

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/324747699>

Detección de enfermedades de cultivos mediante imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución espacial

Article · April 2018

CITATIONS

0

READS

278

5 authors, including:



Rocio Calderón Madrid
University of Salford

13 PUBLICATIONS 210 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Pablo J. Zarco-Tejada
European Commission

219 PUBLICATIONS 11,059 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Juan A. Navas Cortés
Spanish National Research Council

127 PUBLICATIONS 2,118 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Improved Evapotranspiration using Unmanned Aerial Vehicles [View project](#)



PESTOLIVE: an historical and ecological approach for understanding and managing soil-borne parasite communities on olive in the Mediterranean basin. [View project](#)

Las perspectivas de progreso y utilidad de la teledetección en agricultura se estiman potenciales a corto plazo

40 Detección de enfermedades de cultivos mediante imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución espacial

Rocío Calderón Madrid,

Doctor Ingeniero Agrónomo, Investigadora Postdoctoral del Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)

Pablo J. Zarco Tejada,

Doctor Ingeniero Agrónomo, Investigador del Joint Research Centre (JRC) – Comisión Europea

Juan A. Navas Cortés,

Doctor en Ciencias Biológicas, Investigador Científico del Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)

Blanca B. Landa Del Castillo,

Doctor Ingeniero Agrónomo, Investigadora Científica del Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)

Manuel López López,

Ingeniero Agrónomo, Doctorando del Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)

La creciente preocupación por la necesidad de aumentar los rendimientos de los cultivos, reducir el impacto ambiental de los productos fitosanitarios e impedir la introducción y propagación de enfermedades cuarentenarias, ha suscitado un gran interés por desarrollar herramientas legislativas, científicas y técnicas para la detección temprana de enfermedades. En el ámbito científico, el Instituto de Agricultura Sostenible perteneciente al CSIC ha liderado los recientes avances en técnicas de teledetección basadas en una línea de investigación enfocada al desarrollo de métodos aplicados a imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución para la detección temprana de enfermedades, obteniendo resultados relevantes en la Verticilosis y Xylella fastidiosa en olivar, el Mildiu de la adormidera y la Mancha ocre del almendro.

Introducción

La agricultura actual se debate entre la necesidad de aumentar la producción agrícola y la creciente preocupación medioambiental. La forma más sostenible de alcanzar estos retos es aumentando los rendimientos de cultivo mediante un uso sostenible de inputs que, en el ámbito de la producción de cultivos, se consigue reduciendo las pérdidas causadas por enfermedades, malas hierbas y plagas, las cuales suponen entre el 20 y 40% de la productividad agrícola global (Oerke, 2016). Además, la aparición de nuevas plagas y enfermedades fruto de la intensificación de los intercambios comerciales de los últimos años, ha originado una alarma económica, social y medioambiental sin precedentes. En el contexto particular de las enfermedades, su detección temprana en el campo se considera una fuente valiosa de información para ejecutar estrategias adecuadas de manejo y control de enfermedades que permitan prevenir el desarrollo y propagación de los patógenos (Mahlein et al., 2012). Sin embargo, los métodos convencionales para la detección de enfermedades se fundamentan en la inspección visual de síntomas y daños en campo, siendo costosa en tiempo y recursos. Una alternativa a estos métodos es la teledetección, la cual ha demostrado ser una herramienta muy útil para detectar síntomas en estados tempranos del desarrollo de enfermedades a escala de cubierta.



El cultivo y la teledetección

La teledetección tradicional, impulsada en la década de 1980, consistía en la incorporación de sensores a bordo de aviones tripulados de gran envergadura y en satélites de observación terrestre para el seguimiento de los cultivos a escalas globales. No obstante, su utilidad era limitada como herramienta de apoyo en la toma de decisiones relacionada con el riego, la aplicación de fertilizantes o la detección de enfermedades, debido a la baja resolución espacial, espectral y temporal obtenida. En los últimos 10 años, la teledetección ha experimentado una importante revolución consistente en la miniaturización y reducción del coste de los sensores, permitiendo su utilización a bordo de vehículos aéreos tripulados y no tripulados a un menor coste y complejidad operativa, obteniendo imágenes de alta resolución espacial con tamaños de pixel inferiores a 1 m.

