (derecha). AÑO 2009

Para el año 2009 se han encontrado los valores estadísticos que se presentan en las tablas 3 y 4 y las figuras 7 y 8. Para comprobar la significación de las diferencias encontradas se ha empleado el test t de Welsch para varianzas desiguales con las variables originales, y el test no paramétrico de Wilcoxon (o U de Man-Witney) con las variables transformadas para conseguir la homogeneidad de las varianzas que requiere el mismo. Para comprobar la condición de homocedasticidad se ha utilizado en todos los casos el test de Fligner-Killeen, que es un test no paramétrico y robusto a la falta de normalidad de los datos. La diferencia de las funciones de densidad de las distancias de los focos y los puntos sanos se ha analizado mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

Tabla 3. Estadísticos de las distancias de los focos de seca (S) y los puntos asintomáticos (A) a los cursos de agua. SE= error típico. SD= desviación típica. El test de Wilcoxon se aplica a la raíz cuadrada de la distancia. AÑO 2009

PTO	Dist. Media (m)	t-Welsch	Mediana (m)	Wilcoxon (sqrt)	SD	SE
A	124.3617	t=-4,5185	100.1813	W = 701340	102.9	2.973
S	144.7789	p=6,56e-06	113.762	p=1.712e-05	110.7	3.403

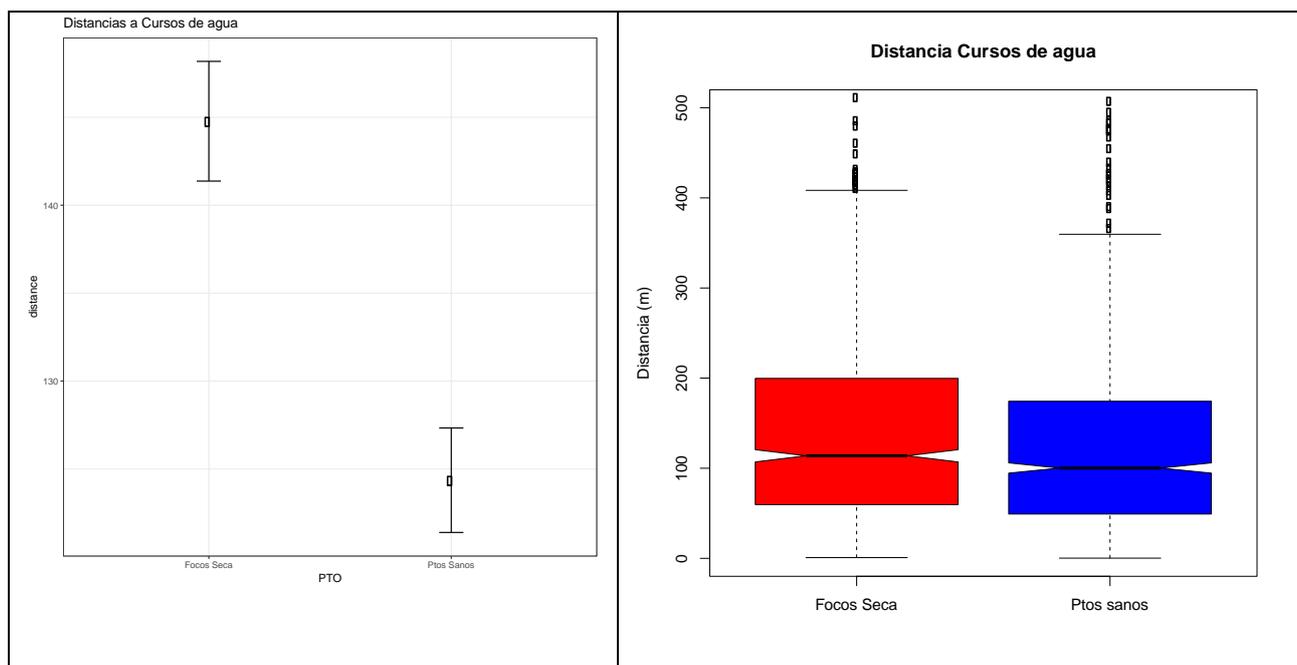


Figura 7. Diferencias de medias (izquierda. $\text{media} \pm \text{SE}$) y de medianas de las distancias a los cursos de agua de los focos de seca (rojo) y de los puntos aleatorios asintomáticos (azul)

Como se puede observar en la tabla 3 y en la figura 7, el año 2009 las distancias medias de los focos de seca a los cursos de agua, a diferencia de lo que cabría esperar, resultan significativamente mayores que las de los puntos asintomáticos. Los valores obtenidos en el test de Kolmogorov-Smirnov de comparación de distribuciones también indican la existencia de diferencias significativas entre las funciones de densidad ($D = 0.087816$, $p = 0.0003423$).

