



**2025** | **16-20**  
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

**9CFE-1627**

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

Organiza





## Análisis espacial del proceso de dispersión de *Phytophthora cinnamomi* a escala local: un enfoque multi-modelo para la predicción y el apoyo a la toma de decisiones

ARIZA SALAMANCA, A.J. (1), CIDRE GONZÁLEZ, A. (1), RUÍZ GÓMEZ, F.J., VANNINI, A. (2) y GONZÁLEZ MORENO, P. (1)

(1) Departamento de Ingeniería Forestal, Laboratorio de Dendrocronología, Selvicultura y Cambio Climático, DendrodatLab-ERSAF (RNM 360), Universidad de Córdoba.

(2) University of Tuscia, Department of Plant Protection, Via S. Camillo de Lellis, 01100 Viterbo, Italy

### Resumen

*Phytophthora cinnamomi* Rands (Pc) es uno de los agentes bióticos más destructivos en ecosistemas de la cuenca mediterránea. El desarrollo de estrategias de control requiere información precisa sobre la progresión de la enfermedad desde los focos de infección. El presente trabajo se desarrolló con un doble objetivo, (i) predecir la progresión de la enfermedad mediante la simulación de los mecanismos potenciales de dispersión del patógeno y; (ii) desarrollar un índice integrado de riesgo de infección. Para abordar estos objetivos, se desarrolló un enfoque multi-modelo basado en técnicas de análisis espacial y funciones de probabilidad. Los datos utilizados para construir y validar las funciones se obtuvieron integrando datos de teledetección y parámetros ambientales. Estas funciones de probabilidad se utilizaron para desarrollar un índice integrado y crear mapas de riesgo a escala local. El índice se validó utilizando como caso de estudio focos de Pc previamente localizados (fincas demostrativas). Para la validación se comparó el patrón espacial de mortalidad observada en estos focos con los patrones de riesgo simulados. Los resultados obtenidos mediante simulaciones indican que el patrón espacial de dispersión de Pc desde los focos puede estimarse de forma realista, mostrando un alto nivel de acierto en las pruebas de evaluación seleccionadas.

### Palabras clave

*Phytophthora cinnamomi*, sanidad forestal, control integrado, simulación, teledetección.

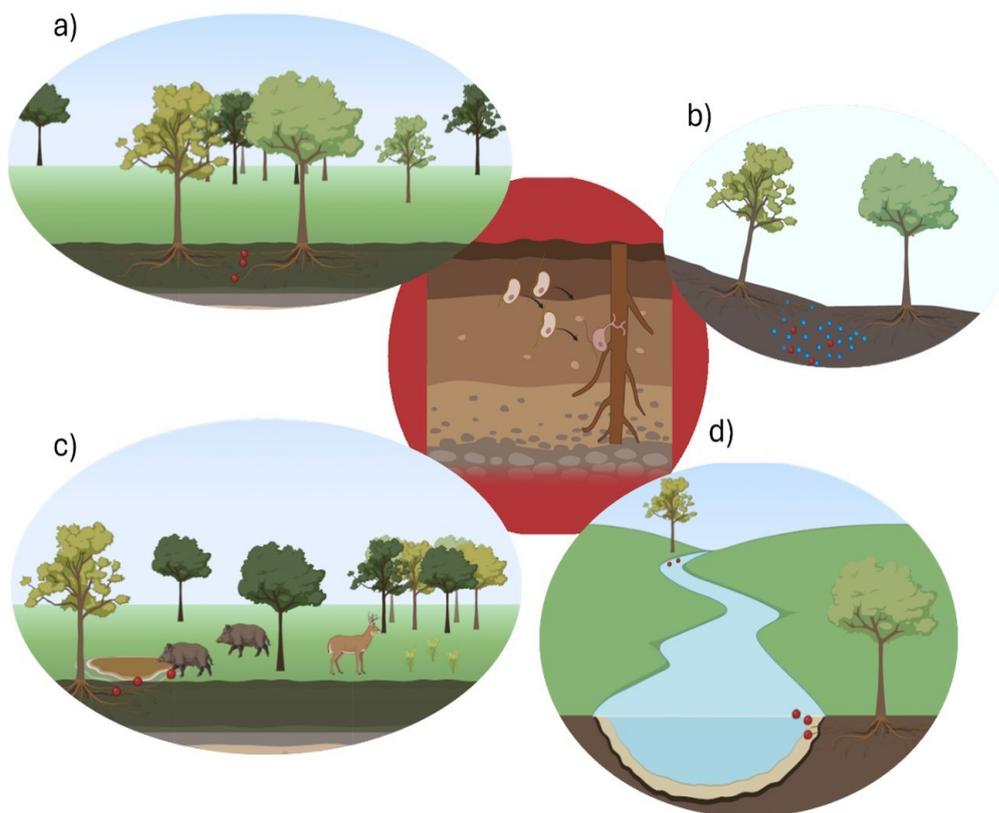
### 1. Introducción

Debido a la intensificación del comercio mundial y a la globalización, cada vez más especies son transportadas desde su área nativa a nuevos territorios (HULME, 2009). En este contexto, las invasiones de *Phytophthoras* forestales exóticas causan considerables impactos económicos y ecológicos en todo el mundo (LAMOURE, 2013; ROY et al., 2017). Dentro de este tipo de agentes patógenos, *Phytophthora cinnamomi* Rands (en adelante, Pc) es actualmente uno de los más destructivos, responsable de cuantiosas pérdidas económicas en la agricultura, la horticultura y el ámbito agroforestal (SHEARER et al., 2007; JUNG et al., 2013). Pc se ha distribuido con plantas infectadas entre viveros de todo el mundo, lo que brinda la



oportunidad de que este patógeno se establezca en nuevos paisajes a través de las plántulas utilizadas en programas de reforestación y restauración (ANTONELLI *etal.*, 2022; MORA-SALA *etal.*, 2022). La acción de Pc provoca la muerte de raíces finas, generando diversos síntomas de estrés hídrico y, en ocasiones, la muerte del individuo (RUIZ-GÓMEZ *etal.*, 2019). El control de esta enfermedad en áreas de manejo se basa en medidas preventivas y de control destinadas a prevenir a largo plazo el impacto del patógeno. Dentro del Manejo Integrado de Plagas (MIP), la detección precoz y la implementación de planes de seguimiento y evaluación desempeñan un papel clave en el desarrollo de estrategias y tácticas de control efectivas (SWEENEY *etal.*, 2023).