La agricultura de precisión aplicada a la protección de cultivos tiene aún mayor utilidad en el monitoreo de grandes superficies. En estos casos, las metodologías tradicionales basadas en teledetección presentan limitaciones ya que se centran en bandas espectrales anchas en las regiones espectrales del rojo e infrarrojo cercano, utilizadas para calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice ha demostrado ser sensible a los

cambios estructurales y de la densidad foliar de la vegetación, y por lo tanto, sólo es útil para detectar estados avanzados de enfermedades, es decir, cuando aparecen síntomas como la defoliación de la copa, marchitez de las hojas y clorosis foliar avanzadas (Calderón et al., 2013). La alternativa a estas metodologías tradicionales consiste en utilizar sensores hiperespectrales y térmicos con una resolución espacial suficiente para distinguir copas de árboles o plantas individuales. Sin embargo, los sensores actuales a bordo de satélites carecen de esta resolución espacial y, es por ello, que los esfuerzos destinados a la detección temprana de enfermedades a gran escala necesitan el uso de vehículos aéreos tripulados. La principal desventaja para acometer este tipo de trabajos con vehículos aéreos no tripulados es que existen limitaciones legales cuando el objetivo es adquirir imágenes de grandes zonas o en un periodo de tiempo corto que evite excesivas diferencias ambientales. Por otro lado, los nuevos sensores hiperespectrales de alta resolución espectral, con anchos de banda inferiores al nanómetro, permiten obtener información de más de 250 bandas espectrales en la región visible e infrarrojo, aumentando potencialmente las aplicaciones de la teledetección en agricultura. En concreto, estos sensores permiten cuantificar la emisión de fluorescencia clorofílica debido a su precisión para detectar la pequeña contribución de la fluorescencia emitida por la planta a partir de la radiación que le

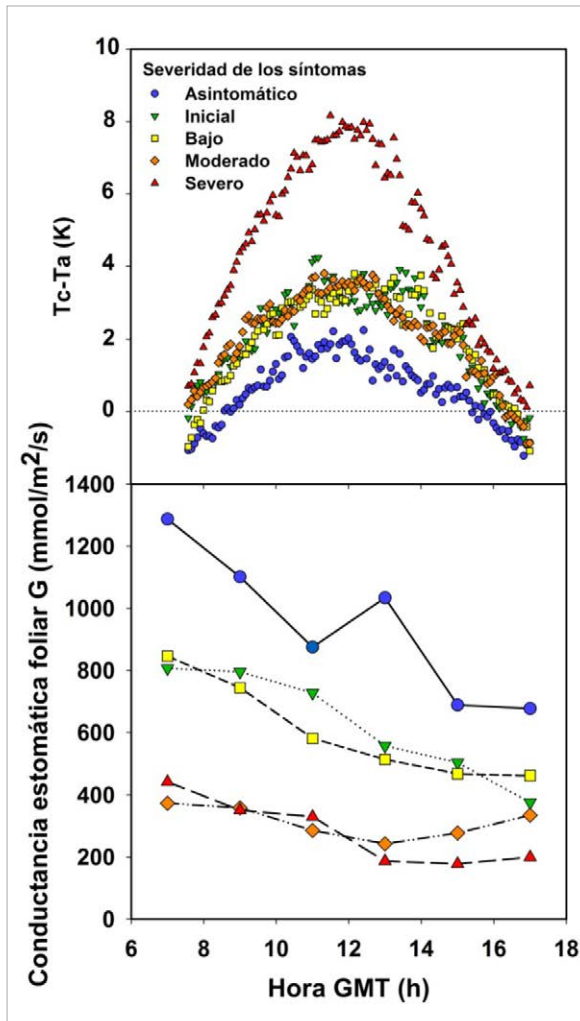


Figura 1. Evolución diaria de la temperatura de copa normalizada con la del aire (Tc-Ta) y la conductancia estomática foliar (G) en olivos con diferentes niveles de severidad de los síntomas causados por la infección por *Verticillium dahliae* (Fuente: Calderón et al., 2013).

llega (2-3% de la radiación). El interés de la fluorescencia clorofílica radica en su estrecha relación con la fotosíntesis, demostrándose que las plantas con estrés hídrico disipan una fracción del exceso de la radiación interceptada como calor, mientras que la otra fracción es re-emitida como luz fluorescente, pudiendo cuantificarla mediante técnicas que permiten medir en el interior de las bandas de absorción del oxígeno atmosférico (Zarco-Tejada et al., 2012).

En el año 2009, el Laboratorio de Métodos Cuantitativos de Teledetección (Quantalab) del Departamento de Agronomía, y el Departamento de Protección de Cultivos del Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC) comenzaron una novedosa línea de investigación para la detección de enfermedades mediante teledetección. Hasta el momento se han desarrollado metodologías basadas en imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución espacial para la detección temprana de enfermedades, como la Verticilosis en olivar, el Mildiu de la adormidera y la mancha ocre del almendro, además de los trabajos que se están llevando a cabo en la actualidad para la detección temprana de *Xylella fastidiosa*.

