

Fotointerpretación de imágenes aéreas en enfermedades forestales: aplicación al decaimiento de alcornocales y encinares

Ana M^a Esteban Ramajo
Ingeniera de montes

Enrique Cardillo Amo
Doctor ingeniero forestal

Área de Sistemas Forestales Mediterráneos
Instituto del Corcho, la Madera y el Carbón Vegetal
Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de
Extremadura

La fotointerpretación de imágenes aéreas se ha venido empleando en la detección y análisis de enfermedades forestales. Las bases de datos online de ortofotografías, tanto históricas como actuales, han puesto a disposición de la sanidad forestal unos medios que anteriormente resultaban poco accesibles. Una de las mayores preocupaciones en este ámbito es el síndrome de decaimiento que diezma los alcornocales y encinares europeos. Basándonos en la dinámica de la enfermedad, la observación de campo y las imágenes aéreas disponibles de estas masas, hemos elaborado una guía para la fotointerpretación y detección de focos infectados por fitóftora, integrando pautas para el diagnóstico diferencial a fin de evitar la confusión con otras perturbaciones. El empleo de esta metodología ha permitido mejorar la especificidad del diagnóstico y la comprensión de la dinámica epidemiológica de esta enfermedad forestal.

Palabras clave: Detección, diagnóstico, seca, *Phytophthora cinnamomi*.

INICIOS DE LA FOTOGRAFÍA AÉREA

La primera fotografía aérea conocida fue tomada en 1858 por Gaspar Tournachon desde un globo aerostático a 80 metros sobre el suelo de París y en 1909, Wilbur Wright tomó la primera fotografía aérea desde un avión sobre el pueblo de Centocelli en Italia. Solo unos años después, durante la I Guerra Mundial, las fotografías aéreas fueron empleadas por primera vez de forma masiva y regular para el reconocimiento

militar. Las mismas necesidades de cartografía militar durante la II Guerra Mundial y los comienzos de la Guerra Fría hicieron que amplias zonas de Europa fuesen fotografiadas. En España, los dos primeros vuelos que cubren todo el territorio nacional datan de esa época y fueron efectuados por el Army Map Service de EE. UU. (Musson *et al.*, 2013).

En el ámbito forestal, la fotografía aérea ha constituido desde hace más de 100 años una herramienta para la gestión y seguimiento del medio

natural, y desde entonces ha ayudado a conocer mejor el estado y la dinámica de los bosques (Morgan *et al.*, 2010). Se tiene constancia de su uso en la gestión forestal desde 1919, cuando se utilizaron por primera vez para apoyar la realización de inventarios forestales en Canadá (Parry, 1973). Desde los primeros momentos se empleó para clasificar rodales por sus atributos geomorfológicos, por el tipo de masa, o por el volumen maderable que contenían (Gyde Lund, 1997).

La superposición parcial de los fotogramas y el uso del estereoscopio permitió la observación y la medición en tres dimensiones, lo que facilita la distinción entre árboles y matorrales, la medición de alturas, y la estimación de volúmenes.

En España, la fotografía aérea se ha empleado profusamente, tanto para delimitar y caracterizar rodales en los inventarios a escala de monte, como para componer la cartografía forestal a escala nacional. Por ejemplo, la división del territorio en rodales o teselas y la descripción de las formaciones forestales en el Mapa Forestal de España (Ruiz de la Torre, 2000) se realizó mediante la interpretación de las fotografías aéreas del vuelo nacional de 1985 realizado por el Instituto Geográfico Nacional.

USO DE LA FOTOGRAFÍA AÉREA EN SANIDAD FORESTAL

El uso de la fotografía aérea en sanidad forestal data al menos de 1925, cuando entomólogos californianos intentaron detectar los pinos que habían muerto a causa de un ataque de perforadores de corteza (Gyde Lund, 1997). En la década de 1950 se emplearon extensamente en EE. UU. y Canadá pequeños aviones de ala alta para tomar fotos aéreas oblicuas, no fotogramétricas, como herramienta para la detección de daños causados por insectos y enfermedades forestales (Ciesla, 1976). Sin embargo, la utilidad de estas técnicas tradicionales de seguimiento está limitada por la restringida cobertura espacial y por la inevitable subjetividad de los evaluadores (Backsen y Howell, 2013; Dash *et al.*, 2017).

