

Uso de imágenes hiperespectrales para la predicción del marchitamiento de *Pinus halepensis* (Mill.) en el bosque mediterráneo

Guillen-Climent, M.L.¹, Mas, H.², Fernández-Landa, A.¹, Algeet-Abarquero, N.¹, Tomé J.L.¹

¹ Agresta S. Coop., C/Duque de Fernán Nuñez, 2, Madrid, España.

² Centre per a la Investigació i Experimentació Forestal (CIEF) Vaersa/Laboratori de Sanitat Forestal, Avda. Corts Valencianes, 20, Valencia, España.

Resumen: El incremento de los efectos negativos del cambio climático y la aparición de especies invasoras en los bosques de todo el mundo requieren el desarrollo de métodos innovadores para monitorear y medir cuantitativamente el estado de salud de las masas arboladas. Estos efectos son especialmente notables en el área mediterránea, donde el decaimiento de las masas por sequías recurrentes ha incrementado los daños por plagas secundarias cuyas poblaciones, de otro modo, estarían en equilibrio. Las tecnologías de teledetección nos permiten afrontar trabajos en grandes superficies con una precisión razonable. En particular, se ha demostrado que nuevos índices espectrales obtenidos a partir de imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución son buenos predictores para la detección temprana de cambios fisiológicos relacionados con enfermedades. En este estudio piloto desarrollado en una masa de *Pinus halepensis* en la Comunitat Valenciana, se lleva a cabo una simulación controlada de decaimiento por medio del anillado secuencial de árboles, haciendo un posterior seguimiento en campo del decaimiento que provoca. La captura de imágenes hiperespectrales de alta resolución ha permitido analizar la relación entre la información espectral en cada uno de los árboles anillados con su decoloración y estado de decaimiento observado. La metodología propuesta permite la detección de árboles afectados con tres meses de antelación a la aparición de síntomas visuales, clasificándolos con un nivel de acierto superior a 0,9 con los clasificadores *Random Forest* y *Support Vector Machine*. Los índices que generaron mejores resultados fueron PRI, VOG1, VOG2, GM1 y OSAVI. Este estudio piloto permite pensar que algunos de estos índices puedan ser utilizados en la detección temprana de marchitamientos generales de los pinares y, por tanto, tengan aplicación en la monitorización de las principales amenazas de los bosques europeos, las plagas de perforadores o los organismos de cuarentena como *Bursaphelenchus xylophilus*.

Palabras clave: hiperespectral, decoloración, anillamiento, *Random Forest*, *Tomicus destruens*.

Using hipersepectral images for decay detection in *Pinus halepensis* (Mill.) in the Mediterranean forest

Abstract: The increasing negative effects of climate change and the emergence of invasive species in forests around the world require the development of innovative methods to monitor and quantitatively measure the health status of woodlands. These effects are especially notable in the Mediterranean area, where the decline

To cite this article: Guillen-Climent, M.L., Mas, H., Fernández-Landa, A., Algeet-Abarquero, N., Tomé J.L. 2020. Using hipersepectral images for decay detection in *Pinus halepensis* (Mill.) in the Mediterranean forest. *Revista de Teledetección*, 55, 59-69. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13289>

* Corresponding author: mguillen@agresta.org

of stands due to recurrent droughts has increased the damage caused by secondary pests whose populations would otherwise be in balance. Remote sensing technologies allow us to work on large surfaces with reasonable precision. In particular, new spectral indices obtained from high-resolution hyperspectral and thermal images have been shown to be good predictors for the early detection of physiological changes related to diseases. In this pilot study developed in a stand of *Pinus halepensis* in the Comunitat Valenciana, a controlled simulation of a decay is carried out by means of sequential girdling of trees, making a subsequent field monitoring of the caused decay. Through a hyperspectral camera, the spectral information of each of these trees is analyzed in relation to their discoloration and state of observed decay. The proposed methodology allows the detection of affected trees three months before the appearance of visual symptoms, obtaining a precision higher than 0.9 with *Random Forest* and *Support Vector Machine* classifiers. The vegetation indices with better results were PRI, VGO1, VGO2, GM1 and OSAVI. This pilot study allows us to think that some of these indices can be used in the early detection of general pine wilt and, therefore, have application in the monitoring of the main threats to European forests, borer pests or quarantine organisms such as *Bursaphelenchus xylophilus*.

Key words: Remote sensing, Forest declaim, Girdling, Random Forest, *Tomicus destruens*.

1. Introducción

Existe una creciente preocupación por el cambio climático, en particular por el aumento de temperatura y los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera, así como por las variaciones en las precipitaciones, y su relación con los impactos observados en nuestros bosques asociados a la aparición de especies invasoras (Trenberth et al., 2014).

En el caso de los bosques mediterráneos, el estado fitosanitario de los mismos está vinculado tanto a la fluctuación característica de su clima como a otros procesos de carácter ecológico, por ejemplo la recurrencia del fuego (Resco de Dios et al., 2007). Además de ello, actualmente, en un contexto de cambio climático, parece haber aumentado la intensidad y la frecuencia de aparición de estos y otros eventos meteorológicos extremos (tormentas, nevadas, sequías...) los cuales provocan situaciones de debilidad transitoria en el arbolado (Hódar et al., 2012). Esta debilidad es aprovechada por plagas (tanto primarias como semiagresivas) para aumentar sus poblaciones a partir del material de cría (madera muerta o debilitada) puesto a su disposición. Es el caso fundamental de los escolítidos y otros perforadores de la madera (Vega y Hofstetter, 2014).