La Verticilosis del olivo es una enfermedad causada por el hongo de suelo *Verticillium dahliae* y que en las últimas décadas ha ocasionado severas pérdidas de rendimiento en el olivar, convirtiéndose en la enfermedad más limitante causada por patógenos de suelo de este cultivo a nivel mundial (Jiménez-Díaz et al., 2012). Este patógeno coloniza el sistema vascular de la planta, ocasionando un aumento de la resistencia al flujo del agua a través del xilema. De este modo, se produce una reducción de la tasa de transpiración que causa un síndrome de marchitez en la planta. A día de hoy, no existe medida de control aplicada individualmente que sea completamente efectiva para el tratamiento de la Verticilosis del olivo, no obstante, una estrategia de control integrado es la mejor forma de manejar la enfermedad, combinando el uso de medidas de control previas y posteriores a la plantación (Jiménez-Díaz et al., 2012). Las medidas de control posteriores a la plantación son más efectivas si las zonas del terreno con árboles afectados por Verticilosis fueran identificadas en etapas tempranas del desarrollo de la enfermedad

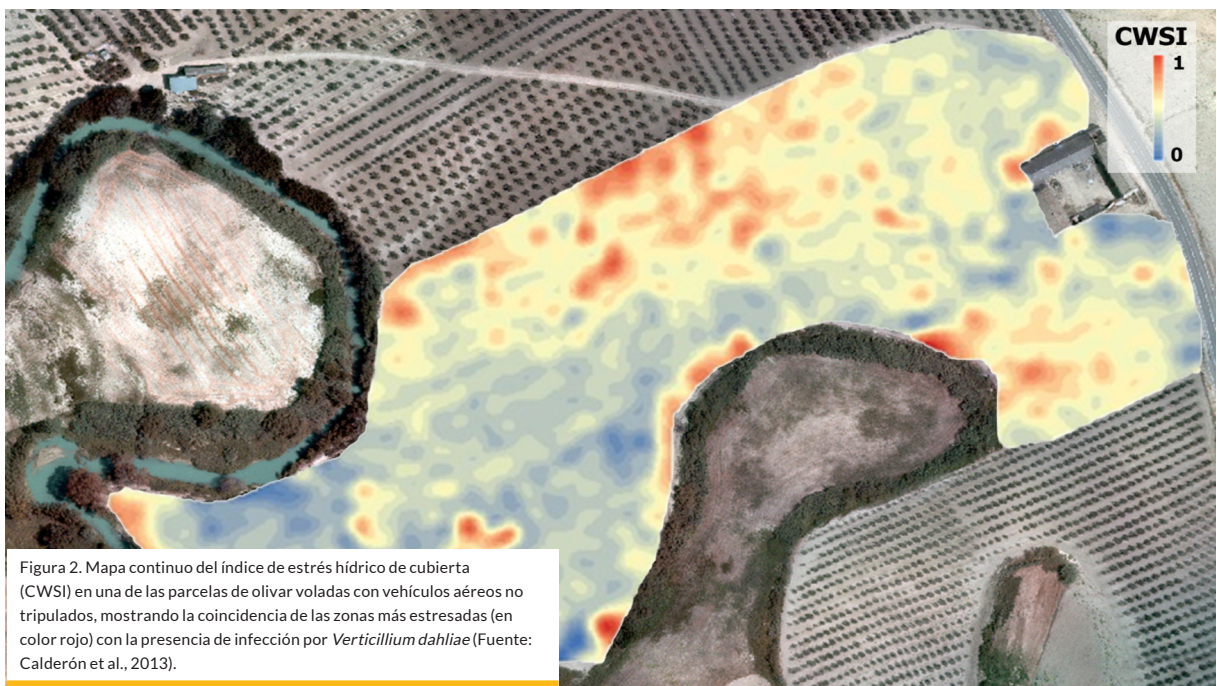


Figura 2. Mapa continuo del índice de estrés hídrico de cubierta (CWSI) en una de las parcelas de olivar voladas con vehículos aéreos no tripulados, mostrando la coincidencia de las zonas más estresadas (en color rojo) con la presencia de infección por *Verticillium dahliae* (Fuente: Calderón et al., 2013).

