



Almendo infectado por la bacteria *Xylella fastidiosa* en Alicante (Juan A. Navas-Cortés).

DetECCIÓN TEMPRANA DE LA INFECCIÓN POR *Xylella fastidiosa* MEDIANTE EL USO COMBINADO DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES, TÉRMICAS Y MODELOS EPIDEMIOLÓGICOS

La bacteria *Xylella fastidiosa* (*Xf*) está considerada como uno de los patógenos vegetales de mayor preocupación global, ya que amenaza a los principales cultivos agrícolas de todo el mundo. Estudios previos han demostrado la capacidad de las imágenes aerotransportadas hiperespectrales y térmicas para detectar tanto en olivos como en almendros la infección por *Xf* antes de la aparición de síntomas a través de cambios sutiles en rasgos funcionales de la planta. En este trabajo, investigamos cómo los cambios espectrales revelados por diferentes conjuntos de rasgos (i.e., pigmentos, contenido estructural o de proteínas en hoja) pueden ayudar a capturar la dinámica espacial de propagación de *Xf*. Para ello acoplamos un modelo epidemiológico de dispersión espacial con la probabilidad de infección por *Xf* estimada por un modelo de máquina de vectores de soporte basado en indicadores fisiológicos. El trabajo demuestra cómo la combinación de modelos de dispersión espacial y la teledetección puede conducir a predicciones muy precisas de la distribución espacial de árboles afectados por enfermedades causadas por *Xf*.

**C. Camino¹,
R. Calderón²,
S. Parnell²,
H. Dierkes¹,
Y. Chemin¹,
M. Montes-Borrego³,
M. Román-Écija³,
B.B. Landa³,
P.J. Zarco-Tejada^{3,4},
P.S.A. Beck¹,
J.A. Navas-Cortés³**

European Commission
(EC), Joint Research
Centre (JRC), Ispra,
Italia.

School of Environment
and Life Sciences,
University of Salford,
Manchester, Reino Unido

Instituto de Agricultura
Sostenible (IAS),
Consejo Superior de
Investigaciones Científicas
(CSIC). Córdoba, España.

School of Agriculture and
Food, Faculty of Veterinary
and Agricultural Sciences
(FVAS) & Melbourne
School of Engineering
(MSE), University of
Melbourne, Melbourne,
Victoria, Australia

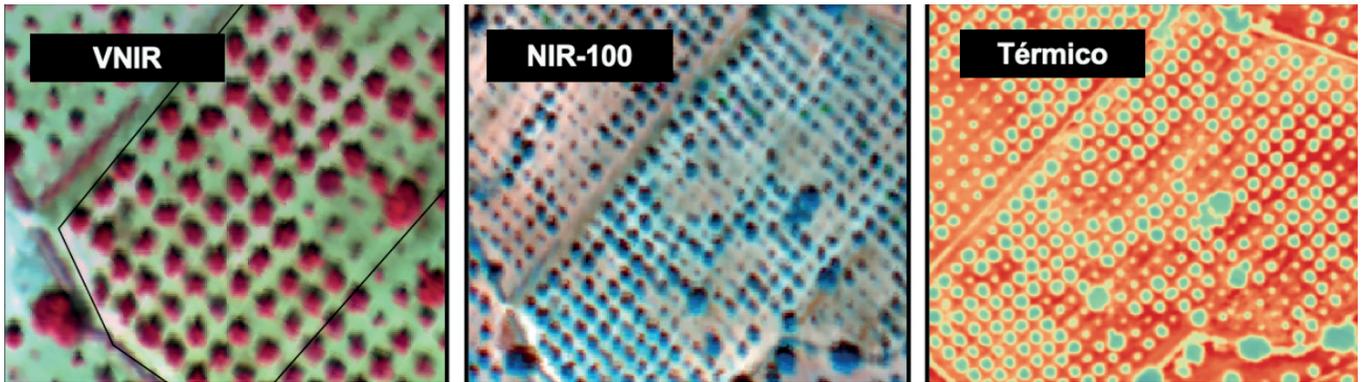


Figura 1. Mosaicos obtenidos con el sensor hiperespectral VNIR, NIR-100 y térmico en un huerto afectado por *Xylella fastidiosa*.