El análisis temporal y espacial de la dispersión de la enfermedad alrededor del punto de introducción inicial del inóculo (focos) tiene el potencial de proporcionar información importante para la gestión de la enfermedad (CARDILLO *etal.*, 2018). La dispersión puede definirse como el movimiento de unidades de propágulo de un patógeno a través de diferentes mecanismos (CAMPBELL & MADDEN, 1990). Estudios previos identificaron los patrones espaciales de dispersión de Pc en focos de infección y los relacionaron con diferentes mecanismos de dispersión (DAVISON, 1988; WILSON *etal.*, 2012; CARDILLO *etal.*, 2018; SÁNCHEZ-CUESTA *etal.*, 2023). Los resultados de estos estudios sugieren que la dispersión de Pc desde los focos puede atribuirse a tres mecanismos primarios de dispersión (Fig. 1): (I) dentro del suelo (Fig. 1a-b); (II) dispersión del inóculo en aguas superficiales (Fig. 1d) y; (III) dispersión por actividad humana o animal, incluyendo el movimiento del suelo (Fig. 1c). Dentro del suelo (mecanismo I) puede implicar el crecimiento de la raíz hacia el inóculo, el movimiento del inóculo hacia las raíces (Fig. 1b) o el contacto de raíz a raíz (Fig. 1a). Estos procesos de dispersión plantean desafíos significativos tanto para la investigación como para la gestión de enfermedades, dado que cada mecanismo de dispersión involucra múltiples variables ambientales y genera interacciones complejas, que no siempre siguen una relación lineal.



*Figura 1. Mecanismos potenciales de dispersión de *Phytophthora cinnamomi* Rands. En a) movimiento del inóculo en el suelo debido al contacto difusivo de raíz a raíz; b) movimiento del inóculo a las raíces en partículas de agua dentro del suelo; c) dispersión del inóculo por movimiento de animales domésticos y salvajes y; d) dispersión del inóculo en aguas superficiales. La figura central (círculo rojo) representa las zoosporas atraídas por los exudados de las raíces y la penetración y colonización de las zoosporas. Esta figura se montó utilizando activos dinámicos de BioRender (<https://www.biorender.com/>) (iconos, líneas, formas y texto).*

El reciente desarrollo de enfoques geoestadísticos y de modelización proporciona un valioso conjunto de herramientas para investigar los componentes espaciales y temporales de la propagación de enfermedades y para apoyar la facilitación de aplicaciones prácticas de control de enfermedades (HERNÁNDEZ-LAMBRAÑO et al., 2018; CARDILLO et al., 2021; SÁNCHEZ-CUESTA et al., 2021; VANNINI et al., 2021). Sin embargo, a pesar de los avances en la investigación sobre la propagación de Pc en los últimos años, el conocimiento cuantitativo sobre los procesos de dispersión que afectan a la propagación del patógeno en el tiempo y el espacio sigue siendo limitado.

Para superar las limitaciones de las metodologías existentes, este estudio pretende proponer un marco metodológico para derivar un índice de riesgo general. El indicador de riesgo propuesto en este estudio se basa en los principios de los mecanismos de dispersión de Pc descritos en RISTAINO & GUMPERTZ, (2000). El marco metodológico consiste en una combinación de funciones de probabilidad e índices integradores, basados en factores bióticos y abióticos. Aunque la mayoría de los componentes implicados en los diferentes mecanismos de dispersión de Pc están bien establecidos en la literatura científica, nunca antes se habían reunido en un marco integrado global. Realizamos un estudio de caso en un área demostrativa llamada “La Tejera” (Figura 2) para probar las herramientas y desarrollar una

prueba de concepto. Esta herramienta podría ayudar a centrar las estrategias de gestión integrada de plagas, proporcionando un control eficaz a través de una mejor comprensión de cómo se propaga la enfermedad en el paisaje del hospedador.

## 2. Objetivos

El presente trabajo se desarrolló con un doble objetivo, (i) predecir la progresión de la enfermedad mediante la simulación de los mecanismos potenciales de dispersión del patógeno y; (ii) desarrollar un índice integrado de riesgo de infección.

### 3. Metodología

#### 3.1. Área de estudio

La zona de estudio consiste en un área irregular (35 ha) situada en el Sur de la Península Ibérica, concretamente en el término municipal de Villaviciosa de Córdoba, provincia de Córdoba (37°59'37.86 «N, -4°54'12.27»O; Figura 2). La vegetación está compuesta por dehesas de encinas (*Quercus ilex* L.) y alcornoques (*Quercus suber* L.), y pequeñas zonas con arbustos *Cistus* sp., *Retama sphaerocarpa* (L.) Boiss., *Lavandula stoechas* Lam., *Thymus zygis* Loefl. Ex L., etc. La elevación oscila entre 560 y 624 m.s.n.m. y está dominada por pendientes entre 0-58%.

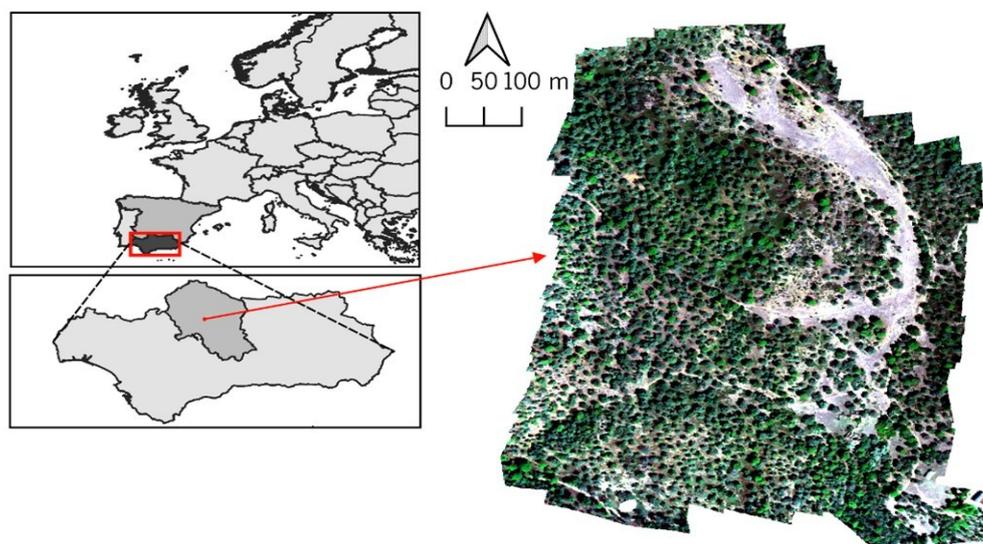


Figura 2. Área de estudio.

#### 3.2. Fuentes de datos e indicadores utilizados

En la zona de estudio, la enfermedad comenzó en 2014 con el establecimiento de islas de biodiversidad relacionadas con la ejecución de un proyecto de medidas correctoras medioambientales. En una serie de muestreos posteriores se comprobó que el material vegetal plantado en estas islas estaba infectado por *Phytophthora cinnamomi* Rands. Para el diagnóstico del patógeno, se recogieron muestras de la rizosfera del suelo a partir de los 20 cm y bajo la copa de seis árboles. Se recogieron muestras de suelo de las orientaciones norte y sur de cada árbol, a cinco metros de distancia del tronco. Las muestras fueron procesadas en conjunto antes de ser analizadas mediante la metodología de cebado del suelo (PÉREZ-SIERRA et al., 2022). El análisis se repitió dos veces cuando el resultado fue negativo. Este proceso permitió la identificación de cinco focos de infección.