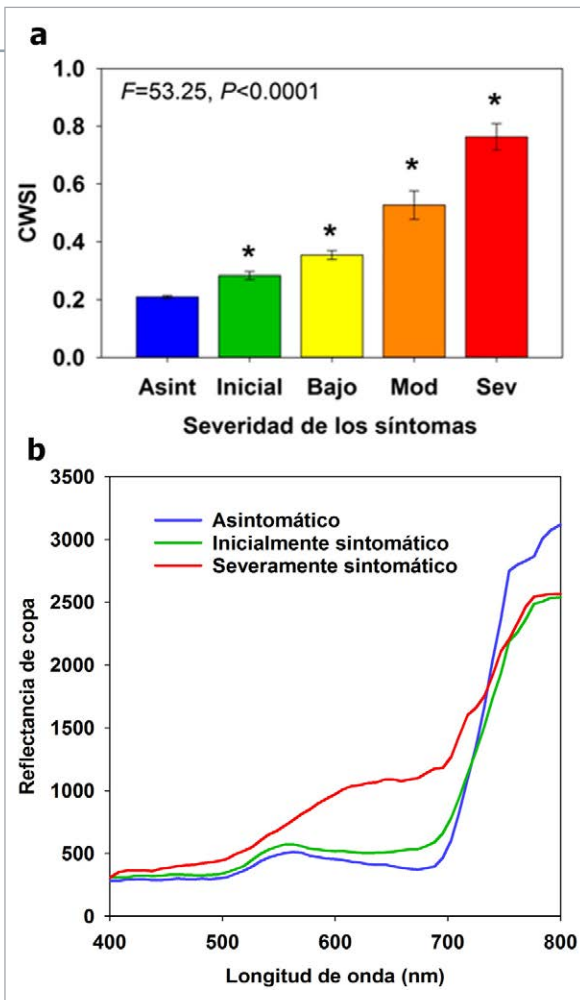


Figura 3. (a) Valores medios del Índice de estrés hídrico de cubierta (CWSI) calculado a partir de las imágenes térmicas para cada nivel de severidad de la Verticilosis, mostrando los resultados del análisis de varianza y la presencia de diferencias significativas de los niveles sintomáticos con respecto a las plantas asintomáticas de acuerdo con el test de Dunnet con asteriscos (Fuente: Calderón et al., 2013). (b) Reflectancia obtenida de la imagen hiperespectral para árboles asintomáticos, inicial y severamente afectados por la Verticilosis (Fuente: Calderón et al., 2015).

con el objetivo de disminuir la dispersión del patógeno a árboles y/o plantaciones vecinas.

Para evaluar la detección temprana de la Verticilosis mediante el uso de imágenes hiperespectrales y térmicas, se realizó un estudio a diferentes escalas, desde nivel foliar hasta nivel de cubierta a escala local y regional. A nivel foliar, se demostró que los cambios fisiológicos derivados de la infección y colonización por *V. dahliae* pueden ser detectados mediante cambios de reflectancia en la región visible del espectro electromagnético (380-750 nm), resultado de la degradación de pigmentos fotosintéticos (Calderón et al., 2013). A nivel de copa, ya en los años 80 se demostró que tasas de transpiración bajas causadas por estrés hídrico podían ser detectadas tempranamente a través de la radiación térmica infrarroja debido a un aumento de la temperatura de cubierta. Por lo tanto, en el caso de olivos afectados por la Verticilosis, la reducción en la tasa de transpiración causada por la colonización del sistema vascular de la planta por *V. dahliae* podría también ser detectada en la región térmica del espectro (8000-15000 nm). De este modo, se monitorizó la variación diurna de la temperatura de copa y la conductancia estomática foliar en árboles con diferentes niveles de severidad de enfermedad, observándose que la temperatura aumentó a mediodía a medida que incrementaba el nivel de severidad, mientras que la conductancia estomática disminuyó (Calderón et al., 2013). Además, a partir de los valores de temperatura de copa, se pudieron discriminar árboles asintomáticos de árboles sintomáticos, incluso en la clase de severidad inicial y baja (Figura 1).

Una vez demostrado que los cambios en las regiones visible e infrarroja del espectro son debidos a los cambios fisiológicos inducidos por la Verticilosis, se realizaron vuelos con sensores térmico e hiperespectral a bordo de un vehículo aéreo no tripulado sobre dos parcelas naturalmente infectadas por *V. dahliae*, tres años segui-