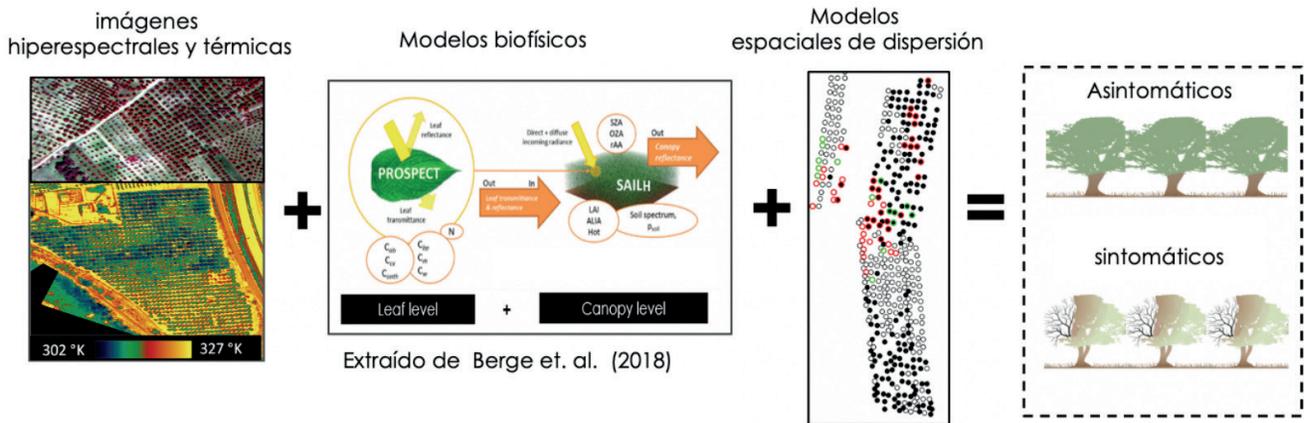


Figura 2. Marco operativo utilizado para la detección de *Xylella fastidiosa* en almendros.

El aumento del comercio y los viajes a nivel mundial en un contexto de cambio climático ha hecho que varias plagas y enfermedades de plantas se extiendan a múltiples continentes y causen importantes impactos agrícolas, ambientales y socioeconómicos (EFSA, 2019a). *Xylella fastidiosa* (*Xf*) se considera una de las bacterias fitopatógenas más peligrosas del mundo ya que puede infectar a más de 600 especies de plantas (EFSA, 2022). *Xf* está catalogada como una plaga prioritaria para la Unión Europea (UE) en base a su probabilidad de propagación, establecimiento y consecuencias devastadoras para la UE (Reglamento Delegado (UE) 2019/1702 de la Comisión). Hasta la fecha, no hay ninguna medida de control disponible para erradicar *Xf* una vez establecida en condiciones de campo (EFSA, 2019b). En este sentido, la erradicación temprana de *Xf* que requiere una detección temprana de la infección es prioritaria para lograr su control (Almeida, 2016). Por estas razones, es crucial el desarrollo de metodologías a gran

escala y de rápida respuesta para la detección precoz de la enfermedad en áreas afectadas o cercanas a éstas.

En los últimos años, el uso de modelos de transferencia radiativa y algoritmos de aprendizaje automático han ganado importancia en la cuantificación de rasgos fisiológicos y detección de plagas y enfermedades mediante el uso de la teledetección. En este sentido, Zarco-Tejada y col. (2018; 2021) demostraron que los vínculos entre los síntomas fisiológicos y la respuesta de las plantas a la infección por *Xf* pueden evaluarse a partir de sensores hiperespectrales y térmicos. En este trabajo hemos integrado la probabilidad de infección por *Xf* basado en información espectral con un modelo epidemiológico de dispersión espacial que permite capturar la dinámica espacial de la enfermedad basándose en la distancia entre árboles, así como el efecto de la estructura espacial del huésped.

Material y Métodos

Campañas de vuelo y evaluaciones de campo

Este trabajo se ha llevado a cabo en una selección de parcelas de almendro situadas en la zona demarcada del brote de *Xf* en la provincia de Alicante durante julio del 2018. En las parcelas seleccionadas se determinó la incidencia y severidad (SE) de la infección por *Xf* mediante inspecciones visuales en cada uno de los árboles utilizando una escala de 0 a 5, de acuerdo con el porcentaje de síntomas presentes en la copa del árbol; donde 0, indica la ausencia de síntomas visibles, y 5, árbol con predominio de ramas muertas. La infección por *Xf* se confirmó en un subconjunto de árboles a partir de muestras foliares y la técnica cuantitativa de reacción en cadena de la polimerasa (qPCR).