La gestión de las plagas de estos insectos perforadores siempre ha sido compleja, y aunque los últimos años ha habido un importante avance en la mejora de los métodos de tratamientos fitosanitarios mediante la endoterapia, ésta aún no parece ser una herramienta aplicable a grandes

extensiones de masas forestales (Berger et al., 2019). El mecanismo de control que se mantiene vigente en la gestión de este tipo de plagas es la vigilancia, la detección de árboles sintomáticos y su extracción del monte (o descortezado) antes de la emergencia de las nuevas generaciones (Dimitri et al., 1992).

En este marco conceptual se hace evidente que una monitorización de grandes superficies que, a su vez, permita la detección temprana de árboles debilitados que aún no han mostrado síntomas visibles, supondría un avance importante en la planificación de la gestión de la salud de los bosques, especialmente en lo referente a las plagas como los insectos barrenadores.

De igual modo, este tipo de monitorización también sería de gran utilidad en la gestión de algunos organismos de cuarentena, como la Enfermedad del Marchitamiento del Pino, causada por *Bursaphelenchus xylophilus*, el Nematodo de la Madera del Pino (NMP) cuyos síntomas son muy similares a los provocados por los escolítidos, es decir, un marchitamiento más o menos rápido del arbolado afectado (Beck et al., 2015). En este sentido, en 2015, la Comisión Europea publicó un documento poniendo de manifiesto la utilidad de la teledetección como herramienta de monitoreo para sanidad forestal (Beck et al., 2015), y aunque el estudio se centró en el NMP, las oportunidades tecnológicas para detectar masas arbóreas con decaimiento basadas en teledetección son de aplicabilidad en la lucha contra otras plagas y enfermedades.

Actualmente, los sensores hiperespectrales y térmicos de alta resolución aerotransportados pueden detectar en cada árbol cambios fisiológicos, que después son interpretados mediante algoritmos de aprendizaje automático y modelos físicos. Esos indicadores permiten determinar, para cada árbol de la imagen, si está sano o enfermo, independientemente de que en el campo muestre síntomas visuales o no (Beck et al., 2015, Poblete et al., 2020).

Recientes investigaciones muestran que nuevos índices obtenidos de imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución pueden ser indicadores adecuados para la detección temprana de cambios fisiológicos relacionados con estrés fisiológico, plagas y enfermedades (Abdullahab et al., 2018, Hernández-Clemente et al., 2019).

El objetivo de este estudio piloto es sentar las bases para el desarrollo de un modelo que, a partir de información hiperespectral, permita detectar, antes de la aparición de síntomas visuales, aquellos árboles que han iniciado un proceso irreversible de decaimiento debido a la interrupción del flujo de savia en el floema.

2. Materiales y métodos

Como aproximación general, el estudio se basó en provocar, de manera artificial y controlada, el marchitamiento progresivo de varios grupos de árboles de una masa forestal sana y monitorizar el proceso decaimiento tanto en campo como mediante técnicas de teledetección. Es decir, en primer lugar, realizando en campo un seguimiento periódico visual durante todo el proceso de decaimiento. Y en segundo lugar, analizando imágenes hiperespectrales tomadas en un vuelo planificado en el momento adecuado antes de la aparición de síntomas visuales. El estudio pretende ser de aplicación por parte de trabajadores que desempeñan su labor en la gestión de masas forestales, por lo que la posibilidad de tomar medidas fisiológicas se ha descartado, basando la investigación en mediciones que se obtienen en las visitas a campo.

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio está ubicada en el Monte de Utilidad Pública La Muela, Roquettillo y Feliciano, CS3021M1 (Jérica, Castellón), $39^{\circ}52'56,50''N$ $0^{\circ}32'6,46''O$ (Figura 1). Ocupa una superficie de 95 ha de una masa forestal de *Pinus halepensis*

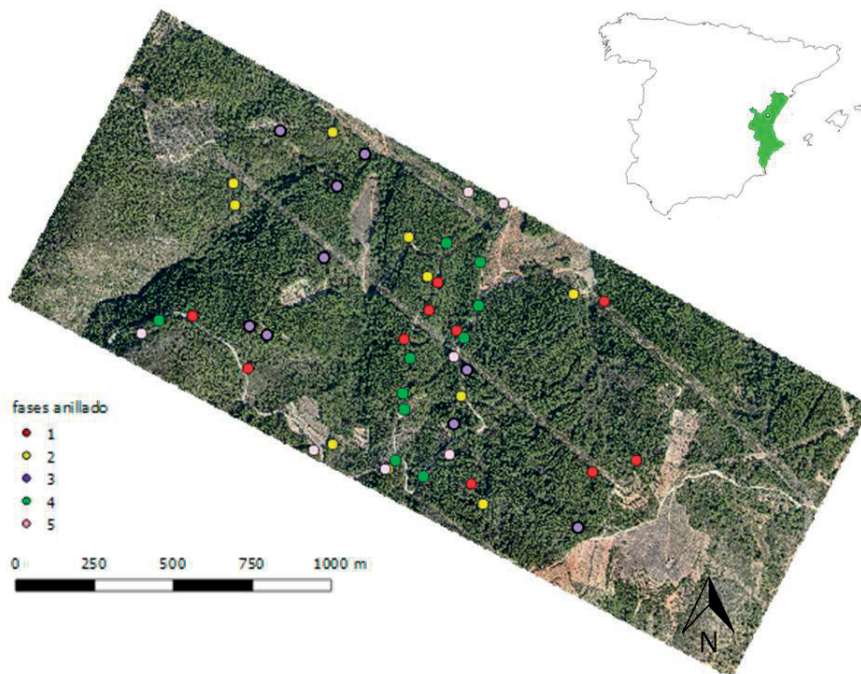


Figura 1. Localización del área de estudio y los pies anillados secuencialmente según colores.