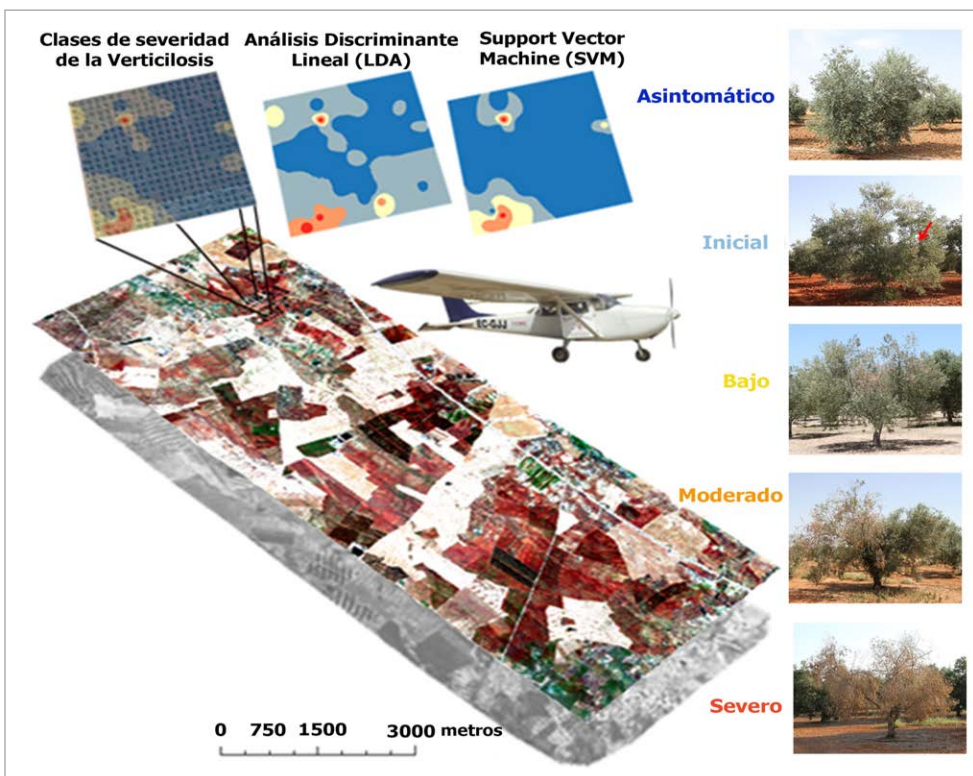


Figura 4. Imágenes térmica e hiperespectral adquiridas por sensores térmico e hiperespectral a bordo de una plataforma tripulada sobre una superficie de olivar de 3.000 has. Se muestra la distribución espacial de las clases de severidad de la Verticilosis evaluadas a nivel de campo y de las clases de severidad predichas por los métodos análisis lineal discriminante y support vector machine en una de las parcelas del área volada (Fuente: Calderón et al., 2015).

dos y dos veces al año, en primavera y en verano (Calderón et al., 2013). Al mismo tiempo que se realizaron los vuelos, se evaluó la incidencia y severidad de la Verticilosis por observación visual del porcentaje de follaje con presencia de síntomas, estableciéndose cinco niveles de severidad de síntomas: asintomático, inicial, bajo, moderado y severo. Respecto a las imágenes térmicas, la temperatura de cubierta normalizada con la del aire (Tc-Ta) aumentó significativamente a medida que la severidad se incrementaba, permitiendo la discriminación entre árboles asintomáticos y árboles en estados tempranos del desarrollo de la enfermedad.

Además de la temperatura de cubierta, también se calculó el índice de estrés hídrico de cubierta (CWSI) a partir de las imágenes térmicas, el cual es un indicador normalizado de tasas de transpiración bajas derivadas del estrés hídrico (Figura 2). Este indicador aumentó con el nivel de severidad, presentando valores significativamente menores en los árboles asintomáticos (Figura 3a). Referente a la imagen hiperespectral, se calcularon varios índices espectrales en relación a: la estructura de la copa (índices espectrales basados en las bandas del infrarrojo cercano), el estado de epoxidación del ciclo de las xantofilas (índices fotoquímicos PRIs), estimación del contenido en clorofila y carotenos, ratios visibles en el azul, rojo y verde, y la emisión de fluorescencia clorofílica (Figura 3b). Tras analizar estadísticamente la sensibilidad de cada índice para discriminar entre árboles asintomáticos y sintomáticos, los ratios basados en el azul y la fluorescencia clorofílica se identificaron como los mejores indicadores para detectar la Verticilosis en etapas tempranas del desarrollo de la enfermedad, mientras que los índices estructurales, PRIs, y los índices de clorofilas y carotenos fueron buenos indicadores para detectar la presencia de daño moderado a severo causado por la Verticilosis.

Después de evaluar el potencial de las imágenes térmicas e hiperespectrales de alta resolución para detectar tempranamente la Verticilosis a escala de parcela, se validaron estos resultados mediante vuelos sobre mayores áreas compuestas por varias parcelas de olivar que difieren en características agronómicas (diferencias en cultivares y edades de olivo, densidades de plantación, manejos de suelo, y presencia de estrés hídrico y de otros estreses bióticos). Para ello se volaron los mismos sensores a bordo de un avión tripulado sobre 3000 hectáreas de olivar, obteniendo imágenes hiperespectrales y térmicas a una resolución espacial de 50 y 62 cm, respectivamente (Figura 4). El objetivo de este estudio

a nivel regional fue desarrollar modelos predictivos basados en métodos de clasificación multivariantes para detectar la infección y severidad por *V. dahliae* (Calderón et al., 2015). Para analizar y validar estos modelos fue necesario evaluar la incidencia y severidad de la Verticilosis en 9 parcelas del área volada. Los métodos de clasificación estudiados fueron: i) el análisis discriminante lineal (LDA), que permite encontrar una función lineal que separe los olivos muestreados en las diferentes clases de severidad a partir de los índices espectrales calculados de las imágenes, y ii) el método no lineal Support Vector Machine (SVM), que se fundamenta en la teoría de aprendizaje estadístico. SVM obtuvo una mayor precisión en la detección de la Verticilosis, en torno al 80%, mostrando mayor efectividad en la clasificación de los árboles asintomáticos, sin embargo, LDA reveló mayor capacidad para discriminar plantas con síntomas incipientes de la enfermedad de plantas asintomáticas. Dada esta dualidad, se aconseja el uso combinado de ambos métodos de predicción a la hora de tomar decisiones sobre el manejo de la Verticilosis (Figura 4). El papel jugado por los índices espectrales y la temperatura en estos modelos multivariantes fue diferente ya que la habilidad para discriminar árboles en estados iniciales del desarrollo de la enfermedad fue gracias a la temperatura de cubierta y la fluorescencia clorofílica, tal y como había ocurrido a escala de parcela, demostrando así no estar influenciados por la variación de las características agronómicas en el área de estudio. No obstante, los índices estructurales, de xantofilas, clorofilas, carotenos y los ratios azul/verde/rojo calculados a partir de imágenes hiperespectrales sólo fueron eficaces para discriminar árboles en estados avanzados del desarrollo de la enfermedad.