Tabla 4. Estadísticos de las distancias de los focos de seca (S) y los puntos asintomáticos (A) a las vías de comunicación. SE= error típico. SD= desviación típica. El test de Wilcoxon se aplica al logaritmo de la distancia. AÑO 2009

PTO	Dist. Media (m)	t-Welsch	Mediana (m)	Wilcoxon (log)	SD	SE
A	161.265	t=8.8767	119.9559	W = 526660	147.238	4.25216
S	114.655	p < 2.2e-16	87.25496	p=2.57e-12	100.251	3.08062

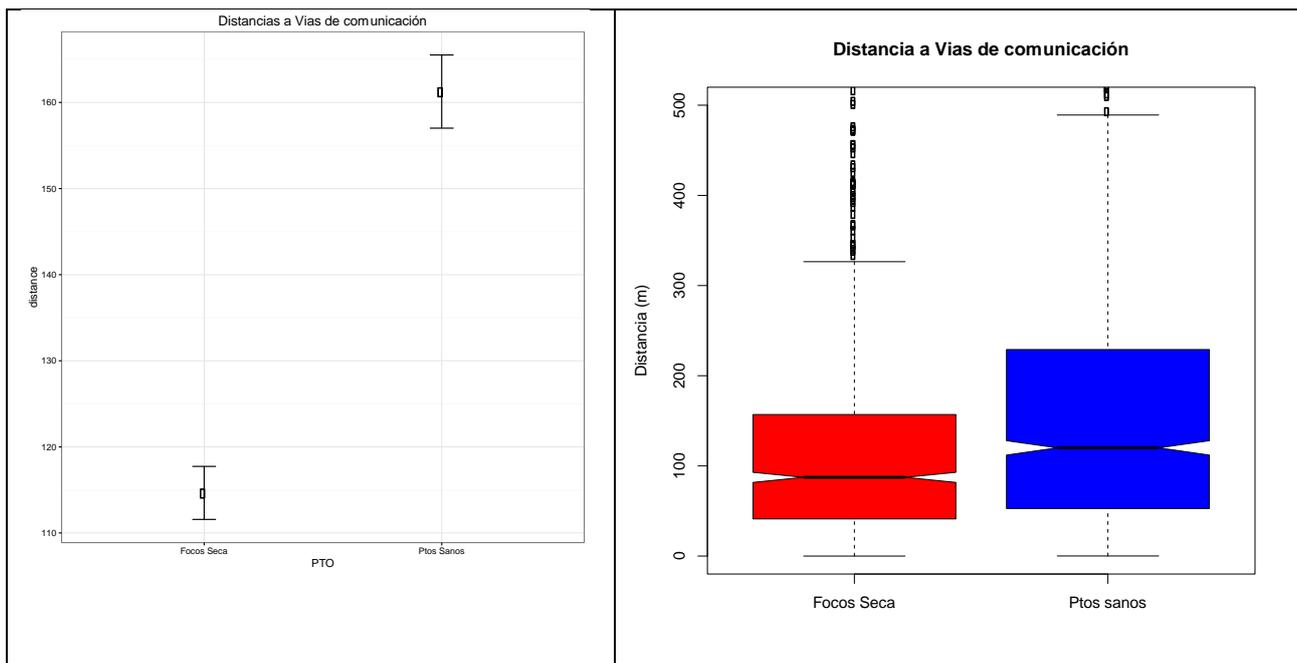


Figura 8. Diferencias de medias (izquierda. $\text{media} \pm \text{SE}$) y de medianas de las distancias a las vías de comunicación de los focos de seca (rojo) y de los puntos aleatorios asintomáticos (azul)

Como se observa aquí, las distancias de los focos de seca a las vías de comunicación son claramente inferiores que las de los puntos asintomáticos. Las diferencias resultan más marcadas que en el caso anterior, lo que se observa incluso con más claridad en las diferencias de las funciones de distribución a simple vista (Figura 6) y también en los valores del test de Kolmogorov-Smirnov ($D = 0.15644$, $p = 2.226 \times 10^{-12}$).

En los análisis de las distancias para el año 1998 no se han encontrado diferencias significativas en ningún caso, ni para las distancias a los cursos de agua ni para las distancias a las vías de comunicación.