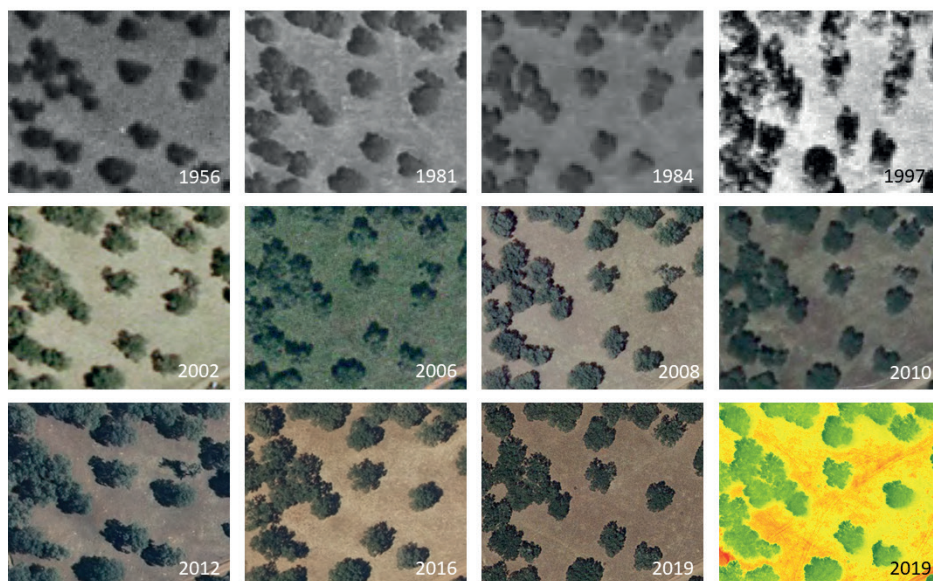


Figura 1 Serie histórica mostrando las imágenes obtenidas en los vuelos de fotografía aérea sobre una dehesa extremeña. 1956 Vuelo Americano B (1,0 m resolución), 1981 Interministerial (0,5 m), 1984 Nacional (1,0 m), 1997 Oleícola (1,0 m), 2002 SIGPAC (0,5 m), 2006 PNOA (0,5 m), 2008 PNOA (0,25 m), 2010 PNOA (0,5 m), 2012 PNOA (0,25 m), 2016 PNOA (0,25 m), 2019 PNOA (0,25 m) y 2019 Agrodron (0,06 m) multiespectral. Ortoimágenes CC-BY 4.0 CICTEx. Junta de Extremadura.

Los mapas de incidencia de enfermedades o plagas forestales proporcionan información útil en la toma de decisiones para la prevención o el control de la enfermedad. Para estos objetivos, las ventajas de la fotografía aérea son indudables, ya que permite revelar patrones, evaluar la extensión, y estimar la intensidad y el desarrollo de la enfermedad de una forma que raramente puede conseguirse desde el terreno (Brenchley, 1968; Mattupalli *et al.*, 2018). Del mismo modo, pueden proporcionar datos para planear y ejecutar las cortas sanitarias o comprobar los efectos de los tratamientos.

Podemos afirmar entonces que los datos obtenidos de esta manera permiten monitorizar y medir el progreso de las áreas afectadas, pero son difíciles de obtener (Ristaino y Gumpertz 2000; Holdenrieder *et al.* 2004). Idealmente se busca contar con un sistema de detección que permita descubrir focos con bajos niveles de actividad de plagas o enfermedades, de tal modo que pueda prevenirse el desarrollo de las principales epidemias (Ciesla *et al.*, 1976).

Con este marco, el especialista en sanidad forestal busca detectar pequeñas diferencias entre las copas

de los árboles sanos y enfermos. Dependiendo del estado y tipo de daño, los síntomas pueden indicar una disminución en la cantidad de clorofila o de agua en las hojas, una decoloración o una defoliación parcial (Chen *et al.*, 2016). La mayoría de estos síntomas son detectables observando la porción del espectro electromagnético (longitudes de onda entre 400 y 700 nm) que percibe el ojo humano (Chen *et al.*, 2016; Mattupalli *et al.*, 2018). No obstante, para captar estas diferencias es necesario el empleo de sensores, ópticas y alturas de vuelo adecuadas (Ciesla, 2000).

Los sistemas de detección tradicionales exigen la intervención de profesionales y su entrenamiento periódico para el reconocimiento de signos y síntomas de los principales problemas de plagas y enfermedades de una región (Hogg y Weste 1975; Ciesla *et al.*, 1976). Así mismo, la detección de estas perturbaciones viene a menudo condicionada por la dinámica del agente causal y del daño ocasionado, de modo que en muchas ocasiones solo se dispone de una ventana temporal limitada que define el momento óptimo para la observación y la toma de datos (Ciesla, 2000; Paine y Kiser, 2012).

Los sistemas más modernos, basados en el uso de sensores

multiespectrales y el análisis de imagen, han permitido en algunos casos la detección previsual de los árboles que se encuentran en dificultades. Además, representan ventajas si se comparan con los sistemas manuales de detección aérea, en términos de exactitud espacial y automatización del análisis (Hill et al. 2009, Dash et al., 2017).

La elección del sensor viene dada por la sensibilidad preestablecida y por la manifestación del impacto fisiológico que el agente patógeno provoca en las características observables de las hojas y copas (Dash et al., 2017). Las características de la superficie de la hoja, su grosor, su estructura interna y el contenido en pigmentos, por un lado, y la estructura y geometría característica de la copa y la orientación misma de las hojas por otro, son factores que influyen en la radiación reflejada (Chen et al., 2016).

La fotografía aérea puede tomarse bajo un amplio rango de condiciones de iluminación, prácticamente en cualquier época del año, programando la hora y fecha en función de las necesidades de un determinado proyecto (Gyde Lund, 1997). Sin embargo, estos proyectos a la carta son bastante costosos, a menos que se empleen drones para explorar pequeñas superficies. Afortunadamente las administraciones públicas españolas desarrollan planes de fotografía aérea de todo el territorio a alta resolución.