##### 3.2.1. Identificación del patrón espacial de mortalidad

Para estimar el frente de la enfermedad desde los focos de infección, se identificó



la mortalidad de los árboles mediante comparación de ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) tras un proceso de segmentación. Las ortofotos se tomaron en 2016 (fecha cercana a la infección) y 2022 (máxima actualidad). La segmentación se realizó utilizando las herramientas de *Orfeo Toolbox* (OTB) (GRIZONNET et al., 2017). El algoritmo utilizado en la fase de análisis del objeto de la imagen fue la segmentación *Large-Scale Mean-Shift* (LSMS) (MICHEL et al., 2015).

Por último, se utilizó una Estimación de la Densidad Kernel (KDE) para proyectar el patrón espacial de mortalidad (SÁNCHEZ-CUESTA et al., 2021). Seleccionamos una función de densidad kernel gaussiana, y el ancho de banda óptimo se estimó utilizando la validación cruzada por mínimos cuadrados sin exclusión (LSCV) (DAVIES et al., 2011).

### 3.2.2. Información espacial

Utilizamos varios conjuntos de datos y análisis espaciales para obtener los diferentes factores que influyen en los mecanismos de dispersión de Pc. Como fuente básica de información se utilizó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), procedente del centro de descargas del organismo autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) (<https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>). En primer lugar, calculamos la dirección del flujo y el Índice de Humedad Topográfico (TWI, por su acrónimo en inglés). El TWI se calculó utilizando la pendiente, la dirección de flujo y los datos de acumulación de flujo (véanse los detalles de cálculo en BEVEN & KIRKBY, (1979)). En segundo lugar, convertimos el vector de dosel obtenido de la segmentación en una capa ráster binaria en la que 1 corresponde a píxeles clasificados como árbol y 0 a otras clases. En tercer lugar, se identificó la red de drenaje natural a partir del MDE.

### 3. 3. Marco teórico

Utilizamos los principales conceptos de mecanismos de dispersión definidos en RISTAINO & GUMPERTZ, (2000) para especies de *Phytophthora*, y los modificamos y adaptamos a Pc y al contexto de las condiciones locales. La acción de estos mecanismos puede modelizarse mediante funciones de probabilidad e índices integradores. Estructuramos los indicadores en función del mecanismo de dispersión implicado (Tabla 1).

*Tabla 1. Resumen de los diferentes factores relacionados con los mecanismos de dispersión de *Phytophthora cinnamomi* Rands en la literatura actual.*



Mecanismo	Variable	Descripción	Referencias
I. Dentro del suelo	Dirección de flujo	Los focos de infección se extienden rápidamente en sentido descendente	(HILL et al., 1994; CORCOBADO et al., 2013; CARDILLO et al., 2018; DUQUE-LAZO et al., 2018)
Distancia al foco	La densidad de propágulos disminuye a medida que aumenta la distancia al foco	(CARDILLO et al., 2018, 2021)	
Distancia a redes naturales de drenaje	La elevada humedad del suelo en las proximidades del drenaje natural proporciona un entorno perfecto para la acumulación de inóculos de Pc	(VANNINI et al., 2010; CARDILLO et al., 2018; VANNINI et al., 2021)	
Continuidad de la vegetación	La falta de disponibilidad de raíces hospedadoras limita el desarrollo del patógeno	(GÓMEZ-APARICIO et al., 2012; SÁNCHEZ-CUESTA et al., 2023)	
II. Dispersión de inóculos en el agua superficial	Índice Topográfico de Humedad (TWI)	Los episodios de encharcamiento del suelo podrían favorecer la propagación de inóculos de Pc	(DAVISON, 1988; CORCOBADO et al., 2013; CARDILLO et al., 2018; RUIZ-GÓMEZ et al., 2019)
Redes de drenaje	A través de las redes de drenaje se produce una rápida dispersión a larga distancia de las zoosporas de Pc transportadas por el agua	(VANNINI et al., 2010; CORCOBADO et al., 2013; VANNINI et al., 2021)	
III. Dispersión por actividad animal	Movimiento animal	La formación de nuevos focos está mediada por el movimiento de los animales a lo largo de ciertas vías preferentes	(KLIEJUNAS & KO, 1976; LI et al., 2014a; CARDILLO et al., 2018)

### 3.3.1. Mecanismo Ii: movimiento del inóculo hacia la raíz

Dentro del suelo, el movimiento del inóculo hacia las raíces está estrechamente controlado por los patrones espaciales de humedad del suelo (RISTAINO & GUMPERTZ, 2000) y estos patrones están dominados por las características topográficas (QIU et al., 2014). Modelizamos el patrón espacial de la humedad del suelo desde los focos de infección integrando varios parámetros y funciones. Esta simulación se llevó a cabo basándose en una serie de restricciones (RISTAINO & GUMPERTZ, 2000): i) se determinó que el principal mecanismo de dispersión en dirección ascendente era la propagación de raíz a raíz y, ii) el movimiento descendente del inóculo solo puede producirse en la misma dirección de flujo de los focos o en la adyacente. Así, utilizamos la dirección del flujo y la altitud para predecir el movimiento del inóculo dentro del suelo en condiciones húmedas e intermedias. En primer lugar, se extrajo la dirección del flujo en los focos. A continuación, se creó un nuevo ráster binario que identificaba los píxeles cuya dirección de flujo coincidía con la del foco o era adyacente a ella. Después, se definió una función para obtener todos los píxeles del nuevo ráster con valor 1 conectados a los focos, asegurándose de que los vecinos se encontraban dentro de los límites de la zona de estudio. En cada iteración, la altitud del píxel actual se comparaba con la de sus vecinos, agregando los vecinos con menor altitud a una lista de píxeles a visitar y marcándolos como visitados. A continuación, se aplicó una función para aislar los píxeles que cumplían las condiciones de flujo y altitud, generando un nuevo ráster binario que identificaba el patrón espacial de dispersión mediante este mecanismo (Ecuación 1).

$$R(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } \{(x_i, y_i) | z_{vecino} < z_{actual}\} \\ 0 & \text{if } \{(x_i, y_i) | z_{vecino} > z_{actual}\} \end{cases} \quad (Ec.1)$$