con distribución uniforme (FCC=90%) y 5 m de altura media, con *Quercus coccifera* como especie acompañante (con individuos dispersos y FCC=10%), situada a una altitud de entre 520 y 857 msnm. Se trata de una repoblación naturalizada que en el momento de la realización del estudio se encontraba vigorosa y con buen estado fitosanitario, si bien habían sido detectados ataques por perforadores en zonas cercanas al área de estudio y la zona había sufrido una fuerte sequía entre la primavera de 2013 y el otoño de 2015.

2.2. Trabajo de campo

Para provocar el decaimiento progresivo fue utilizada una técnica de anillamiento, o *girdling* (Johnsen et al., 2007), que consistió en la remoción completa de una tira de corteza y floema de 10 cm de altura, alrededor de toda la circunferencia del tronco. El anillamiento fue realizado con hacha manual a una altura de 1 m del suelo.

De esta forma se pretendió emular, en condiciones controladas, la aparición de síntomas de decaimiento y marchitez similares a los que pudieran producirse tras un corte de flujo de savia en el floema.

Para ello, se seleccionaron aleatoriamente 44 árboles de la zona de estudio (Figura 1), que fueron anillados sucesivamente en 5 sesiones de anillado llevadas a cabo entre octubre de 2016 y abril de 2017 (Tabla 1) con el objetivo de conseguir un gradiente en el avance o intensidad del decaimiento. Posteriormente, tras la realización del primer anillado, se llevó a cabo, con periodicidad mensual, una revisión visual en campo del estado fitosanitario de todos los árboles. Se identificaron tanto los signos de decoloración visual como la presencia de perforadores en el floema. En el momento en que fueron detectados síntomas de decoloración en un primer pie, se tomaron imágenes con cámara

hiperespectral aerotransportada. Esperar a este momento nos permitió asegurar, con mayor fiabilidad, un gradiente de afectación en los diferentes árboles que habían sido anillados escalonadamente. No obstante, la evaluación de índices de detección de árboles con síntomas visuales no es objeto de este estudio. El vuelo fue realizado el 5 de octubre de 2017.

El anillado secuencial (Tabla 1) permitió analizar cinco diferentes tiempos de anillado en un solo vuelo, es decir, cinco niveles de afección del anillado sobre la fisiología del árbol. En el momento del vuelo solo 3 pies habían mostrado síntomas (amarilleamiento, anaranjado, y muerte respectivamente). Posteriormente al vuelo el reconocimiento visual en campo prosiguió con una frecuencia de 14 días hasta octubre de 2018.

La medición visual de la decoloración es realizada adaptando los criterios homogéneos establecidos por el ICP (Michel y Seidling, 2016) a los establecidos en el Manual de Campo de la Red de Daños de Nivel I a nivel europeo (SSF-DGDRyPF, 2012) y a la clasificación realizada tradicionalmente por los gestores de la zona con el objetivo de respetar la aplicabilidad en la gestión y conseguir coherencia con los datos históricos de la zona tomados por el Servicio de Ordenación y Gestión Forestal de la Conselleria d'Agricultura, Desenvolupament Rural, Emergència Climàtica i Transició Ecològica de la Generalitat Valenciana (Tabla 2) desde el año 1998.

2.3. Adquisición y procesamiento de imágenes

Para la adquisición de imágenes hiperespectrales en la zona de estudio, se siguieron las indicaciones sugeridas por el Joint Research Center (Beck et al., 2015). La cámara utilizada fue una Micro-Hyperspec VNIR (Headwall Photonics, Fitchburg, MA, USA), y se montó a bordo de un avión tripulado. Las imágenes fueron adquiridas a 400 m sobre el nivel del suelo, obteniendo una resolución espacial de 40 cm de píxel. La cámara se ajustó a 50 fps con un tiempo de integración de 18 ms, utilizando una lente de 8 mm de distancia focal para obtener un campo de visión instantáneo (IFOV) de 0,93 mrad y campo de visión angular (FOV) de 50°. Las imágenes se recogieron en la región de 400-885 nm con 44 bandas. La ortorrectificación y

Tabla 1. Secuencia de anillamiento y pies anillados.

Fecha anillamiento	Nº pies anillados	Fase pies anillados	Tiempo entre anillamiento y vuelo (días)
24/10/2016	11	1	346
21/11/2016	10	2	318
21/12/2016	10	3	288
07/04/2017	10	4	181
28/04/2017	7	5	160

Tabla 2. Códigos visuales de decoloración.