COLECCIONES DE FOTOGRAFÍA AÉREA PÚBLICA DISPONIBLES

El archivo de fotografías aéreas en España abarca más de 70 años de cobertura completa del territorio con imágenes de alta resolución espacial (fig. 1), de modo que conforma el registro más largo disponible para la caracterización histórica del estado y dinámica de los bosques. Su resolución espacial (0,25 – 1,00 metros) proporciona más detalle que otras fuentes de datos de larga trayectoria, como los obtenidos por los satélites Landsat desde los años 70. Sin embargo, no ocurre lo mismo con la resolución espectral, que fue mejorando desde el pancromático (blanco y negro) al color visible, y

desde la película y el papel al soporte digital. Otra desventaja de estos vuelos frente a los datos de satélite es su escasa resolución temporal (10-20 años), que mejoró (2-3 años) con la puesta en marcha del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) a principios de este siglo.

Las colecciones históricas con cobertura nacional con imágenes digitalizadas, mosaicadas y georreferenciadas, están disponibles para su descarga o para consulta vía servicios del tipo WMS (warehouse management system), tanto en las agencias de las comunidades autónomas como en el Instituto Geográfico Nacional. Los vuelos históricos de ámbito nacional son los siguientes:

- 1945-1946 Americano Serie A: vuelo fotogramétrico realizado en los años 1945-46 por el Army Map Service de EE. UU. con la colaboración del Ejército del Aire. Fotogramas en blanco y negro de escala aproximada 1:43.000.
- 1956-1957 Americano Serie B: vuelo fotogramétrico realizado en los años 1956-57 por el Army Map Service de EE. UU. Fotogramas en blanco y negro a escala 1:32.000.
- 1967-1968 Americano Serie C: solo abarca la franja central de la península ibérica. Fotogramas en blanco y negro a escala 1:45.000. No está publicado en formato digital.
- 1973-1986 Interministerial: realizado por encargo de los ministerios de Agricultura, Defensa y Hacienda, y del Instituto Geográfico y Catastral (actual Instituto Geográfico Nacional). Fechas de vuelo de 1973 a 1986. Fotogramas en blanco y negro a escala 1:18.000.
- 1980-1986 Nacional: realizado por encargo del Instituto Geográfico y Catastral (actual Instituto Geográfico Nacional). Fechas de vuelo de 1980 y 1986. Fotogramas en blanco y negro a escala 1:30.000.
- 1997-1998 Olistat: realizado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación para crear el Sistema de Información Geográfica Oleícola. Fotogramas en blanco y negro a escala 1:30.000.

- 1997-2002 SIGPAC: realizado por el Ministerio de Agricultura mediante el Fondo Español de Garantía Agraria (FEGA) para crear el Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas. Fechas de vuelo de 1997 a 2003. Fotogramas en blanco y negro y a color. Escala entre 1:15.000 y 1:30.000.
- 1998-2003 Quinquenal: realizado por encargo del Instituto Geográfico Nacional. Fechas de vuelo de 1998 a 2003. Fotogramas en blanco y negro y en color a escala 1:40.000.

A partir de 2004 se inicia el PNOA, cuyo objetivo es la obtención de ortofotografías aéreas digitales con resolución de 25 o 50 cm, con un período de actualización de 2 o 3 años, según las zonas. Se trata de un proyecto cooperativo en vigor y está cofinanciado entre la Administración General del Estado y las comunidades autónomas (Arozarena y Villa, 2004).

APLICACIÓN EN LA DETECCIÓN DEL DECAIMIENTO DE ENCINAS Y ALCORNOCOS

El CICYTEX-ICMC ha empleado la fotografía aérea en diversos estudios epidemiológicos de la enfermedad del decaimiento de la encina y el alcornoque causada por *Phytophthora cinnamomi*. Considerando que las técnicas puestas a punto pueden ser útiles para la comunidad forestal, se exponen a continuación los criterios empleados.

Aunque los principales síntomas causados en encinas y alcornoques son la pudrición y desaparición del sistema radical fino (raicillas) y la presencia de lesiones necróticas en las raíces no suberizadas, estos suelen pasar desapercibidos a simple vista y desde luego no pueden ser observados desde el aire. Los síntomas observables son individualmente, pie a pie, inespecíficos, pero si se toman en conjunto observando el rodal, y se ponen en contexto, forman un cuadro que puede tener valor de diagnóstico.

Este conjunto de síntomas cobra especial relevancia en el caso de que la enfermedad curse como un decaimiento progresivo, porque

implica el establecimiento de un gradiente espacial y temporal en su aparición. El gradiente (fig. 2 y 3) se inicia con el árbol sano y puede llegar hasta los últimos estadios de descomposición de la copa después de la muerte.

Como las infecciones se van produciendo constantemente a lo largo de varios años, y no de forma episódica, es habitual observar los distintos estadios (fig. 3), tanto en un mismo pie a lo largo del tiempo como en focos formados por un conjunto de pies próximos; hecho este que permite distinguir el decaimiento de otras perturbaciones de origen puntual, como las provocadas por un incendio o por un tratamiento de poda intensa. En algunos casos la enfermedad se presenta con la muerte súbita del individuo (fig.

4), bien en pies asintomáticos, sin defoliación previa, o en pies que ya

habían mostrado algunos síntomas y defoliaciones parciales.