### 3.3.2. Mecanismo Iii: movimiento del inóculo por contacto raíz-raíz

En estudios anteriores se planteó la hipótesis de que el crecimiento de los focos



existentes también está controlado por la proximidad entre raíces, lo que permite un contacto difusivo de raíz a raíz y aumenta la concentración o dispersión de propágulos, además de la interacción planta-patógeno (HILL et al., 1994; DUNSTAN et al., 2010; CARDILLO et al., 2018; BASSANI et al., 2020). Así, utilizamos la continuidad arbórea extraída de la segmentación de ortofotos para predecir el movimiento del inóculo en el campo debido al contacto raíz a raíz. En primer lugar, se realizó una clasificación del resultado obtenido de la segmentación, asignando valor 1 a los píxeles clasificados como “árbol” y 0 al resto. En segundo lugar, calculamos la continuidad de la vegetación utilizando una función focal que cuenta los píxeles conectados (valor > 0) dentro de una ventana de 3×3 (Ecuación 2):

$$e(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 r(x+i, y+j) - r(x, y) \quad (\text{Ec.2})$$

Donde es el número de píxeles conectados alrededor del punto Si hay continuidad de vegetación y A continuación, aplicamos una función para obtener todos los píxeles del nuevo raster con valor 1 conectados a los focos. El resultado es un raster binario con los píxeles conectados marcados como 1. Suponemos que si no hay contacto directo (píxel a píxel) entre árboles, el riesgo de infección de un árbol sano por este mecanismo es cero.

### 3.3.3. Mecanismo II: Dispersión de inóculos en el agua superficial

El movimiento del inóculo en el agua superficial es un importante mecanismo de dispersión para muchos patógenos de suelo del género *Phytophthora*, que se caracterizan por la presencia de zoosporas biflageladas móviles (ERWIN & RIBEIRO, 1996). La propagación potencial del inóculo en las aguas superficiales se definió utilizando la red de drenaje natural y zonas húmedas. En primer lugar, identificamos el flujo de agua más próximo a los focos de infección y en la misma dirección de flujo. A continuación, seleccionamos todos los cursos de agua asociados y que se encuentran en sentido descendente. Estudios anteriores demostraron que las zonas con valores elevados del TWI tienden a saturarse primero y, por lo tanto, indican posibles zonas húmedas (LIN et al., 2006; PETROSELLI et al., 2013; KONGNSO et al., 2024). Así pues, utilizamos el índice TWI como indicador indirecto de la humedad del suelo para la identificación de zonas húmedas. Se creó un nuevo ráster binario que identificaba los píxeles con valores de TWI por encima del percentil 90 (zonas húmedas). A continuación, unimos este ráster con el de cursos de agua asociados a los focos.

### 3.3.4. Mecanismo III: Dispersión por el movimiento animal

El movimiento de animales domésticos y salvajes se ha identificado como vector de propágulos (KLIEJUNAS & KO, 1976; LI et al., 2014a). Desarrollamos una simulación en tiempo discreto del movimiento de las partículas en la que todas las trayectorias se aproximaron mediante una serie de pasos de duración constante. Así, modelizamos el movimiento de los animales hacia las fuentes de recursos (agua, pastos, etc.) dentro de del área de estudio, asegurándonos de que permanecían dentro de los límites definidos. Inicialmente, se creó una función que establecía aleatoriamente la posición de un animal con sus coordenadas y un sistema de referencia de coordenadas. Posteriormente, se desarrolló una función para calcular la dirección hacia la fuente de recursos utilizando un vector (Ecuación 3), normalizar el resultado (Ecuación 4) y añadir aleatoriedad girando este vector con una matriz de rotación (Ecuaciones 5-7).

$$\vec{d} = (d_x, d_y) = (r[1] - x, r[2] - y) \quad (\text{Ec.3})$$

$$\hat{d} = \frac{\vec{d}}{\|\vec{d}\|} = \frac{(d_x, d_y)}{\sqrt{d_x^2, d_y^2}} \quad (\text{Ec.4})$$

$$\theta = \text{runif}(1, -\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}) \quad (\text{Ec.5})$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{Ec.6})$$

$$\vec{d}_{\text{aleatoria}} = R \times \hat{d} \quad (\text{Ec.7})$$

Así, la nueva posición del animal en cada paso se definió como (Ecuación 8):

$$(x_{\text{nueva}}, y_{\text{nueva}}) = (x + \vec{d}_{\text{aleatoria}}[1] \times \text{tamaño de píxel}, y + \vec{d}_{\text{aleatoria}}[2] \times \text{tamaño de píxel}) \quad (\text{Ec.8})$$

Otra función garantizaba que los animales permanecieran dentro de la zona de estudio, desplazándolos al punto más cercano si salían de los límites (Ecuaciones 9-10).

$$\vec{d} = (\text{coordenada más próxima}[1] - x, \text{coordenada más próxima}[2] - y) \quad (\text{Ec.9})$$

$$(x_{\text{nueva}}, y_{\text{nueva}}) = (x + \frac{\vec{d}[1]}{\|\vec{d}\|}, y + \frac{\vec{d}[2]}{\|\vec{d}\|}) \quad (\text{Ec.10})$$

Las posiciones y trayectorias resultantes de los animales se almacenaron y guardaron en un formato vectorial para su posterior análisis. A continuación, se identificaron y seleccionaron las trayectorias que cruzaban los focos de infección.

### 3.4. Índice de riesgo

#### 3.4.1. Ponderación e integración de los mecanismos de dispersión

Los mecanismos de dispersión se ponderaron para desarrollar un índice de riesgo integrador. Se aplicaron tres de los métodos de ponderación más utilizados (HOFFMANN et al., 2008): i) pesos iguales; ii) ponderación estadística; y iii) ponderación en base al criterio experto (Ecuaciones 11-13). Para los pesos iguales, utilizamos el mismo peso para todos los mecanismos de dispersión, por lo que aplicamos un peso de 0,25 a cada uno. En la ponderación estadística, los pesos de cada mecanismo se obtuvieron mediante el método de estimación de la importancia que puede derivarse del modelo *Random Forests* (BREIMAN, 2001). En la ponderación basada en el criterio de expertos, cada coautor del manuscrito propuso individualmente un peso para cada mecanismo, asignando el valor promedio a cada mecanismo.



$$\text{Pesos iguales} = (0.25 \cdot \text{Mecanismo } I_i) + (0.25 \cdot \text{Mecanismo } I_{ii}) \quad (\text{Ec.11})$$

$$+ (0.25 \cdot \text{Mecanismo } II) + (0.25 \cdot \text{Mecanismo } III)$$

$$\text{Ponderación estadística} \quad (\text{Ec.12})$$

$$= (0.24 \cdot \text{Mecanismo } I_i) + (0.27 \cdot \text{Mecanismo } I_{ii})$$

$$+ (0.25 \cdot \text{Mecanismo } II) + (0.24 \cdot \text{Mecanismo } III)$$

$$\text{Criterio experto} \quad (\text{Ec.13})$$

$$= (0.40 \cdot \text{Mecanismo } I_i) + (0.15 \cdot \text{Mecanismo } I_{ii})$$

$$+ (0.40 \cdot \text{Mecanismo } II) + (0.05 \cdot \text{Mecanismo } III)$$

### 3.4.2. Convertir los índices en mapas de riesgo

Para identificar las zonas de alto riesgo, se cartografiaron las zonas con valores de riesgo iguales o superiores al percentil 80. A continuación, se utilizó un KDE para estimar la densidad de probabilidad subyacente.