Este estudio sentó precedentes para evaluar el uso de la teledetección en la identificación de la infección por *Xylella fastidiosa* (*Xf*) en etapas tempranas, una de las bacterias más peligrosas del mundo que fue detectada por primera vez en la UE en 2013 en la región de Apulia, al sur de Italia, afectando al olivo. Esta bacteria crece circunscrita en el xilema, obstruyendo el flujo de agua y nutrientes a través de él y causando un decaimiento súbito del olivo, caracterizado por la presencia de quemazón de las hojas y desecamiento de brotes y pequeñas ramas (Figura 5). *Xf* representa una amenaza global por su capacidad de infectar a más de 350 plantas, entre las que se encuentran el olivo, naranjo, vid y almendro, principales cultivos de los países mediterráneos. A pesar de las medidas tomadas por la UE para evitar la introducción y la propagación de la bacteria en su territorio, los efectos devastadores causados en Italia y la presencia declarada en Francia y España hicieron que el brote de *Xf* en la UE fuera objeto de atención significativa por la comunidad científica internacional, destacando que la erradicación de *Xf* requiere un diagnóstico precoz y un amplio control (Almeida, 2016). Por estas razones, el desarrollo de metodologías a gran escala y de rápida respuesta basadas en teledetección de alta resolución espacial se considera una alternativa factible para la detección precoz de la enfermedad. En este contexto, el IAS-CSIC y el Joint Research Centre de la Comisión Europea (JRC) lideran los esfuerzos encaminados a la detección temprana de síntomas causados por *Xf* mediante teledetección bajo el marco de los proyectos Horizonte 2020 XF-ACTORS y POnTE.

En uno de los objetivos de estos proyectos, se volaron 1200 hectáreas de olivar con cámaras hiperespectral y térmica a bordo de un avión tripulado dentro de la zona infectada por *Xf* en el sur de Italia en 2016 y 2017. Además, se llevaron a cabo múltiples inspecciones anuales a nivel de campo para evaluar síntomas causados por *Xf*



Figura 5. Síntomas de *Xylella fastidiosa* en olivos severamente afectados (Fuente: Juan A. Navas Cortés).

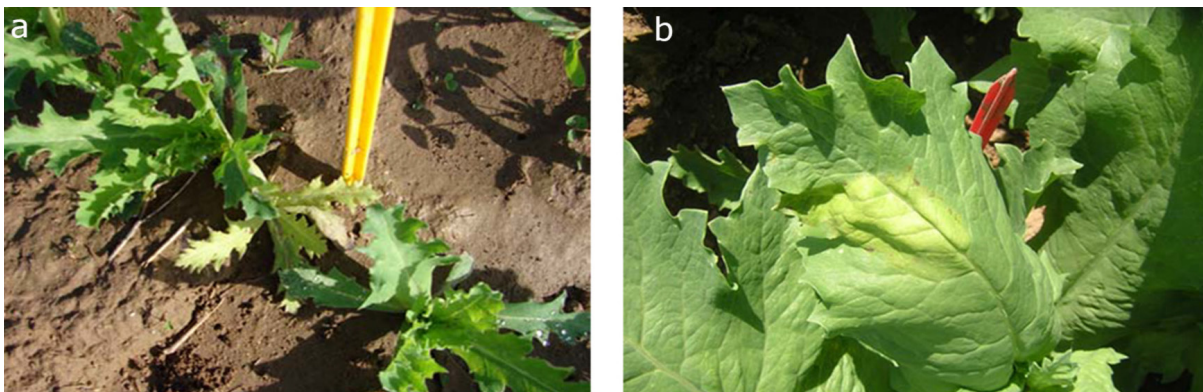


Figura 6. Síntomas causados por mildiu en adormidera, mostrando la reducción en el crecimiento de la planta (a) y la clorosis foliar (b) (Fuente: Juan A. Navas Cortés).

en más de 7.000 árboles. Posteriormente, se evaluaron modelos predictivos basados en aprendizaje automático y algoritmos lineales, obteniendo precisiones en la detección de la enfermedad por encima del 80% cuando se combinaron la fluorescencia clorofílica, la temperatura de cubierta e índices sensibles a la degradación de pigmentos (resultados en progreso de publicación). Además, se ha detectado que árboles calificados como asintomáticos en la inspección visual de síntomas a pie de campo y asignados como asintomáticos mediante teledetección, desarrollaron síntomas cuatro meses después a una tasa muy superior a la de los árboles asintomáticos clasificados como no afectados por *Xf*. Por lo tanto, se ha demostrado que los cambios en las características funcionales de la planta detectados a partir de las imágenes hiperespectrales y térmicas revelan que la infección por *Xf* en olivar puede ser identificada incluso antes de la expresión visual de síntomas, requisito esencial para ayudar al control eficiente de esta enfermedad.