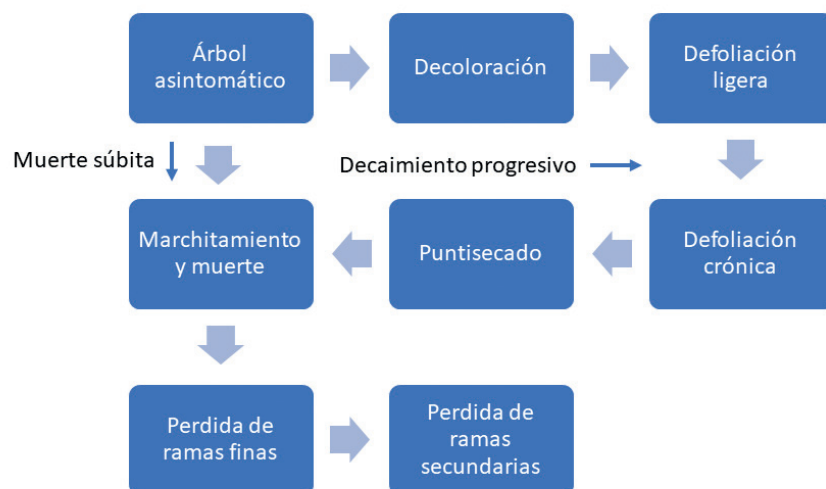


Figura 2 Diagrama de flujo mostrando la secuencia de síntomas del decaimiento provocado por *Phytophthora cinnamomi* en encinas y alcornoques.



Figura 3 Secuencia fotográfica que ilustra el gradiente de síntomas característicos del decaimiento progresivo sufrido por encinas infectadas por *Phytophthora cinnamomi* en una dehesa de Extremadura. De arriba a abajo y de izda. a dcha., pueden observarse encinas en distintas etapas de decaimiento: pie sano asintomático (A), defoliación incipiente (DI), puntisecado (P), defoliación avanzada (DA), marchitamiento o muerte súbita (S), defoliación avanzada 70 % (DA70) defoliación avanzada 90% (DA90) y pies muertos que conservan solo parte de la estructura de ramas (T).

CRITERIOS DE FOTOINTERPRETACIÓN

Textura, color, forma, tamaño, patrón, sitio y contexto constituyen los rasgos cualitativos fundamentales para la interpretación de imágenes aéreas. Aunque cada uno de estos rasgos puede variar con la escala, la estación del año y el tipo de película o soporte empleado, la información que proporcionan es esencial para la clasificación y el diagnóstico. Por otra parte, el conocimiento del territorio, la familiarización con las especies y su ecología, así como el aspecto que presentan desde el aire, son capacidades que el intérprete necesita para hacer un uso efectivo de las imágenes (Morgan *et al.*, 2010).

A continuación (tabla 1), se describe cada uno de estos rasgos y cómo pueden servir de criterio para la detección de focos de decaimiento de alcornoque y encina infectados por *P. cinnamomi* cuando son observados mediante imagen área (fig. 5 y 6);



Figura 5 Foco de decaimiento con encinas infectadas por *Phytophthora cinnamomi* en distintas etapas de decaimiento. Pueden observarse: pies sanos asintomáticos (A), defoliación incipiente (DI), puntisecado (P), defoliación avanzada (DA), marchitamiento o muerte súbita (S) y pies muertos que conservan solo parte de la estructura de ramas (T). Imagen aérea de 2019 (color RGB y 0,25 m de resolución). Ortoimágenes CC-BY 4.0 CICTEx. Junta de Extremadura.

para seguidamente, establecer una relación, por fases de decaimiento,

entre las imágenes terrestres convencionales y las aéreas (tabla 2).



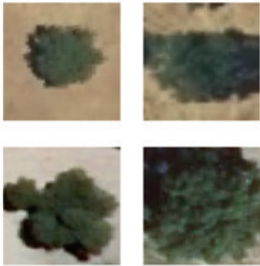
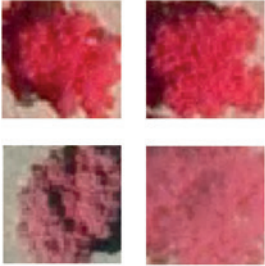
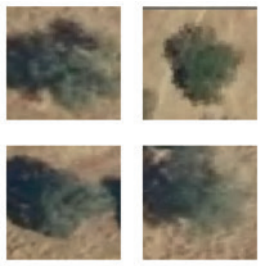
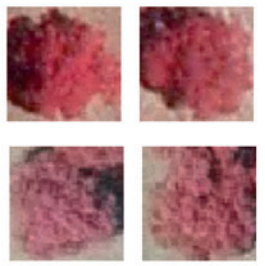
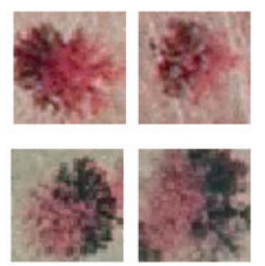
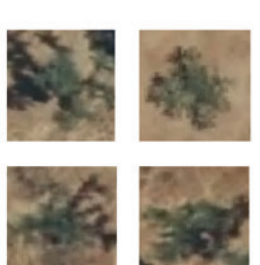
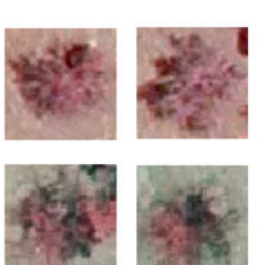
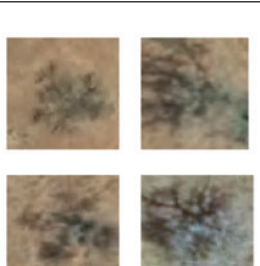
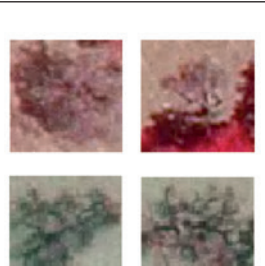
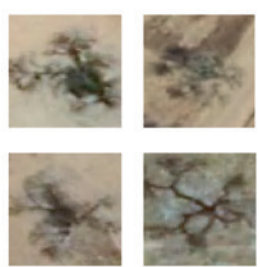
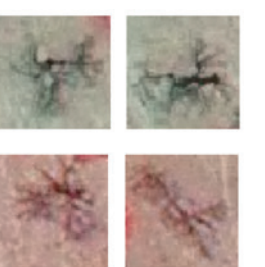
Figura 4 Aspecto de los árboles afectados por muerte súbita en alcornoques y encinas infectados por *Phytophthora cinnamomi*.