Nivel	ICP (Michel, A., y Seidling, W., 2016)	Red Daños Nivel I (SSF-DGDRyPF, 2012)	GVA
0		Decoloración Nula	Decoloración Nula. Árbol verde
1	Light green to yellow discolouration	Decoloración Ligera	Decoloración Ligera. Decoloración inicial del color verde en tránsito hacia el color amarillo
2	Light green to yellow discolouration	Decoloración Moderada	Decoloración Moderada. Color amarillo
3	Bronzing	Decoloración grave	Decoloración grave. Color anaranjado
4	Red to brown discolouration (incl. necrosis)	Árbol seco	Árbol seco: acículas marrones, muertas.
	Other colour		Otro color

calibración radiométrica fue llevada a cabo según la metodología descrita por Zarco-Tejada (2016). En paralelo a la adquisición de imágenes hiperespectrales se utilizó una cámara Nikon D800E para tomar imágenes en la franja espectral del visible 400-800 nm con una resolución espacial de 5 cm con objeto de localizar con mayor precisión los árboles de la muestra de ajuste y validación.

A partir de las 44 bandas de la imagen hiperespectral se computaron un total de 55 índices de vegetación propuestos por Calderón et al. (2013). Estos índices de vegetación están relacionados tanto con parámetros estructurales como con parámetros bioquímicos de la vegetación.

2.4. Modelos de clasificación y selección de variables

Se delimitaron un total de 120 copas de árboles, las 44 copas de los árboles anillados y hasta 76 copas de árboles control seleccionados aleatoriamente en la masa de pinar. Para cada una de las 120 copas se calculó el valor medio de los índices de vegetación de los píxeles incluidos en su copa. Esta muestra de copas delineadas se dividió aleatoriamente en dos submuestras: una de entrenamiento y una de validación, con el 80% y 20% de los datos respectivamente.

Para la detección de árboles anillados se utilizaron tres técnicas diferentes de clasificación no paramétrica: Árboles de Decisión, *Random Forest* (Breiman, 2001) y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM, por sus siglas en inglés *Support Vector Machine*). Los tres clasificadores fueron analizados mediante una curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), analizando el área bajo la curva (AUC) para determinar cuál de ellos proporcionaba resultados más precisos.

Para la selección de índices de vegetación se aplicó el algoritmo VSURF (Genauer et al., 2010). El análisis que realiza es un procedimiento de selección de variables para modelos *Random Forest* pensado para manejar bases de datos con un número elevado de variables. En un primer paso se eliminan variables irrelevantes del conjunto de datos. En el siguiente paso, se eliminan variables relacionadas con la respuesta para fines de interpretación, seleccionando el mejor conjunto de variables con fines de predicción en el último paso (Genauer et al., 2015).

Se ha utilizado la sensibilidad (o ratio de verdaderos positivos) y la especificidad (ratio de verdaderos negativos) para analizar la capacidad de los modelos para separar árboles anillados de no anillados. En el caso de los falsos negativos se ha analizado el tiempo que los pies han permanecido sin síntomas visuales tras la fecha de captura de la imagen hiperespectral. El tiempo de aparición de síntomas fue anotándose en las visitas posteriores al vuelo.

Por último, se comparó la signature espectral de cada grupo de árboles que fueron clasificados como sintomáticos y no sintomáticos, evaluando la franja del espectro de mayor separabilidad espectral.

3. Resultados

El anillamiento secuencial de los árboles, en diferentes sesiones, dio como resultado un gradiente amplio de fases de decaimiento en los pies anillados. En general, los árboles anillados fueron amarilleando y muriendo paulatinamente durante las semanas posteriores a la toma de imágenes hiperespectrales, aunque dos años después aún 3 árboles anillados continuaban sin mostrar

Tabla 3. Índices de vegetación seleccionados por VSURF.

Índice de vegetación	Fórmula	Referencia
Photochemical reflectance index PRI	$(R_{570}-R_{531})/(R_{570}+R_{531})$	Gamon et al., 1992
Vogelmann indices		
VGO1	R_{740}/R_{720}	Vogelmann et al., 1993.
VGO2	$(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{726})$	Zarco-Tejada et al., 1999
Gitelson and Merzlyak index GMI	R_{750}/R_{550}	Gitelson y Merzlyak, 1996
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index OSAVI	$[(1+0,16)(R_{800}-R_{670})]/(R_{800}+R_{670}+0,16)$	Rondeaux et al., 1996

R_n : reflectancia en la longitud de onda n.

síntomas de decaimiento. Asimismo todos los árboles que desarrollaron síntomas visuales y muerte habían sido colonizados previamente por escolítidos, fundamentalmente *Tomicus destruens* (Wollaston,1865), algunas veces acompañado por *Orthotomicus erosus* (Wollaston,1857).

En el momento exacto del vuelo, la firma espectral obtenida en árboles control y árboles anillados permitió identificar con claridad los diferentes gradientes, es decir, los árboles pertenecientes a cada tanda o sesión de anillamiento (Figura 2) y, por tanto, con diferentes tiempos desde que se produjo el corte de flujo de savia en el floema.

Todos estos árboles que mostraron síntomas murieron posteriormente, es decir, la aparición de síntomas de decoloración conllevó el proceso irreversible de la muerte.