### 3.5. Evaluación de resultados

Para evaluar el nivel de concordancia de los mapas de riesgo con el patrón espacial de mortalidad, y para evaluar qué método de ponderación muestra la mejor predicción, se calculó el Índice de Similitud Estructural (SSIM, por su acrónimo en inglés) (WANG et al., 2004). (HAGEN-ZANKER, 2006) propuso este método para comparar datos ráster de valor continuo. El índice utiliza una ventana móvil para generar estadísticas independientes relativas a las similitudes locales en la media, la varianza y la covarianza entre los dos mapas comparados. Estas estadísticas se denominan Similitud en la Media (SIM), Similitud en la Varianza (SIV) y Similitud en el Patrón (SIP). El SSIM puede variar de -1 (disimilitud completa entre mapas) a 1 (similitud completa entre mapas). Por último, se calcularon las medias de cada métrica para producir estadísticas de resumen. La similitud en medias (SIM) y varianzas (SIV) puede variar de 0 a 1, mientras que la similitud en covarianzas o patrón (SIP) puede variar de -1 a 1.

El proceso metodológico completo se ha desarrollado en el IDE RStudio (CORE TEAM, 2017). Todos los scripts y la información para reproducir íntegramente los resultados del presente estudio están a disposición del público en (<https://github.com/>).

## 4. Resultados

### 4.1. Simulación de los diferentes mecanismos de dispersión

Utilizando la localización de los cinco focos identificados y los datos espaciales de la zona de estudio, se calcularon las probabilidades de propagación de la enfermedad por cada mecanismo de dispersión (Fig. 3).

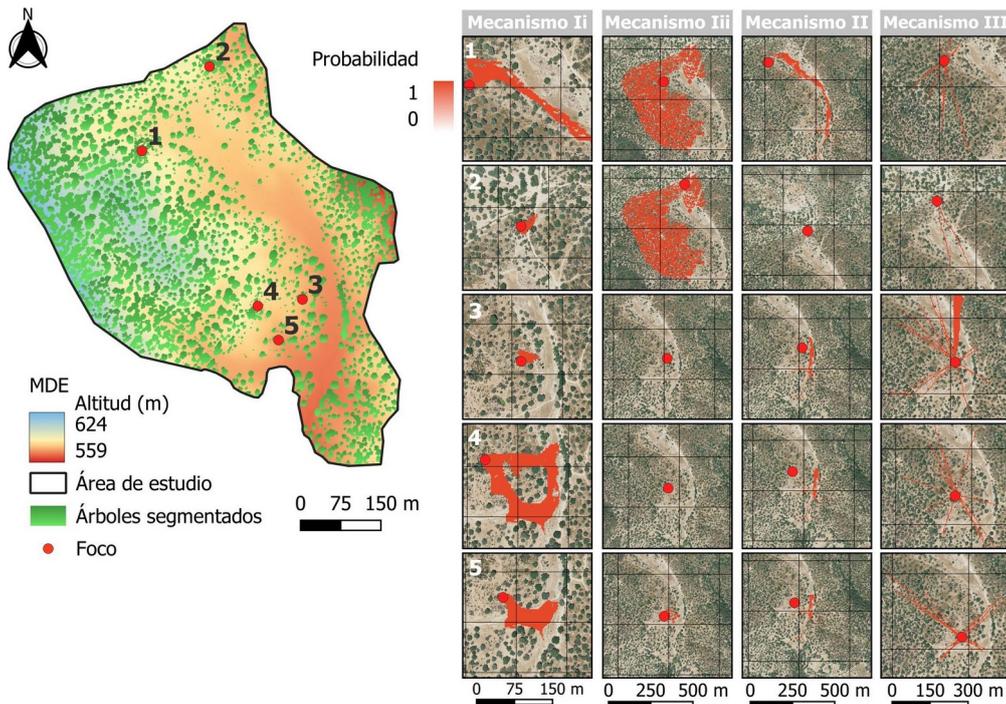


Figura 3. Distribución espacial del riesgo planteado por cada mecanismo de dispersión en la zona de estudio. Los gráficos se generaron mediante QGIS 3.26.3 (<https://www.qgis.org>) con el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y los mosaicos de ortofotos (2016) del CNIG.

La predicción mostró un patrón espacial agregado alrededor de los focos para casi todos los mecanismos de dispersión (Figura 3). Los resultados obtenidos para los mecanismos Ii y II mostraron un patrón espacial agregado y, por tanto, un rango limitado de dispersión. Por el contrario, el mecanismo Iii mostró un patrón espacial desagregado, pero una zona potencial de riesgo más amplia.

#### 4.2. Proyección del índice de riesgo y evaluación de resultados

Utilizamos tres métodos de ponderación para elaborar un índice de riesgo integrado (Figura 4).

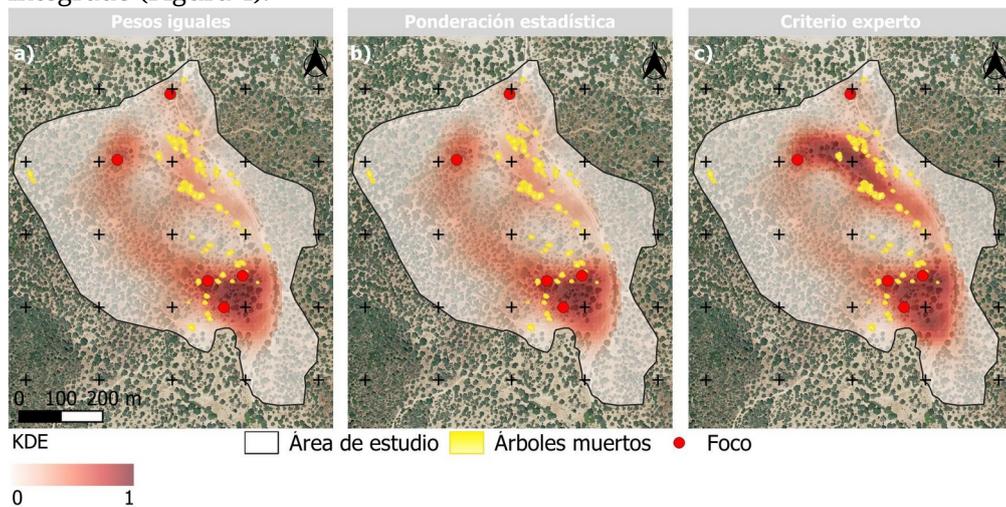


Figura 4. Diferencias espaciales entre las proyecciones del índice de riesgo por cada método de ponderación mediante densidad Kernel. Los gráficos se generaron



*mediante QGIS 3.26.3 (<https://www.qgis.org>) con el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y los mosaicos de ortofotos (2016) del CNIG.*

Se utilizó el índice SSIM para comparar el patrón espacial de mortalidad de árboles y las proyecciones espaciales del índice de riesgo por cada método de ponderación. Dentro de los estadísticos que componen este índice, se calculó el valor medio de SIM, SIV y SIP para la proyección espacial del índice de riesgo obtenido por cada método de ponderación (Figura 4). Los métodos de pesos iguales y ponderación estadística presentaron la mayor similitud en medias (SIM=0,50), y varianza (SIV=0,58), mostrando una estructura espacial positiva entre el riesgo predicho y el patrón espacial de mortalidad de árboles. Sin embargo, la similitud en el patrón fue ligeramente superior para la salida obtenida por el criterio experto (SIP=0,43), indicando similitud en la correlación espacial con el patrón espacial de mortalidad arbórea.