En la zona de estudio se obtuvieron imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución utilizando dos sensores hiperespectrales y una cá-

para térmica instaladas en tándem en una aeronave (Figura 1). Los sensores hiperespectrales (modelos Micro-Hyperspec VNIR y Micro-Hyperspec NIR-100, Headwall Photonics, MA, EEUU) obtuvieron imágenes a una resolución espacial de 40 y 70 cm, respectivamente. La cámara térmica (FLIR SC655, FLIR Systems, Wilsonville, OR, USA) adquirió imágenes de 60 cm de resolución espacial.

Esquema metodológico

La metodología desarrollada se basó en un marco operativo aerotransportado para detectar almendros infectados por *Xf* en condiciones de secano (Figura 2). El marco combina cuatro etapas: 1) segmentación individual de las copas de los árboles en imágenes hiperespectrales y térmicas; 2) recuperación de características fisiológicas usando modelos biofísicos, como la estimación de contenido de clorofila; 3) algoritmos de aprendizaje automático para detectar árboles infectados por *Xf*; e 4) integración de un modelo estocástico espacial de propagación epidémica con sensores remotos para optimizar la detección temprana de la infección por *Xf*.

Resultados y discusión

El análisis de importancia relativa reveló que el contenido de nitrógeno, clorofila y antocianinas fueron los rasgos funcionales más robustos para poder discriminar entre árboles asintomáticos de aquellos que presentaban síntomas compatibles con la infección por *Xf*. Sin embargo, cuando a estos rasgos funcionales se le añadieron la temperatura de copa (relacionada con la transpiración y conductancia estomática) y la emisión de fluorescencia (relacionada con la tasa fotosintética), se observó una mejora significativa en la predicción de la infección de *Xf*, con una precisión superior al 75%, al compararse con la inspección visual de síntomas. Por otro lado, el modelo de probabilidad de infección por *Xf* basado en los indicadores descritos se combinó con un modelo epidemiológico de dispersión espacial, obteniéndose un incremento en la precisión del 5%, alcanzando un promedio del 80%. Es de destacar que cuando este procedimiento de

análisis se aplica al subconjunto de árboles donde se confirmó la presencia/ausencia de la bacteria mediante diagnóstico molecular, el modelo espacial de dispersión acoplado con rasgos funcionales estimados con imágenes aerotransportadas y modelos biofísicos clasificó correctamente la mayoría de los árboles con niveles de precisión superiores al 80%.

En aquellas parcelas donde las condiciones de secano fueron más estrictas se observó que las antocianinas y la temperatura de copa fueron los rasgos de vegetación que permitieron una mejor discriminación entre los árboles asintomáticos y sintomáticos (Figura 3). Este estudio confirma investigaciones previas (Zarco-Tejada y col., 2021) que mostraron la importancia de utilizar un indicador térmico, como proxy de las tasas de transpiración, especialmente cuando la infección por *Xf* coexiste con factores abióticos, como el estrés hídrico. Además, las alteraciones pro-

ducidas en la regulación estomática y la fotosíntesis debido a la interacción planta-patógeno conducen a una disminución de la emisión de fluorescencia (Calderón y col., 2013; Zarco y col., 2018), así como un descenso en la capacidad fotosintética y la transpiración. La sensibilidad de estos rasgos funcionales basados en la fisiología de la planta para detectar etapas tempranas de la infección por *Xf* está respaldada por investigaciones que muestran el papel fotoprotector de los carotenoides y la protección contra daños inducidos por estreses abióticos y bióticos proporcionados por los flavonoides, tales como las antocianinas (Dalglish y col., 2007).