De los 55 índices de vegetación considerados, los índices de vegetación seleccionados por VSURF

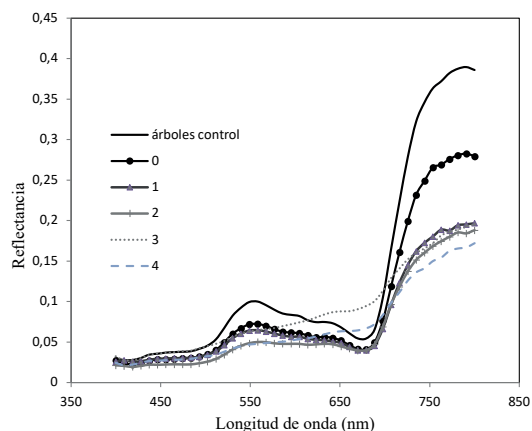


Figura 2. Signatura espectral media de árboles control, anillados sin síntomas de decoloración (0), y signatura espectral de árboles anillados que presentaron grado de decoloración 1, 2, 3 y 4.

como más influyentes fueron PRI, VGO1, VGO2, GMI y OSAVI. La ecuación de cada uno de ellos, así como el significado de los acrónimos y la fase de VSURF en que fueron seleccionados, se muestra en la Tabla 3. En el caso del ajuste realizado con árboles de decisión, la variable seleccionada fue VGO1.

Las clasificaciones obtenidas con *Random Forest* y SVM arrojaron para la muestra de validación valores similares de AUC 0,947 y 0,952 respectivamente y sensiblemente mejor que el obtenido mediante la aplicación de árboles de decisión, AUC 0,816. La Tabla 4 muestra los resultados de sensibilidad, especificidad y AUC para los tres tipos de modelos utilizados.

En todos los casos (Árbol de decisión, *Random Forest* y SVM), el 100% de los pies anillados no detectados (falsos negativos) tardaron más de 47 días en presentar síntomas grado 1 (Tabla 2). Algunos pies no detectados como anillados estuvieron más de un año sin presentar síntomas visuales de decaimiento. El árbol de decisión obtuvo un 100% de sensibilidad (detectó todos los pies anillados) pero con un valor de especificidad bajo (0,63), que supone que un 37% de los pies control se clasificaron como anillados. El modelo SVM es el que mostró un valor de especificidad más alto (0,89). Tanto el modelo *Random Forest* como el SVM mostraron unos valores de especificidad y sensibilidad equilibrados (Tabla 4). Cuando los

Tabla 4. Parámetros estadísticos para cada uno de los clasificadores utilizados.

	Sensibilidad	Especificidad	AUC
Árbol de decisión	1	0,63	0,816
<i>Random Forest</i>	0,91	0,84	0,947
<i>SVM</i>	0,82	0,89	0,952

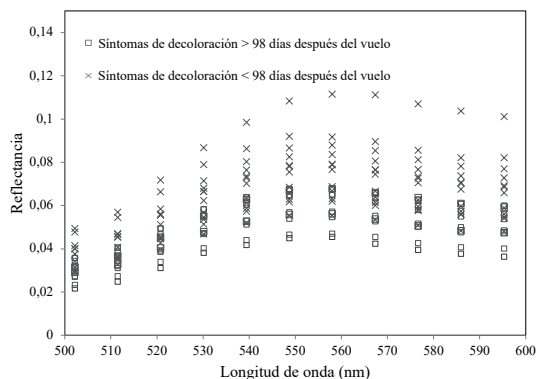


Figura 3. Separación espectral de pies con síntomas de decaimiento y asintomáticos 98 días después del vuelo.

síntomas tardan en aparecer más de 98 días tras el vuelo, el número de falsos negativos es del 100%.

En la Figura 3 se muestra la respuesta espectral de árboles que presentaron decoloración antes y después de un periodo de 98 días tras la captura de la imagen, teniendo una mayor separación espectral en las longitudes de onda 500-600 nm. A partir de esta fecha árboles que empiezan a mostrar síntomas grado 1 no consiguen ser discriminados frente a los controles.

4. Discusión

El estudio realizado supone un aporte a las bases de una metodología que podría ser utilizada como un sistema de alerta temprana para la detección de árboles debilitados con una antelación de varios meses con respecto a la aparición de síntomas visuales. En el ámbito de la gestión, la disponibilidad de medios para realizar trabajos forestales no es continua, ni los mecanismos administrativos para disponer de ellos son ágiles (Pérez-Laorga, Com Pers), por lo que la detección temprana cobra una especial relevancia, ya que permite la utilización de dichos medios durante márgenes temporales más amplios.

Desde la perspectiva de la sanidad forestal, la principal causa de muerte de coníferas en la Comunitat Valenciana (y en los pinares mediterráneos en general) viene derivada de un mal funcionamiento del sistema conductor de los árboles, provocado por causas abióticas (como la sequía o la compactación del terreno) o por causas

bióticas (ataques del escolítidos, fundamentalmente *Tomicus destruens*) (PATFOR, 2013).

En este sentido, este estudio buscó provocar un colapso en el sistema circulatorio de forma controlada. El corte en la conducción del floema tras el anillamiento provoca una disminución de la conductancia estomática, que es consecuencia de su propia inhibición debido al exceso de acumulación de fotosintatos en hojas, puesto que mediante el anillamiento se corta fundamentalmente su transporte a la parte inferior del anillo y a las raíces (Domec y Pruyn, 2008). No obstante, diferentes estudios prueban que en algunas especies el corte en el floema derivado de un anillamiento puede reducir también la conductividad del xilema, es decir, no solo afectar al balance de carbono de la planta, sino también a su estatus hídrico (López et al., 2015).