## 5. **Discusión**

El uso de herramientas geoestadísticas y modelos matemáticos para comprender mejor los eventos biológicos o la dispersión de enfermedades ha demostrado ser eficaz en muchos estudios y para diversas enfermedades (RISTAINO & GUMPERTZ, 2000; ROBINET *etal.*, 2012; FIRESTER *etal.*, 2018; HERNÁNDEZ-LAMBRAÑO *etal.*, 2018; CARDILLO *etal.*, 2021). Hemos desarrollado una primera versión de un índice de riesgo para evaluar el desarrollo epidémico a partir de los focos de infección. La metodología utilizada para simular espacialmente los mecanismos de dispersión de Pc permite describir factores asociados a la propagación de la enfermedad y extraer conclusiones cautelosas respecto a la causalidad.

El marco metodológico propuesto es, hasta donde sabemos, el primero que podría utilizarse para evaluar exhaustivamente los procesos de dispersión de Pc y proporcionar un medio para evaluar el riesgo utilizando una métrica simple pero efectiva. Estudios previos se han centrado en mecanismos de dispersión específicos o en componentes únicos de riesgo (BERGOT *etal.*, 2004; LI *etal.*, 2014b; CARDILLO *etal.*, 2018, 2021; VANNINI *etal.*, 2021). También proporcionamos un conjunto predefinido de indicadores generales que se pueden utilizar para cuantificar los diferentes mecanismos de dispersión de Pc y el riesgo de desarrollo de epidemias. Un requisito clave para utilizar enfoques predictivos es que se demuestre su validez para este fin. Esta validación puede dividirse en validez predictiva y validez estructural (ROBINET *etal.*, 2012). El reto clave para la validez predictiva es la disponibilidad de datos. Muchas técnicas de validación de la precisión comparan los aciertos y fallos de la predicción utilizando datos simulados frente a datos reales, pero cuando sólo se dispone de datos de presencia, estas técnicas no pueden utilizarse. Debido a esta escasez de datos utilizables, especialmente para la validación predictiva, no hemos intentado tal validación en este estudio. Por lo tanto, la validación resulta principalmente de la validez estructural: todas las funciones matemáticas se basan o derivan de métodos bien establecidos con una sólida base teórica (RISTAINO & GUMPERTZ, 2000). El marco teórico se evaluó en una dehesa mediterránea de encinas y alcornoques donde se identificaron múltiples focos. La única medida cuantificable para evaluar el índice desarrollado fue el patrón espacial de mortalidad de árboles durante un periodo de siete años. La comparación de los resultados del índice de riesgo con el patrón espacial de mortalidad observado también proporciona una indicación indirecta de su validez. En esta evaluación, la metodología desarrollada funcionó razonablemente bien en el caso estudiado. Los resultados obtenidos mediante simulaciones indican que el modelo fue capaz de reproducir patrones empíricos, presentando patrones



espaciales que se aproximan cualitativa y cuantitativamente a los datos empíricos disponibles (ver Figura 4).

El patrón espacial de mortalidad de árboles en el caso de estudio mostró que la dispersión de Pc tiene una direccionalidad local. Sin embargo, los patrones espaciales previstos para cada mecanismo de dispersión mostraron una propagación multidireccional (ver Figura 3). Esto pone de manifiesto la importancia relativa de unos mecanismos de dispersión frente a otros, o la facilidad del patógeno para propagarse mediante un mecanismo específico. Por lo tanto, la dificultad clave a la hora de utilizar esta metodología es estimar el peso de cada mecanismo de dispersión. Para examinar si las ponderaciones de los parámetros derivadas de cada método de ponderación reflejan el patrón espacial de mortalidad de los árboles, calculamos el Índice de Similitud Estructural (SSIM). Los métodos de pesos iguales y ponderación estadística mostraron los mejores resultados del índice, seguidos del criterio experto. En los criterios experto y ponderación estadística, los pesos de los mecanismos Ii y II fueron las mayores entre los cuatro mecanismos de dispersión simulados. El mecanismo Ii es un parámetro que representa el movimiento del inóculo hacia las raíces en partículas de agua dentro del suelo y el mecanismo II la dispersión del inóculo en agua superficial. Estos resultados, similares a los de (HILL et al., 1994; BENSON et al., 2006; CARDILLO et al., 2018), muestran que los mismos mecanismos de dispersión tienen gran importancia en paisajes con diferentes características ambientales y especies hospedantes. Por otro lado, el movimiento del inóculo a través del contacto de raíz a raíz (mecanismo Iii) y la dispersión del inóculo a través del movimiento de animales (mecanismo III) solo mostraron una influencia menor en el desarrollo de la enfermedad en el caso de estudio. Sin embargo, estos resultados deben interpretarse con cautela, ya que podrían estar condicionados por las características topográficas y el tiempo transcurrido desde la infección.

Aunque nuestra metodología considera los tres principales mecanismos de dispersión de Pc, representa sólo un intento inicial basado en un enfoque multicapa de riesgo único (es decir, produciendo una capa -o ráster- para cada mecanismo por separado, sin considerar explícitamente sus interacciones). Se necesitan estudios adicionales para identificar y caracterizar estas interacciones. Por otra parte, las funciones matemáticas utilizadas para simular cada mecanismo de dispersión pueden adaptarse de diversas maneras para incorporar otras variables que intervienen en los procesos de dispersión del patógeno. Por ejemplo, nuestro planteamiento no aborda los riesgos de introducción por la actividad humana (VANNINI et al., 2021). Por último, este estudio se ha desarrollado sobre la información disponible de un solo caso de estudio. Sería deseable realizar estudios adicionales en sistemas con diferentes características ambientales y composición de especies. Dichos estudios adicionales deberían compararse con el presente estudio para comprobar la eficacia de la metodología presentada y obtener un conocimiento más profundo de los procesos de dispersión de Pc.