4. Discusión

El estudio realizado ha permitido poner de manifiesto la existencia de relaciones espaciales de interés en la distribución de los focos de seca en la zona estudiada a escala comarcal. Se ha constatado una clara distribución agrupada de los focos en todos los años estudiados, y una significativa asociación de los focos con las vías de comunicación, lo que parece indicar la importancia de esta vía para la propagación a larga distancia de la enfermedad. Esto explicaría que esta asociación no se haya encontrado en momentos previos (1998), cuando la propagación a larga distancia era aún escasa y las áreas afectadas aparecían esencialmente concentradas alrededor de los focos iniciales. La agregación espacial de los focos de seca es un resultado generalmente admitido y que parece presentarse de forma consistente a diferentes escalas espaciales (LIU *et al.* 2007). Sin embargo, la asociación de los focos con estructuras lineales que podrían servir de vías de dispersión parece algo más errática en la literatura, encontrándose casos de falta de asociación, tanto a cursos de agua como a vías de comunicación (PETERSON *et al.* 2009), que coincidiría con nuestros resultados de 1998; la observación, por el contrario, de asociación de los focos con cursos de agua y no con vías de comunicación (CARDILLO *et al.* 2009, PETERSON *et al.* 2014a), que resulta consistente con las condiciones que favorecen la propagación a pequeña escala, o la asociación con vías de comunicación y no con cursos de agua, como hemos encontrado en nuestro caso. De más

difícil interpretación es la aparente disociación de nuestros datos con los cursos de agua (distancias de los focos significativamente mayores a estas estructuras que los puntos aleatorios asintomáticos) ya que son numerosos los trabajos que evidencian un mayor grado de afectación en zonas de vaguada que en ladera, derivado del mayor contenido en humedad del suelo en las primeras, que favorecería el desarrollo del patógeno (CORCOBADO et al., 2013b). El suave relieve de nuestra zona de estudio, con escasa variación del nivel freático, podría ser la causa de la falta de asociación positiva del decaimiento con las zonas próximas a los cursos de agua.

Estos resultados aparentemente contradictorios en la literatura podrían explicarse teniendo en cuenta que el peso relativo de las diferentes vías de propagación a larga distancia que pueden existir podrían variar según las circunstancias del sitio, especialmente en el caso de vías artificiales que pueden tener usos e intensidades de uso muy diferentes.

Por otra parte, la dispersión a larga distancia y la estructura espacial de las zonas afectadas también parece depender del tiempo transcurrido desde el inicio de la enfermedad en la zona. Liu et al (2007) han demostrado que el grado de agregación de los focos disminuye en extensión y escala con el paso del tiempo, lo que podría justificar que, con el paso del tiempo, se manifiesten en mayor medida los factores de dispersión no ligados a los procesos de propagación a escala local, que son los que provocan el inicial alto grado de agrupación. Este hecho sería consistente con nuestros resultados, en los que sólo hemos encontrado asociación con las vías de comunicación en el año 2009, cuando la enfermedad se ha extendido prácticamente a toda la zona de estudio, pero no en el año 1998, donde se observa una mayor agrupación de las zonas afectadas entorno a los focos iniciales de la enfermedad. En el año 2009, las zonas donde aparecen focos por primera vez, presentan una dispersión mayor de éstos que aquellas en donde se había detectado la presencia de focos en años anteriores.

5. Conclusiones

El análisis espacial de los focos de seca en una amplia zona de dehesa del suroeste de la península Ibérica (Huelva) a lo largo de tres décadas, desde el inicio de los primeros casos de la enfermedad hasta la década actual, ha permitido constatar la progresión exponencial de la enfermedad con el tiempo en la zona estudiada así como una alta asociación, en la última década, con las vías de comunicación humanas. Esto permite suponer que el factor humano ha sido relevante en la expansión de la enfermedad en la zona.

El análisis espacial a diferentes escalas es una herramienta relativamente reciente en el campo de la patología forestal y está resultando de gran utilidad pues permite detectar factores relevantes en la propagación de las enfermedades que actúan a escalas espaciales grandes y que difícilmente pueden ser identificados en el análisis local que suele ser habitual en el estudio de los procesos de propagación.

El resultado obtenido en este trabajo debería animar a los gestores del territorio a considerar el manejo de las vías de comunicación dentro de los planes de lucha contra enfermedades de alta incidencia y baja especificidad como la podredumbre radical causada por *Phytophthora cinnamomi*.