Esta situación, cualitativamente, podría ser comparable a la derivada de un ataque de perforadores. Aunque las consecuencias fisiológicas de este último parecen más complejas y no del todo bien conocidas, en general, la alimentación y cría de los escolítidos en el floema interrumpe el transporte de fotosintatos desde las copas de los árboles, y los hongos simbiotes introducidos en el sistema vascular de los árboles por los escolítidos inhiben el transporte de agua a través del xilema desde las raíces hasta las copas.

De modo que parece razonable pensar que nuestros resultados, aunque parten con el único objetivo de evaluar el efecto del anillamiento sobre ejemplares de pino carrasco, sientan las bases de una posible aplicabilidad a situaciones generales de debilidad provocadas por un mal funcionamiento del sistema conductor de los árboles.

Por otro lado, el anillamiento supuso la fase previa de debilidad que propició una colonización de *T. destruens*. Además, la progresión de los síntomas visuales de los árboles anillados siguió una evolución idéntica a la observada tradicionalmente en el caso de colonizaciones por *T. destruens*. En este sentido, el estudio muestra la posibilidad de detectar aquellos pies lo suficientemente debilitados como para permitir una colonización exitosa del escolítido.

La toma en consideración de las dos variables utilizadas en el seguimiento en campo (decoloración y colonización por perforadores) se realizó

respetando los mecanismos de monitorización de la salud de los bosques realizados en la zona por los gestores forestales para el caso de plagas y enfermedades como los perforadores de pinos o el NMP. Se pretendió de esta forma que los resultados del estudio tuviesen una aplicabilidad directa sobre la gestión, toda vez que la toma de otros datos fisiológicos más robustos es inasumible por parte de los gestores, alejada del pragmatismo y de las necesidades de la gestión y, por tanto, de muy baja aplicación directa en ella.

En este sentido, la variable decoloración, a una escala general en la valoración del estado fitosanitario, puede no estar completamente relacionada con el estado fisiológico del árbol y que su valoración sea difícilmente objetivable. No obstante, se trata de una variable utilizada históricamente en la evaluación de la sanidad forestal a escala global (Ferretti, 1997; Granke y Mues, 2010; SSF-DGDRyPF, 2012), y es la utilizada por los gestores en la propia zona de estudio para indicar la presencia de focos de perforadores. Asimismo, en la Comunitat Valenciana se recaban estos datos de manera homogénea desde 1998 en referencia a los daños provocados por perforadores.

En efecto, en la zona de estudio la gestión de los focos de perforadores (el apeo y descortezado de pies colonizados) se realiza como respuesta a la detección visual de árboles sintomáticos y a la posterior comprobación de la presencia de escolítidos en su interior. Estos árboles sintomáticos son considerados por los órganos de gestión como aquellos que han iniciado un proceso de decaimiento que conlleva siempre una gradación temporal del color de las acículas.

Por lo tanto, aunque su uso a una escala general en la evaluación fitosanitaria adolece de las deficiencias comentadas, en el caso concreto de este estudio, teniendo en cuenta que el seguimiento de la decoloración ha sido realizado por un único observador, y que los síntomas generados por ataques de escolítidos siguen siempre una misma progresión en cuanto a la decoloración de los pies afectados y que ésta ha sido el indicador utilizado para la gestión en la zona de estudio, la utilización de esta variable, combinada con la presencia de perforadores, es considerada por los autores como útil y adecuada por ser la más sencilla y la de mayor aplicación técnica en este caso concreto.

Con respecto a la monitorización mediante imágenes hiperespectrales, estudios recientes demuestran la capacidad de sensores hiperespectrales y térmicos de detección precoz el estrés fisiológico y la incidencia de plagas o enfermedades forestales (Beck et al., 2015). Los decaimientos de los árboles provocados por daños en sus sistemas vasculares son difícilmente identificables en los primeros estadios por métodos visuales ya que el estrés fisiológico derivado del corte de flujo tarda un tiempo en manifestarse visualmente a través de la decoloración de las hojas producida por la degradación de sus pigmentos fotosintéticos (Stone y Mohammed, 2017). No obstante, desde el inicio de la interrupción del flujo se empiezan a producir procesos fisiológicos como la reducción de la tasa fotosintética y de la transpiración, el cambio de las concentraciones foliares de los pigmentos fotosintéticos mencionados, o la reducción paulatina de la fluorescencia clorofílica (Carter et al., 2001; Liu et al., 2019). Algunos de estos procesos son potencialmente detectables mediante técnicas de teledetección hiperespectral y pueden ser indicadores no específicos del estado fisiológico de salud de los árboles (Carter et al., 2001). Los índices que encontramos como principales para diferenciar árboles sanos de árboles estresados, en concreto el índice de reflectancia fotoquímica (PRI) y los índices calculados para bandas *red edge* tales como el índice de Vogelmann (VGO1), han mostrado ser útiles para diferenciar hojas sintomáticas de no sintomáticas en investigaciones previas (Poblete et al., 2020). El PRI es un índice sensible al proceso de-epoxidación de las xantofilas, mecanismo que se pone en marcha tras un cierre estomático bajo condiciones de estrés hídrico (Suárez et al., 2008). Por otro lado, los índices de Vogelmann, SWIR/NIR ratio, muestran también capacidad para estimar transpiración foliar por lo que nuevamente puede explicar que en este estudio sean de interés ya que el estado hídrico de los árboles se está viendo afectado.