## 6. Conclusiones

La evaluación del riesgo de infección mediante análisis espacial y modelos matemáticos permite identificar áreas prioritarias de actuación. Así, este tipo de metodologías pueden constituir una valiosa herramienta para combatir la enfermedad provocada por Pc, ayudando a centrar los recursos en las zonas más relevantes. Además, la metodología aquí presentada podría ser eficaz para predecir la propagación de otras especies de *Phytophthora* con mecanismos de dispersión similares. No obstante, debería estudiarse en profundidad la influencia



de otras variables ambientales o la escala espacial, así como el peso real de los mecanismos de dispersión. Las conclusiones de este estudio se han obtenido mediante una validación indirecta. Sin embargo, su aplicabilidad parece segura debido a la consistencia de los resultados obtenidos mediante el Índice de Similitud Estructural. Por tanto, esta metodología podría ser útil para gestores y propietarios como parte de los programas de gestión integrada de plagas.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el contexto del proyecto LIFE FAGESOS, en el que han participado todos los autores. LIFE FAGESOS está cofinanciado por el Programa Europeo LIFE, bajo el acuerdo de subvención 101074466-LIFE21-CCA-IT-LIFE FAGESOS.

### 7. Bibliografía

- ANTONELLI, C.; BISCONTRI, M.; TABET, D.; VETTRAINO, A. M.; 2022. The never-ending presence of *Phytophthora* species in Italian nurseries. *Pathogens*, 12(1), 15.
- BASSANI, I.; LAROUSSE, M.; TRAN, Q. D.; ATTARD, A.; GALIANA, E.; 2020. *Phytophthora* zoospores: From perception of environmental signals to inoculum formation on the host-root surface. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 18, 3766-3773. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2020.10.045>
- BENSON, D. M.; GRAND, L. F.; VERNIA, C. S.; GOTTWALD, T. R.; 2006. Temporal and Spatial Epidemiology of *Phytophthora* Root Rot in Fraser Fir Plantations. *Plant Disease*, 90(9), 1171-1180. <https://doi.org/10.1094/PD-90-1171>
- BERGOT, M.; CLOPPET, E.; PÉRARNAUD, V.; DÉQUÉ, M.; MARÇAIS, B.; DESPREZ-LOUSTAU, M.; 2004. Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. *Global Change Biology*, 10(9), 1539-1552. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00824.x>
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J.; 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- BREIMAN, L.; 2001. Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32.
- CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V.; 1990. Introduction to plant disease epidemiology. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19912305030>
- 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. *Forest Pathology*, 51(2), e12667. <https://doi.org/10.1111/efp.12667>
- CARDILLO, E.; ACEDO, A.; ABAD, E.; 2018. Topographic effects on dispersal patterns of *Phytophthora cinnamomi* at a stand scale in a Spanish heathland. *PloS one*, 13(3), e0195060.
- 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*. *Agricultural and forest meteorology*, 169, 92-99.
- CORE TEAM, R.; 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria: URL <https://www.R-project.org/>. [Google Scholar].
- DAVIES, T. M.; HAZELTON, M. L.; MARSHALL, J. C.; 2011. Sparr: analyzing spatial relative risk using fixed and adaptive kernel density estimation in R. *Journal of Statistical Software*, 39, 1-14.
- DAVISON, E. M.; 1988. The role of waterlogging and *Phytophthora cinnamomi* in



- the decline and death of *Eucalyptus marginata* in Western Australia. *GeoJournal*, 17, 239-244.
- DUNSTAN, W. A.; RUDMAN, T.; SHEARER, B. L.; MOORE, N. A.; PAAP, T.; CALVER, M. C.; DELL, B.; HARDY, G. E. S. J.; 2010. Containment and spot eradication of a highly destructive, invasive plant pathogen (*Phytophthora cinnamomi*) in natural ecosystems. *Biological Invasions*, 12, 913-925.
- DUQUE-LAZO, J.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; VAN GILS, H.; GROEN, T. A.; 2018. Forecasting oak decline caused by *Phytophthora cinnamomi* in Andalusia: Identification of priority areas for intervention. *Forest Ecology and Management*, 417, 122-136. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.045>
- ERWIN, D. C.; RIBEIRO, O. K.; 1996. *Phytophthora* diseases worldwide. American Phytopathological Society (APS Press).
- FIRESTER, B.; SHTIENBERG, D.; BLANK, L.; 2018. Modelling the spatiotemporal dynamics of *Phytophthora infestans* at a regional scale. *Plant Pathology*, 67(7), 1552-1561. <https://doi.org/10.1111/ppa.12860>
- GÓMEZ-APARICIO, L.; IBÁÑEZ, B.; SERRANO, M. S.; DE VITA, P.; ÁVILA, J. M.; PÉREZ-RAMOS, I. M.; GARCÍA, L. V.; ESPERANZA SÁNCHEZ, M.; MARAÑÓN, T.; 2012. Spatial patterns of soil pathogens in declining Mediterranean forests: implications for tree species regeneration. *New Phytologist*, 194(4), 1014-1024. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04108.x>
- GRIZONNET, M.; MICHEL, J.; POUGHON, V.; INGLADA, J.; SAVINAUD, M.; CRESSON, R.; 2017. Orfeo ToolBox: open source processing of remote sensing images. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0031-6>
- HAGEN-ZANKER, A.; 2006. Comparing continuous valued raster data: A cross disciplinary literature scan. <https://openresearch.surrey.ac.uk/esploro/outputs/book/Comparing-continuous-valued-raster-data-a/99513244202346>
- HERNÁNDEZ-LAMBRAÑO, R. E.; GONZÁLEZ-MORENO, P.; SÁNCHEZ-AGUDO, J. Á.; 2018. Environmental factors associated with the spatial distribution of invasive plant pathogens in the Iberian Peninsula: The case of *Phytophthora cinnamomi* Rands. *Forest Ecology and Management*, 419, 101-109.
- HILL, T. C. J.; TIPPETT, J. T.; SHEARER, B. L.; 1994. Invasion of Bassendean dune *Banksia* woodland by *Phytophthora cinnamomi*. *Australian Journal of Botany*, 42(6), 725-738.
- HOFFMANN, A.; GIOVANNINI, E.; NARDO, M.; SAISANA, M.; SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; 2008. Handbook on constructing composite indicator: methodology and users guide. OECD.
- HULME, P. E.; 2009. Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. *Journal of Applied Ecology*, 46(1), 10-18. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01600.x>
- JUNG, T.; VETTRAINO, A. M.; CECH, T. L.; VANNINI, A.; 2013. The impact of invasive *Phytophthora* species on European forests. *Phytophthora: A global perspective*, 2, 146-158.
- KLIEJUNAS, J. T.; KO, W. H.; 1976. Dispersal of *Phytophthora cinnamomi* on the island of Hawaii. *Phytopathology*, 66(4), 457-460.
- KONGNSO, W. E.; KOMETA, S. S.; NGALA, N. H.; 2024. Multicriterial techniques for wetland identification using geospatial analyses: the case of the Mefou Basin, Centre Region, Cameroon. *International Journal of Energy and Water Resources*, 1-13.
- LAMOUR, K.; 2013. *Phytophthora: A Global Perspective*. CABI.