Figura 6 Evolución temporal de síntomas y mortalidad en un foco de decaimiento en una masa mixta de alcornoques y encinas infectados por *Phytophthora cinnamomi*. Fotografías del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Ortoimágenes CC-BY 4.0 CICTEx. Junta de Extremadura.

Tono o color	Criterios para la detección
El tono, brillo relativo de los píxeles, y el color, como percepción de la reflectancia espectral visible, permiten no solo distinguir entre las superficies artificiales o naturales, sino que pueden ayudar incluso a distinguir entre las especies vegetales. Por ejemplo, las coníferas aparecen más oscuras que las frondosas.	A medida que el árbol se va defolando, el color pasa de un verde intenso a tonos más pálidos, y posteriormente se va haciendo más transparente. Sin embargo, en el caso de la muerte súbita se produce un cambio de color apreciable, ya que la copa se marchita en unos días y pasa de un tono verde intenso a un blanco o amarillo atabacado.
Forma	Criterios para la detección
La forma describe la complejidad geométrica del borde de cada entidad. Por ejemplo, las formas rectas son típicas de entidades artificiales mientras las curvadas o irregulares abundan entre los objetos naturales. Por ejemplo, la forma recta del tejado de una casa ayudaría a distinguirlo de la copa de un árbol que tuviera el mismo tamaño y color.	Este es un rasgo muy importante ya que el borde de la copa de los árboles infectados presenta modificaciones drásticas a medida que el árbol se defolia. Pasa de una forma llena y globosa con la copa intacta a una forma estrellada en donde solo permanece la estructura de ramas. La forma puede ayudar a distinguir el decaimiento por tratamientos como las podas. La poda tradicional transforma la copa desde una forma circular llena a un dibujo típico en anillo y en los casos más severos a ramas con el característico aspecto de cola de león.
Tamaño	Criterios para la detección
El tamaño de un objeto viene dado por el área o número de píxeles que ocupa. El tamaño puede ayudar a distinguir entre especies forestales; por ejemplo, las copas de alcornoques son significativamente más grandes que las de los olivos, e incluso, llegan a tener mayor desarrollo que las de las encinas.	En los árboles enfermos la copa no cambia de tamaño rápidamente. El tamaño de las copas puede servir para distinguir especies o clases de edad.
Textura	Criterios para la detección
La textura refleja la variabilidad en el tono o color de los píxeles que componen una entidad. La textura puede estar referida a la copa de un solo árbol o a todo un rodal, y proporciona considerable información acerca de las especies y de sus características físicas relacionadas con su identidad y estado. La textura del árbol viene determinada por la forma de su copa, la estructura de sus ramas, e incluso por el tipo de hoja y su orientación (Gyde Lund. 1997). Por ejemplo, la textura de un encinar o un alcornocal es más granular que la de un matorral, y esta a su vez menos fina que la de un pastizal.	La copa sana presenta una textura granular que se corresponde con los grupos de hojas de las ramas terminales. A medida que el árbol se defolia, esta textura pasa a ser más suave y difuminada, presentando un aspecto borroso.
Sombra	Criterios para la detección
Las sombras pueden dar al intérprete una buena visión de la forma de los objetos y de la altura a la que se encuentran sobre el suelo. Debe tenerse en cuenta la posición del sol, que depende de la fecha y la hora de la toma. Por ejemplo, la longitud de la sombra permite distinguir entre árboles y matorrales.	La sombra ayuda a revelar detalles difícilmente observables. Por ejemplo, la sombra revela rasgos como los ramillos de los árboles puntisecos y la presencia de árboles muertos hace bastante tiempo, que ya solo presentan troncos y ramas principales residuales.
Patrón	Criterios para la detección
El patrón describe la distribución espacial y repetición de las entidades a lo largo de un área más extensa. Por ejemplo, en una repoblación forestal o en una plantación de leñosas como un olivar, los árboles se suelen distribuir siguiendo alineaciones y formando patrones geométricos.	El patrón espacial de árboles sintomáticos es un rasgo fundamental para la fotointerpretación del decaimiento producido por <i>Phytophthora</i> . Este patrón espacial característico consiste en la presencia simultánea en una zona limitada o foco de árboles en distintos estadios de defoliación. El patrón espacial evoluciona también con el tiempo (fig. 6) de modo que en una serie temporal de imágenes se puede observar la evolución de los árboles y la expansión del foco o el surgimiento de otros en sus inmediaciones.
Sitio y contexto	Criterios para la detección
La latitud, la longitud, la elevación, la orientación, y la posición topográfica son factores que afectan a las condiciones ecológicas que influyen en la distribución de las especies, y por tanto pueden contribuir a identificar especies y procesos. Por ejemplo, en torno a un cauce se pueden esperar especies de rivera. El contexto es el rasgo que describe las condiciones del entorno de una entidad. Por ejemplo, una población de árboles integrada en un núcleo urbano constituirá un parque y no una masa forestal.	El entorno de los árboles en decaimiento puede ayudar al diagnóstico. Por ejemplo, en algunas granjas de porcino y otros cercados ganaderos donde la densidad de animales es muy elevada, pueden observarse síntomas y patrones muy parecidos a los que provoca <i>P. cinnamomi</i> . Sin embargo, las construcciones, los apriscos, los cerramientos, e incluso la presencia de los propios animales pueden indicar que estos síntomas son debidos a otras causas como la compactación del suelo o el exceso de purines. Algo similar ocurre en las orillas de pantanos en los que cambios del nivel freático muy acusados pueden provocar mortalidades repentinas similares a la muerte súbita.