Además de probar la eficacia del uso de la teledetección en la detección temprana de enfermedades vasculares, se han desarrollado metodologías para su aplicación en enfermedades foliares como el Mildiu en adormidera y la Mancha ocre del almendro. La presencia de enfermedades fúngicas foliares es usual en la rutina de los agricultores, presentándose en multitud de cultivos como el Mildiu de la vid y el Repilo del olivo, entre otros, por lo que su control mediante productos químicos preventivos es una práctica habitual en cada campaña.

La adormidera es un cultivo estratégico para la industria farmacéutica porque es la única fuente de morfina, codeína y tebaína. España es el segundo productor mundial de adormidera y, durante los últimos años, los rendimientos de este cultivo han venido disminuyendo como consecuencia de ataques de Mildiu, una enfermedad causada por el oomiceto biotrofo obligado *Peronospora somniferi* (anteriormente denominada *P. arborescens*) (Landa et al., 2005). Esta enfermedad provoca manchas foliares y una reducción en el crecimiento de la planta que se traducen, respectivamente, en una degradación de pigmentos fotosintéticos y en una reducción del área foliar (Figura 6). Desde el año 2002 hasta la actualidad, la incidencia y severidad en los ataques de Mildiu se han incrementado de manera notable, a medida que el cultivo se ha extendido desde el sur de España, con temperaturas altas y escasa precipitación, a nuevas zonas con temperaturas más frescas y húmedas o se ha incorporado al regadío a fin de mejorar el rendimiento de las cosechas. Este hecho supone una grave amenaza para la estabilidad y continuidad de este cultivo en España, ya que no existen tratamientos químicos curativos autorizados y/o efectivos para su control. Por lo tanto, el control de esta enfermedad se basa en una estrategia de control integrado que combina medidas culturales y tratamientos con fungicidas preventivos antes de iniciarse las

primeras infecciones o tras localizar síntomas tempranos. De este modo, la detección temprana de la infección por este patógeno permitiría evitar la propagación de la enfermedad al resto de plantas de la parcela, así como una reducción en el uso de productos fitosanitarios. Para ello, se volaron dos parcelas artificialmente infectadas por *P. somniferi* con cámaras multiespectral y térmica

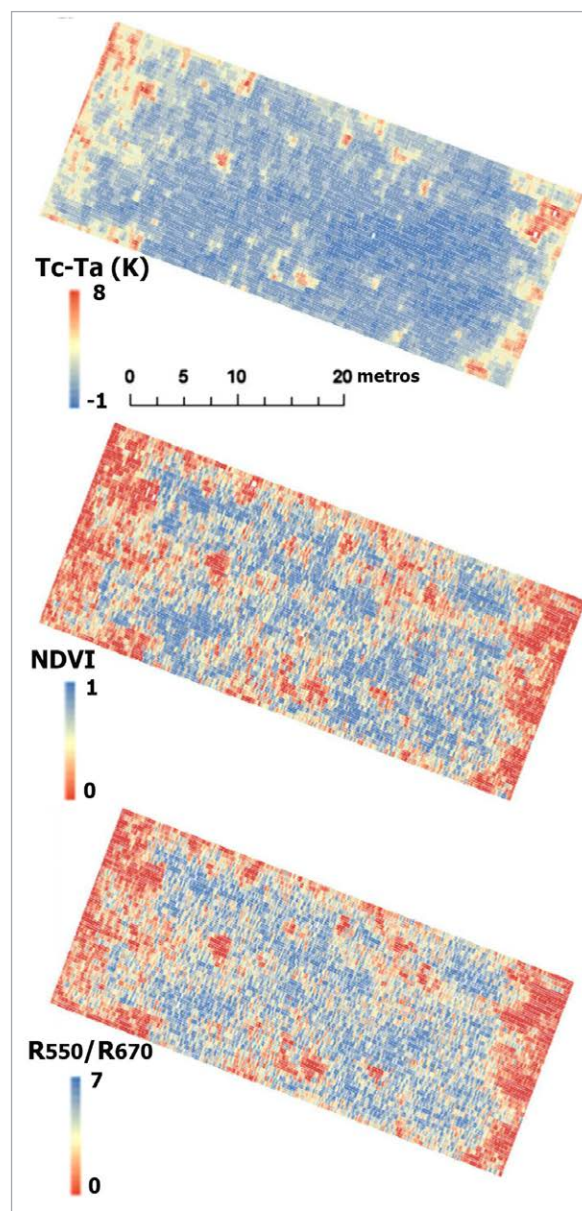


Figura 7. Distribución espacial de la temperatura de cubierta (Tc-Ta), NDVI y el ratio verde-rojo (R550/R670) en una de las parcelas de adormidera artificialmente infectadas por *Peronospora somniferi* (Fuente: Calderón et al., 2014).