- LI, A. Y.; WILLIAMS, N.; FENWICK, S. G.; HARDY, G. E. St. J.; ADAMS, P. J.; 2014a. Potential for dissemination of *Phytophthora cinnamomi* by feral pigs via ingestion of infected plant material. *Biological Invasions*, 16(4), 765-774. <https://doi.org/10.1007/s10530-013-0535-7>
- LI, A. Y.; WILLIAMS, N.; FENWICK, S. G.; HARDY, G. E. St. J.; ADAMS, P. J.; 2014b. Potential for dissemination of *Phytophthora cinnamomi* by feral pigs via ingestion of infected plant material. *Biological Invasions*, 16(4), 765-774. <https://doi.org/10.1007/s10530-013-0535-7>
- LIN, H. S.; KOGELMANN, W.; WALKER, C.; BRUNS, M. A.; 2006. Soil moisture patterns in a forested catchment: A hydrogeological perspective. *Geoderma*, 131(3), 345-368. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.013>
- MICHEL, J.; YOUSSEFI, D.; GRIZONNET, M.; 2015. Stable Mean-Shift Algorithm and Its Application to the Segmentation of Arbitrarily Large Remote Sensing Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(2), 952-964. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2330857>
- MORA-SALA, B.; LEÓN, M.; PÉREZ-SIERRA, A.; ABAD-CAMPOS, P.; 2022. New reports of *Phytophthora* species in plant nurseries in Spain. *Pathogens*, 11(8), 826.
- PÉREZ-SIERRA, A.; JUNG, M. H.; JUNG, T.; 2022. Survey and Monitoring of *Phytophthora* Species in Natural Ecosystems: Methods for Sampling, Isolation, Purification, Storage, and Pathogenicity Tests. En N. Luchi (Ed.), *Plant Pathology* (Vol. 2536, pp. 13-49). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2517-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2517-0_2)
- PETROSELLI, A.; VESSELLA, F.; CAVAGNUOLO, L.; PIOVESAN, G.; SCHIRONE, B.; 2013. Ecological behavior of *Quercus suber* and *Quercus ilex* inferred by topographic wetness index (TWD). *Trees*, 27, 1201-1215.
- QIU, J.; MO, X.; LIU, S.; LIN, Z.; 2014. Exploring spatiotemporal patterns and physical controls of soil moisture at various spatial scales. *Theoretical and Applied Climatology*, 118(1), 159-171. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1050-6>
- RISTAINO, J.; GUMPERTZ, M.; 2000. New Frontiers in the Study of Dispersal and Spatial Analysis of Epidemics Caused by Species in the Genus *Phytophthora*. *Annual review of phytopathology*, 38, 541-576. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.38.1.541>
- ROBINET, C.; KEHLENBECK, H.; KRITICOS, D. J.; BAKER, R. H. A.; BATTISTI, A.; BRUNEL, S.; DUPIN, M.; EYRE, D.; FACCOLI, M.; ILIEVA, Z.; KENIS, M.; KNIGHT, J.; REYNAUD, P.; YART, A.; WERF, W. van der.; 2012. A Suite of Models to Support the Quantitative Assessment of Spread in Pest Risk Analysis. *PLOS ONE*, 7(10), e43366. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043366>
- ROY, H. E.; HESKETH, H.; PURSE, B. V.; EILENBERG, J.; SANTINI, A.; SCALERA, R.; STENTIFORD, G. D.; ADRIAENS, T.; BACELA-SPYCHALSKA, K.; BASS, D.; BECKMANN, K. M.; BESSELL, P.; BOJKO, J.; BOOY, O.; CARDOSO, A. C.; ESSL, F.; GROOM, Q.; HARROWER, C.; KLEESPIES, R.; ... DUNN, A. M.; 2017. Alien Pathogens on the Horizon: Opportunities for Predicting their Threat to Wildlife. *Conservation Letters*, 10(4), 477-484. <https://doi.org/10.1111/conl.12297>
- RUIZ-GÓMEZ, F. J.; PÉREZ-DE-LUQUE, A.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; 2019. The involvement of *Phytophthora* root rot and drought stress in holm oak decline: from ecophysiology to microbiome influence. *Current Forestry Reports*, 5(4), 251-266.
- SÁNCHEZ-CUESTA, R.; GONZÁLEZ-MORENO, P.; CORTÉS-MÁRQUEZ, A.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; RUIZ-GÓMEZ, F. J.; 2023. Soil distribution of *Phytophthora cinnamomi* inoculum in oak afforestation depends on site characteristics rather than host availability. *New Forests*, 54(6), 1037-1059. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09951-9>



SÁNCHEZ-CUESTA, R.; RUIZ-GÓMEZ, F. J.; DUQUE-LAZO, J.; GONZÁLEZ-MORENO, P.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; 2021. The environmental drivers influencing spatio-temporal dynamics of oak defoliation and mortality in *dehesas* of Southern Spain. *Forest Ecology and Management*, 485, 118946.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118946>

SHEARER, B. L.; CRANE, C. E.; BARRETT, S.; COCHRANE, A.; 2007. Phytophthora cinnamomi invasion, a major threatening process to conservation of flora diversity in the South-west Botanical Province of Western Australia. *Australian Journal of Botany*, 55(3), 225-238. <https://doi.org/10.1071/BT06019>

SWEENEY, J.; DODDS, K. J.; FETTIG, C. J.; CARNEGIE, A. J.; 2023. IPM: The Forest Context. En *Forest Entomology and Pathology: Volume 1: Entomology* (pp. 581-646). Springer International Publishing Cham.

<https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/63911/1/978-3-031-11553-0.pdf#page=583>

VANNINI, A.; NATILI, G.; ANSELMINI, N.; MONTAGHI, A.; VETTRAINO, A. M.; 2010. Distribution and gradient analysis of Ink disease in chestnut forests. *Forest Pathology*, 40(2), 73-86. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2009.00609.x>

VANNINI, A.; NATILI, G.; THOMIDIS, T.; BELLI, C.; MORALES-RODRIGUEZ, C.; 2021. Anthropogenic and landscape features are associated with ink disease impact in Central Italy. *Forest Pathology*, 51(6), e12722. <https://doi.org/10.1111/efp.12722>

WANG, Z.; BOVIK, A. C.; SHEIKH, H. R.; SIMONCELLI, E. P.; 2004. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600-612. *IEEE Transactions on Image Processing*.

<https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>

WILSON, B. A.; ZDUNIC, K.; KINLOCH, J.; BEHN, G.; 2012. Use of remote sensing to map occurrence and spread of *Phytophthora cinnamomi* in *Banksia* woodlands on the Gngangara Groundwater System, Western Australia. *Australian Journal of Botany*, 60(6), 495-505.