Tabla 1. Rasgos cualitativos para la detección de focos de decaimiento y de alcornoques y encinas infectados por *Phytophthora cinnamomi*.

Estadio de decaimiento	Imagen convencional oblicua	Imagen aérea en color	Imagen aérea en falso color infrarrojo
Asintomático (A)			
Defoliación incipiente (DI)			
Defoliación crónica o puntisecado (P)			
Defoliación avanzada (DA)			
Marchitamiento y muerte (totalmente defoliado) (S)			
Perdida de ramas finas (muerto hace más de un año; T1)			

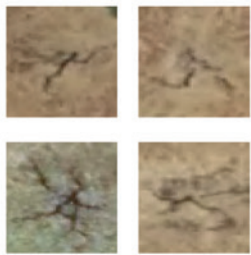
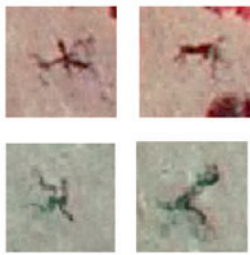
Estadio de decaimiento	Imagen convencional oblicua	Imagen aérea en color	Imagen aérea en falso color infrarrojo
Perdida de ramas secundarias (muerto hace más de tres años; T3)			

Tabla 2. Clave para identificar los estadios de decaimiento provocado por la infección de *Phytophthora cinnamomi* en encinas y alcornoques observados mediante fotografía aérea en color e infrarrojo de alta resolución. En el infrarrojo se pueden observar las diferencias de tono entre imágenes de primavera (fila superior) y de verano (fila inferior).

DIAGNÓSTICO DIFERENCIAL

El diagnóstico diferencial es el procedimiento mediante el que se consigue atribuir una causa a un cuadro de síntomas cuando existen varias causas posibles que comparten gran parte de los rasgos de diagnóstico. El procedimiento exige un buen conocimiento de las causas posibles y de los rasgos específicos que permiten establecer la diferencia. En el caso del decaimiento forestal, el diagnóstico diferencial es especialmente relevante ya que muchos de los rasgos y signos de diagnóstico no son específicos.

Así, la sequía, la defoliación por plagas de insectos, la compactación y contaminación del suelo, la inundación periódica, los incendios forestales y las podas, son algunas de las perturbaciones más comunes que producen una sintomatología similar. A tenor de lo anterior, se dan criterios para identificar los rasgos de diagnóstico diferencial basados en la fotointerpretación.

Defoliadores

La oruga de *Lymantria dispar*, conocida como lagarta peluda, es un defoliador que puede acabar con toda la hoja de los árboles. Aunque en Extremadura existen algunos brotes de esta plaga muy localizados, como el diagnosticado en 2004 entre los términos municipales de San Vicente de Alcántara (Badajoz) y Valencia de Alcántara (Cáceres), en otras zonas, como el parque de los Alcornocales en Andalucía, la incidencia es mayor.

Como criterio para el diagnóstico

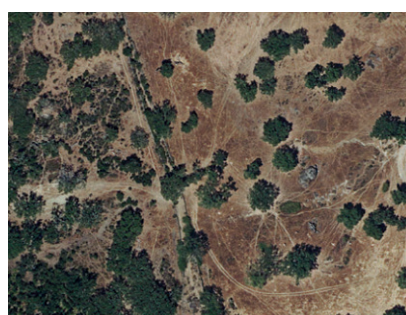


Figura 7 Brote de *Lymantria dispar* en una dehesa de alcornoque en Valencia de Alcántara. El estado de defoliación es intermedio y bastante homogéneo en los pies afectados. Imagen PNOA de 2019.

diferencial, puede tenerse en cuenta que esta defoliación raramente termina con la vida de los árboles, por lo que no es habitual observar pies en las últimas fases del gradiente de decaimiento (fig. 7). Los árboles rebrotan anualmente y suelen recuperar su copa, por lo que el gradiente temporal tampoco se observa. Actualmente, y salvo zonas concretas, la aparición de estos focos de defoliadores es rara, y por lo general, los servicios de sanidad vegetal mantienen registros de su presencia.