Los resultados de este trabajo confirman las posibilidades de aplicación de variables procedentes de sensores remotos para la estimación de árboles debilitados que aún no presenten síntomas. Índices relacionados con el estado hídrico de la vegetación (PRI) e índices relacionados con la actividad fotosintética (VGO1, VGO2) han mostrado ser representativos para una correcta identificación. Estos resultados están en concordancia con los

encontrados en Poblete et al. (2020) o Calderon et al. (2015).

Por último, la supervivencia de algunos de los árboles anillados hasta 3 años después del anillamiento podría deberse a injertos radiculares con pies vecinos que permiten eventualmente compartir fotosintatos y otros productos transportados a través del floema (Stone, 1974).

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que el momento de vuelo fue adecuado, ya que ha permitido tener una diferencia espectral importante entre árboles que han sido anillados escalonadamente. Para diferenciar entre árboles debilitados por el anillamiento y árboles control, los índices espectrales más idóneos son aquellos que utilizan para su cálculo las regiones del SWIR y el *red-edge*, encontrado también en resultados derivados de trabajos previos (Delegido et al., 2011; Hilker et al., 2008). Los clasificadores que permiten identificar con más precisión árboles que presentan decaimiento son *Random Forest* y SVM.

Sería interesante testar esta metodología en áreas afectadas por especies de plagas con mayor impacto económico como especies de perforadores primarias (*Ips sexdentatus*, *Ips acuminatus*, *Ips typographus*) o por NMP analizando su posible aplicación como método operativo de detección temprana.

El uso de la metodología que se presenta en este artículo podría permitir identificar árboles debilitados y atractivos para *T. destruens* y, por tanto, realizar los tratamientos de control incluso tres meses antes de la aparición de síntomas visuales, lo cual, en casos de focos importantes y recursos de personal (brigadas forestales) limitados, puede llegar a suponer un margen de tiempo muy valioso que permita la gestión total y adecuada del foco.

Los resultados obtenidos sientan las bases para la elaboración de una cartografía de riesgos de infección frente a perforadores detectando ataques en verde y dotando a la gestión forestal de una herramienta práctica para tomar medidas preventivas en zonas especialmente sensibles a este tipo de complicaciones.

Por último, indicar que los resultados presentados en este estudio son preliminares, actualmente se

está llevando a cabo la obtención de un modelo, identificando índices de vegetación más influyentes en detectar este decaimiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido durante las campañas de campo de Jacobo Peñalver del laboratorio de Sanidad Forestal de la Comunitat Valencia, así como de Lucía Yáñez de Agresta S. Coop.

Referencias

- Abdullah, H., Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., Groen, T.A. Heurich, M. 2018. European spruce bark beetle (*Ipstypographus*, L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.009>
- Beck, P.S.A., Zarco-Tejada, P.J., Strobl, P., San Miguel, J. 2015. *The feasibility of detecting trees affected by the Pine Wood Nematode using remote sensing*, Report EUR 27290 EN. Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability, European Commission, Scientific and Technical Research series – ISSN 1831-9424.
- Berger, C., Laurent, F. 2019. Trunk injection of plant protection products to protect trees from pests and diseases. *Crop Protection*, 124, 104831. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.05.025>
- Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine Learning*, 5, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Calderón, R., Navas-Cortés, J.A., Lucena, C., Zarco-Tejada, P.J. 2013. High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of *Verticillium* wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, 139, 231-245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.031>
- Calderón, R., Navas-Cortés, J.A., Zarco-Tejada, P.J. 2015. Early Detection and Quantification of *Verticillium* Wilt in Olive Using Hyperspectral and Thermal Imagery over Large Areas, *Remote Sensing*, 7, 5584-5610. <https://doi.org/10.3390/rs70505584>
- Carter, G.A., Knapp, A.K. 2001. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany*, 88, 677-684. <https://doi.org/10.2307/2657068>

- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., Moreno, J. 2011. Evaluation of Sentinel-2 red edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors*, 11(7), 7063-7081. <https://doi.org/10.3390/s110707063>
- Dimitri, L., Gebauer, U., Lösekrug, R., Vaupel, O. 1992. Influence of mass trapping on the population dynamic and damage-effect of bark beetles 1, 2. *Journal of Applied Entomology*, 114(1-5), 103-109. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1992.tb01102.x>
- Domec, J.C., Pruyn, M.L. 2008. Bole girdling affects metabolic properties and root, trunk and branch hydraulics of young ponderosa pine trees. *Tree Physiology*, 28(10), 1493-1504. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.10.1493>
- Ferretti, M. 1997. Forest health assessment and monitoring. Issues for consideration. *Environmental Monitoring and Assessment*, 48, 45-72. <https://doi.org/10.1023/A:1005748702893>
- Gamon, J.A., Peñuelas, J., Field, C.B. 1992. A narrow-wave band spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41, 35-44. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90059-S](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S)
- Genuer, R., Poggi, J.M., Tuleau-Malot, C. 2010. Variable Selection using Random Forests. *Pattern Recognition Letters*, 31(14), 2225-2236. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2010.03.014>
- Genuer, R., Poggi, J.M., Tuleau-Malot, C. 2015. VSURF: An R package for variable selection using Random Forests, *The R Journal*, 7(2), 19-33. <https://doi.org/10.32614/RJ-2015-018>
- Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N. 1996. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 148, 494-500. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80284-7](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80284-7)
- Granke, O., Mues, V. 2010. Sulfur and nitrogen deposition and its trends. In Fischer, R., Lorenz, M., Granke, O. et al. (eds.). *The Condition of Forests in Europe*, Technical Report of ICP Forests. Work Report of the Institute for World Forestry 2010/1. ICP Forests, Hamburg, 2010 pp. 45-53.
- Hernández-Clemente, R., Hornero, A., Mottus, M., Peñuelas, J., González-Dugo, V., Jiménez, J.C., Suárez, L., Alonso, L., Zarco-Tejada, P. 2019. Early diagnosis of vegetation health from high-resolution hyperspectral and thermal imagery: Lessons learned from empirical relationships and radiative transfer modelling. *Remote Sensing*, 5, 169-183. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00096-1>
- Hilker, T., Coops, N.C., Hall, F.G., Black, T.A., Wulder, M.A., Nestic, Z., Krishnan, P. 2008. Separating physiologically and directionally induced changes in PRI using BRDF models. *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 2777-2788. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.011>
- Hódar, J.A., Zamora, R., Cayuela, L. 2012. Cambio climático y plagas: algo más que el clima. *Ecosistemas*, 21(3), 73-38. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.09>
- Johnsen, K., Maier, C., Sanchez, F., Anderson, P., Butnor, J., Waring, R., Linder, S. 2007. Physiological girdling of pine trees via phloem chilling: proof of concept. *Plant, Cell & Environment*, 30(1), 128-134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01610.x>
- López, R., Brossa, R., Gil, L., Pita, P. 2015. Stem girdling evidences a trade-off between cambial activity and sprouting and dramatically reduces plant transpiration due to feedback inhibition of photosynthesis and hormone signaling. *Frontiers in plant science*, 6, 285. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00285>
- Liu, J., Chen, H., Wang, J., Chen, X., Yang, Z., Liang, J. 2019. Photosynthetic traits and antioxidative defense responses of *Pinus yunnanensis* after joint attack by bark beetles *Tomicus yunnanensis* and *T. minor*. *Journal of Forestry Research*, 30(6), 2031-2038. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0844-x>
- Michel, A., Seidling, W. 2016. *Forest Condition in Europe 2016 Technical Report of ICP Forests*. Report under the UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP).
- PATFOR, Generalitat Valenciana. 2013. Plan de Acción Territorial Forestal de la Comunitat Valenciana (PATFOR). 582 pp. Web consultada el 04 de febrero de 2020.
- Poblete, T., Camino, C., Beck, P.S.A., Hornero, A., Kattenborn, T., Saponari, M., Boscia, D., Navas-Cortes, J.A., Zarco-Tejada, P.J. 2020. Detection of *Xylella fastidiosa* infection symptoms with airborne multispectral and thermal imagery: assessing handset reduction performance from hyperspectral analysis, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 162, 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.isprs.2020.02.010>
- Resco de Dios, V., Fischer, C., Colinas, C. 2007. Climate Change Effects on Mediterranean Forests and Preventive Measures, *New Forests*, 33, 29-40. <https://doi.org/10.1007/s11056-006-9011-x>
- Rondeaux, G., Steven, M., Baret, F. 1996. Optimization of Soil Adjusted Vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95-107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)

- SSF – DGDRyPF. 2012. *Red de Seguimiento a Gran Escala de Daños en los Montes (Red de Nivel II) Manual de campo*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Stone, E.L. 1974. The communal root system of red pine: growth of girdled trees. *Forest Science*, 20(4), 294-305.
- Stone, C., Mohammed, C. 2017. Application of remote sensing technologies for assessing planted forests damaged by insect pests and fungal pathogens: a review. *Current Forestry Reports*, 3(2), 75-92. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0056-1>
- Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G., Pérez-Priego, O., Miller, J.R., Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J. 2008. Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 560-575. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.009>
- Trenberth, K.E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R., Sheffield, J., 2014. Global warming and changes in drought. *Nat. Clim. Chang.*, 4, 17-22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Vega, F.E., Hofstetter, R.W. Eds. 2014. *Bark beetles: biology and ecology of native and invasive species*. Academic Press.
- Vogelmann, T.C. 1993. Plant Tissue Optics. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant. Mol. Biol.* 44, 231-251. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.44.060193.001311>
- Zarco-Tejada, P.J., Miller, J.R. 1999. Land Cover Mapping at BOREAS using red edge spectral parameters from CASI imagery, *Journal of Geophysical Research*, 104(22), 27921-27933. <https://doi.org/10.1029/1999JD900161>
- Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, M.V., Fereres, E. 2016. Seasonal stability of chlorophyll fluorescence quantified from airborne hyperspectral imagery as an indicator of net photosynthesis in the context of precision agriculture. *Remote Sens. Environ.* 179, 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.024>