Figura 8. Síntomas causados por la Mancha ocre en almendro, mostrando un árbol severamente afectado (a) y hojas con las características manchas ocreas (b). (Fuente: Manuel López López).

a bordo de un vehículo aéreo no tripulado en varias fechas de primavera, coincidiendo con la época de expresión de síntomas (Calderón et al., 2014).

El objetivo fue evaluar la detección temprana de Mildiu mediante índices espectrales calculados a partir de las imágenes multiespectrales, en concreto, un ratio basado en las bandas del verde y el rojo del espectro visible (R550/R670) y el NDVI dada su relación con la degradación de pigmentos fotosintéticos y el área foliar, respectivamente. Además, también se analizó la temperatura de cubierta extraída de las imágenes térmicas como indicador de tasas de transpiración reducidas debidas al estrés. El índice verde-rojo y la temperatura mostraron diferencias significativas entre plantas asintomáticas y sintomáticas para valores del NDVI elevados (plantas con mayor área foliar), mientras que a valores bajos de NDVI no se encontraron diferencias debido a que las plantas estaban severamente afectadas por el patógeno y, en consecuencia, estos indicadores estaban afectados por los efectos del suelo (Figura 7). Por lo tanto, la temperatura de cubierta y el índice verde-rojo permitieron la identificación de plantas infectadas por Mildiu para niveles elevados de NDVI, cuando la planta se encuentra en las primeras etapas del desarrollo de la enfermedad al no verse afectada todavía su estructura.

La Mancha ocre del almendro causada por el hongo *Polystigma ochraceum* es la enfermedad foliar con mayor importancia económica en el cultivo del almendro en la Cuenca Mediterránea. En España, el cultivo de almendro está en auge debido a la reciente intensificación de su producción, que conduce a condiciones más favorables para el desarrollo de la Mancha ocre al incorporar nuevas variedades susceptibles, el riego, la mayor densidad de plantación y la ocupación de nuevas zonas con clima favorable. Los síntomas aparecen en primavera con manchas cloróticas foliares que evolucionan a colores anaranjados que cubren toda la superficie de la hoja al final del verano (Figura 8). Además, dependiendo de la severidad de la enfermedad, se puede producir una defoliación prematura que resulte en una mayor reducción de la capacidad fotosintética y, por tanto, una reducción en la producción en la siguiente campaña. Las medidas de control de la mancha ocre se fundamentan en una estrategia de control integrado a través de medidas culturales, el manejo de la resistencia de las variedades y el control químico (Gort, 2014). El control químico se lleva a cabo con tratamientos preventivos a base de fungicidas antes de iniciarse las primeras infecciones o tras localizar síntomas tempranos. Por lo tanto, la detección temprana es de vital importancia para realizar un uso racionalizado de fungicidas que eviten la propagación del patógeno al resto de la plantación. En este contexto, los efectos de la enfermedad asociados con la degradación de pigmentos y los cambios estructurales fueron los utilizados para su detección

temprana a través de imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución espacial (30 y 40 cm, respectivamente) (López-López et al., 2016). Los índices espectrales relacionados con el contenido de clorofilas y carotenos así como con la emisión de fluorescencia clorofílica se identificaron como los mejores indicadores tempranos de la enfermedad, mientras que la temperatura de cubierta e índices estructurales demostraron ser buenos indicadores para detectar la presencia de estados avanzados. La combinación de los indicadores tempranos de la Mancha ocre se utilizó para desarrollar modelos predictivos, obteniendo precisiones en la detección de la enfermedad por encima del 80% (López-López et al., 2016).•



Conclusión

A pesar del corto periodo de vida que la investigación agrícola tiene en el campo de la teledetección avanzada basada en sensores hiperespectrales y térmicos, las aplicaciones derivadas de ella han demostrado ser de gran relevancia para la detección de deficiencias hídricas y nutricionales, así como para la detección precoz de enfermedades. Además, las perspectivas de progreso y utilidad de la teledetección en agricultura se estiman potenciales a corto plazo, dado el vertiginoso ritmo de evolución de la tecnología, con sensores cada vez más precisos, más pequeños, y de menor coste. Por lo tanto, esta herramienta estará al alcance de cualquier agricultor, a partir de la cual obtendrá información espacial de los cambios espacio-temporales en su parcela en el momento adecuado, permitiendo la toma de decisiones rápidas para el correcto manejo de sus recursos.

Para consultar los datos bibliográficos del artículo, visite: www.interempresas.net/A208145