Podas

Las podas, especialmente en la encina, tradicionalmente se aprovechan para leña y la estimulación de la producción de bellota. Como la técnica es común (aunque no la intensidad), los árboles aparecen con una geometría típica idéntica (fig. 8). El centro de la copa se deja vacío, con tres o cuatro ramas principales



Figura 8 Contraste entre una zona de encinar podada (dcha.) y otra sin podar (izda.). Las copas podadas presentan una geometría bastante similar y con la forma típica de cola de león. Dehesa de encinas en Extremadura, imagen PNOA 2007.

bastante desnudas y ramillos y hojas concentrados hacia su final (forma de “cola de león”). La poda no produce un gradiente de defoliación, y los márgenes de la zona podada suelen coincidir con cercas y límites de parcelas.

Concentraciones de ganado

Las altas cargas ganaderas que se concentran en granjas de porcino, en cercas de reducido tamaño, o en las proximidades de apriscos y balsas de agua, pueden provocar decaimiento en los árboles que permanecen en su interior. Este decaimiento es causado por la acción del pisoteo del ganado, que produce una alta compactación del suelo, y por la contaminación debida a un exceso de purines.

El criterio para distinguir este tipo de decaimiento del provocado por *P. cinnamomi* se basa en la observación del contexto. Los árboles afectados están encerrados por la cerca ganadera, y la defoliación no

ocurre fuera de sus límites (fig. 9). La presencia de instalaciones ganaderas, como naves, abrevaderos, del propio ganado, el suelo desnudo y los signos de erosión extrema, indican las altas cargas de ganado.

Incendios forestales

Los incendios forestales pueden provocar la defoliación y la muerte de encinas y alcornoques, dependiendo de su intensidad. Inmediatamente después del fuego, la zona es reconocible por la presencia de ceniza y el aspecto de las copas. Pero pasado un tiempo, algunos árboles logran rebrotar total o parcialmente, y en otros casos solo permanecen los restos o troncos de los pies muertos. Los servicios forestales y otras agencias tienen registro georreferenciado de estos incendios. Estos datos pueden encontrarse en el *European Forest Fire Information System* (EFFIS).

Como criterio diferencial podemos tener en cuenta que estos incendios son episodios puntuales, y por tanto la afección no progresa ni se mantiene en el tiempo (fig. 10). Cuando la observación se hace transcurridos unos pocos años desde el momento del fuego, lo más probable es que se observen pies muertos y otros totalmente sanos, pero que estén ausentes las etapas intermedias de decaimiento, típicas de los focos causados por *Phytophthora cinnamomi*.

PROTOCOLO DE APLICACIÓN CON APOYO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Instrucciones para la detección de focos de decaimiento mediante imágenes en color (RGB) del PNOA de alta resolución con el apoyo de un sistema de información geográfica:

1. Crear un proyecto con sistema de referencia compatible con los servicios WMS de imágenes de la agencia suministradora del PNOA.
2. Cargar los servicios WMS del PNOA de los vuelos deseados. Conviene emplear, al menos, dos vuelos separados unos 5 años.
3. Crear una malla de referencia (malla.shp) de polígonos rectangulares que cubra el área de trabajo. El



Figura 9. Granja de porcino en una dehesa de encina en Extremadura. Los árboles con defoliación y muertos se encuentran dentro de las cercas ganaderas, próximos a instalaciones pecuarias y se observan signos evidentes de erosión del suelo. Imagen PNOA 2007.



Figura 10. Comparativa de las imágenes aéreas de una dehesa de encina antes (arriba, 2016) y después de un incendio (abajo, 2019). Árboles han desaparecido y se observan algunos muertos (troncos), pero no hay gradiente claro de defoliación. El incendio tuvo lugar en julio de 2017. Imágenes PNOA Extremadura.

- tamaño de polígono se elegirá de modo que un rectángulo ocupe la pantalla a la escala de trabajo elegida. La escala 1:2000 es típicamente un buen compromiso entre calidad de la detección y productividad.
4. En la tabla de atributos de la malla de referencia crear un campo bandera '1/0' para distinguir las zonas ya observadas (1) de las no observadas aún (0).
5. En la simbología de la capa, clasificar la malla por ese campo bandera y poner el '0' en modo transparente y el '1' en un tono opaco.
6. Se pueden poner en '1' los polígonos sin interés, por ejemplo, cruzando la malla con los datos de la especie en estudio en el Mapa Forestal de España.
7. Poner el zoom de pantalla a la escala de observación deseada (p. ej., 1:2000).
8. Comenzar por la primera cuadrícula superior izquierda y seguir navegando por filas en zigzag.
9. Observar en cada cuadrícula la presencia de focos de seca conforme a los criterios de fotointerpretación mencionados:
 - a. Comprobar rasgos de forma, tamaño, presencia de sombra, etc., para asegurar que son árboles (encinas o alcornoques). Se puede consultar datos del mapa forestal o de visitas al campo.
 - b. Confirmar la presencia del gradiente de decaimiento (tabla 2):
 - i. Varios estadios de síntomas