6. Bibliografía

BRASIER, C.M. 1996 *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change. *Ann Sci For* 53:347–358

- BRASIER, C.M.; ROBREDO, F.; FERRAZ, J.F.P. 1993 Evidence for *Phytophthora cinnamomi* involvement in Iberian oak decline. *Plant Pathol* 42:140–145
- CARDILLO, E.; ACEDO, A.; PEREZ, C. 2009. Spatial patterns of holm oak decline in Extremadura, Spain. en: 6th IUFRO Working Party 7.02.09 “*Phytophthora* in Forests and Natural Ecosystems”. 9-12 SEPT. Córdoba. Spain
- CORCOBADO, T., SOLLA, A., MADEIRA, M. A., & MORENO, G. 2013. Combined effects of soil properties and *Phytophthora cinnamomi* infections on *Quercus ilex* decline. *Plant and Soil*, 373: 403-413
- CORCOBADO, T., CUBERA, E., MORENO, G., & SOLLA, A. 2013b. *Quercus ilex* forests are influenced by annual variations in water table, soil water deficit and fine root loss caused by *Phytophthora cinnamomi*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169: 92-99
- ERWIN, D.C.; RIBEIRO, O.K. (1996) *Phytophthora* diseases world- wide. APS Press, St. Paul
- GALLEGO, F.J.; PÉREZ DE ALGABA A.; FERNÁNDEZ-ESCOBAR, R. 1999 Etiology of oak decline in Spain. *Eur J For Path* 29:17–27
- GOHEEN, E.M.; REESER, P.; SUTTON, W. 2009. Reducing the spread of *Phytophthora ramorum* on the Redwood Nature Trail, Curry County Oregon: A case study .en: 6th IUFRO Working Party 7.02.09 “*Phytophthora* in Forests and Natural Ecosystems”. 9-12 SEPT. Córdoba. Spain
- HOLDENRIEDER, O.; PAUTASSO, M.; WEISBERG, P.J.; LONSDALE, D. 2004. Tree diseases and landscape processes: the challenge of landscape pathology. *Trends Ecol & Evol* 19(8):446-452.
- JIANG, H.; CAO, C.; CHEN, W.; FANG, Z.; LIU, C. 2016. Simulation and prediction of the spatiotemporal transmission of sudden oak death (SOD) based on spatial information technology. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
- LARKIN, R.P.; GUMPERTZ, M.L.; RISTAINO, J.B. 1995. Geostatistical analysis of *Phytophthora* epidemic development in commercial bell pepper fields. *Phytopathol* 85:191-203
- LIU, D.; KELLY, M.; GONG, P.; GUO, Q. 2007. Characterizing spatial-temporal tree mortality patterns associated with a new forest disease. *Forest Ecol & Manage* 253:220-231.
- PETERSON, E.; HANSEN, E.; HULBERT, J. 2014b. Source or sink? The role of soil and water borne inoculum in the dispersal of *Phytophthora ramorum* in Oregon tanoak forests. *For Ecol & Manage* 322: 48-57
- PETERSON, E.; HANSEN, E.; KANASKIE, A. 2014a. Spatial relationship between *Phytophthora ramorum* and roads or streams in Oregon tanoak forests. *For Ecol & Manage* 312: 216–224
- RISTAINO, J.B.; GUMPERTZ, M.L. 2000 New frontiers in the study of dispersal and spatial analysis of epidemics caused by species in the genus *Phytophthora*. *Annu Rev Phytopathol* 38:541-76
- RIZZO, D.; GARBELOTTO, M.; DAVIDSON, J.M.; SLAUGHTER, G.W.; KOIKE, S.T. 2002. *Phytophthora ramorum* as the cause of extensive mortality of *Quercus* spp. and *Lithocarpus densiflorus* in California. *Plant Dis.* 86(3), 205–213.
- SAMPAIO E PAIVA CAMILO-ALVES, C.; CLARA, M.I.E.; ALMEIDA RIBEIRO, N.M.C. 2013 Decline of Mediterranean oak trees and its association with *Phytophthora cinnamomi*: a review. *Eur J Forest Res* (2013) 132:411–432..
- SÁNCHEZ, M.E.; CAETANO, P.; FERRAZ, J.; TRAPERO, A. 2002 *Phytophthora* disease of *Quercus ilex* in southwestern Spain. *For Pathol* 32:5–18
- SÁNCHEZ, M.E.; CAETANO, P.; ROMERO, M.A.; NAVARRO, R.M.; TRAPERO, A. 2006 *Phytophthora* root rot as the main factor of oak decline in southern Spain. In: BRASIER, C.; JUNG, T.; OßWALD, W. (eds)

Progress in research on *Phytophthora* diseases of forest trees. The Forest Authority, Farnham, pp 149–154

SERRANO, M.S.; FERNÁNDEZ-REBOLLO, P.; DE VITA, P.; SÁNCHEZ, M.E. 2013 Calcium mineral nutrition increases the tolerance of *Quercus ilex* to *Phytophthora* root disease affecting oak rangeland ecosystems in Spain . *Agroforest Syst* 87:173–179 .