- en un mismo vuelo (fig. 5).
 - ii. Evolución temporal comparando imágenes de varias fechas (fig. 6).
- c. Descartar patrones producidos por otras perturbaciones:
 - i. Cercas ganaderas de reducida extensión.
 - ii. Inundación en orillas de lagunas, balsas, etc.
 - iii. Podas.
 - iv. Incendios forestales.
 - v. Defoliadores.
10. Ampliar el zoom si es necesario para observar detalles.
 11. Cuando se verifique la presencia de un número mínimo preestablecido de pies sintomáticos (p. ej., 3), dibujar alrededor un polígono mínimo envolvente hasta cubrir la extensión de la zona afectada. Se puede digitalizar como entidad gráfica o como cobertura de polígonos.
 12. La extensión máxima y/o la división en focos individuales debe hacerse conforme a criterios preestablecidos de distancia entre árboles y tamaño máximo del foco.
 13. Al terminar de explorar la cuadrícula (unos 2-3 min), marcarla como procesada consignando un '1' en el campo bandera en la tabla de atributos de la malla de referencia (malla.shp).
 14. Pasar a la siguiente cuadrícula, y al terminar la fila, actualizar la simbología.
 15. Al finalizar la sesión, convertir gráficos a entidades y/o guardar los polígonos envolventes en un fichero focos.shp.

16. Guardar el proyecto.

VALOR DE DIAGNÓSTICO Y CONCLUSIONES

Para valorar la eficacia de esta metodología se reconocieron, empleando los vuelos PNOA del 2007 y del 2016, una zona de 50 000 ha de encinares y alcornoques en el centro de Extremadura (Cardillo *et al.*, 2021). En una muestra de los focos detectados se prospectó el suelo y las raíces de los pies sintomáticos para intentar el aislamiento del patógeno. En el 50 % de las muestras recogidas se aisló *P. cinnamomi*, identificándolo por rasgos morfológicos y mediante secuenciación de las regiones ITS 4 y 6 de su ADN. Habida cuenta de la baja probabilidad de aislamiento (alrededor del 25 %) de los métodos de muestreo y laboratorio convencionales, puede considerarse que los criterios de fotointerpretación empleados permiten localizar focos más eficientemente y aumentar la especificidad del diagnóstico.

En este trabajo se pasa revista al valor de la fotografía aérea como herramienta para la detección y diagnóstico de enfermedades forestales. En concreto,



se dan criterios para su empleo en casos de decaimiento causado por *Phytophthora cinnamomi* en encinares y alcornoques. El uso de series de imágenes temporales y de la interpretación del contexto espacial

permite aumentar la especificidad del sistema de detección; especialmente si se compara con el método tradicional basado en la observación de individuos aislados por observadores sobre el terreno.

Referencias

- Arozarena A., Villa G. 2004. Presentación del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea de España (PNOA). VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía. Madrid.
- Backsen, J. C., & Howell, B. 2013. Comparing aerial detection and photo interpretation for conducting forest health surveys. *Western Journal of Applied Forestry*, 28(1), 3-8.
- Brenchley, G H. 1968. Aerial Photography for the Study of Plant Diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 6(1), 1-20.
- 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*. <https://doi.org/10.1111/EFP.12667>
- Chen, G., & Meentemeyer, R. K. 2016. Remote sensing of forest damage by diseases and insects. *Remote Sensing for Sustainability*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 145-162.
- Ciesla, W.M. Cadahia, D., Robredo, F. 1976. La detección de plagas de insectos y enfermedades forestales. *Bol. Serv. Plagas* 2: 37-53.
- Ciesla, W. M. 2000. Remote sensing in forest health protection (No. 3). US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Health Technology Enterprise Team.
- Dash, J. P., Watt, M. S., Pearse, G. D., Heaphy, M., & Dungey, H. S. 2017. Assessing very high-resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 1-14.
- Gyde Lund H. 1997. Chapter 11: Forestry. In: Philipson, Warren R., Editor-in-Chief. *Manual of Photographic Interpretation*, Second Edition. Bethesda, MD: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 399-440.
- Hill, R.J., Wilson, B.A., Rookes, J.E. et al. 2009. Use of high resolution digital multi-spectral imagery to assess the distribution of disease caused by *Phytophthora cinnamomi* on heathland at Anglesea, Victoria. *Australasian Plant Pathology* 38, 110-119. <https://doi.org/10.1071/AP08092>
- Holdenrieder O., Pautasso M., Weisberg P J., Lonsdale D. 2004. Tree diseases and landscape processes: the challenge of landscape pathology. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(8), 446-452.
- Hogg, J., & Weste, G. 1975. Detection of die-back disease in the Brisbane Ranges by aerial photography. *Australian Journal of Botany*, 23(5), 775-781.
- Mattupalli, C., Moffet, C. A., Shah, K. N., & Young, C. A. 2018. Supervised classification of RGB aerial imagery to evaluate the impact of a root rot disease. *Remote Sensing*, 10(6), 917.
- Morgan JL, Gergel SE, Coops NC. 2010. Aerial photography: a rapidly evolving tool for ecological management. *BioScience* 60: 47-59.
- Musson, C.; Palmer, R.; Campana, S. 2013. *Flights into the Past. Aerial Photography, Photo Interpretation and Mapping for Archaeology*; AARG—ArLand: Heidelberg, Germany.
- Paine, D. P., & Kiser, J. D. 2012. *Aerial photography and image interpretation*. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey.
- Parry, J.D. 1973. The Development of Air Photo Interpretation in Canada. *The Canadian Surveyor*. 27(4), 320-351.
- 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*. *Annual Review of Phytopathology*, 38(1), 541-576.
- Ruiz de la Torre, J. 2002. *Mapa Forestal de España*. Escala 1:200.000. Memoria general. Org. Aut. Parques Nacionales, Madrid.