Conclusiones

Este trabajo demuestra el potencial de la teledetección hiperespectral y térmica para el desarrollo de estrategias de vigilancia y detección temprana de enfermedades emergentes en plantas. En particular, este estu-

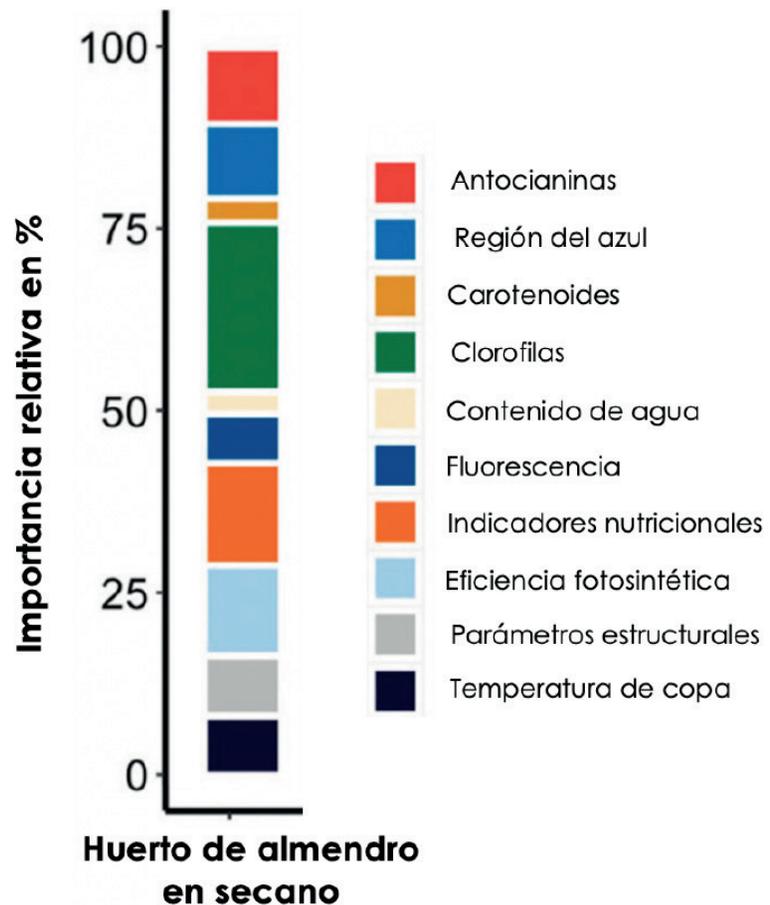


Figura 3. Contribución del rasgo de la planta para detectar los síntomas de *Xylella fastidiosa* (*Xf*) en un algoritmo de aprendizaje automático en una parcela en condiciones de secano y con alta incidencia de infección por *Xf*.

dio aporta avances en el desarrollo de un marco operacional para la detección de brotes de *Xf* basado en la inclusión de rasgos funcionales relacionados con la bioquímica de la planta, procesos de transpiración, emisión de fluorescencia, así como

parámetros de decaimiento estructural. El uso de modelos de transferencia radiativa integrados en un modelo epidemiológico de dispersión espacial abre un nuevo enfoque para la aplicación a gran escala de métodos de aprendizaje automá-

ticos para detectar patógenos de plantas en diferentes cultivos.

Bibliografía



Almeida R.P.P. 2016. Can Apulia's olive trees be saved?. *Science* 353(6297), 346-348.

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 Sens. Environ.* 139, 231-245.

Dagleish, T., Williams, J.M.G., Golden, A.-M.J., Perkins, N., Barrett, L.F., Barnard, P.J., Au Yeung, C., Murphy, V., Elward, R., Tchanturia, K., Watkins, E., 2007. Anthocyanins Biosynthesis, Functions, and Applications, *Journal of Experimental Psychology: General*.

EFSA (European Food Safety Authority) Panel on Plant Health (PLH), Bragard C, Dehnen-Schmutz K, Di Serio F, Gonthier P, Jacques M-A, Jaques Miret JA, Justesen AF, MacLeod A, Magnusson CS, Milonas P, Navas-Cortés JA, Potting R, Reignault PL, Thulke H-H, van der Werf W, Vicent Civera A, Yuen J, Zappala L, Boscia D, Chapman D, Gilioli G, Krugner R, Mastin A, Simonetto A, Spotti Lopes JR, White S, Abrahantes JC, Delbianco A, Maiorano A, Mosbach-Schulz O, Stančanelli G, Guzzo M and Parnell S, 2019a. Update of the Scientific Opinion on the risks to plant health posed by *Xylella fastidiosa* in the EU territory. *EFSA Journal* 2019;17(5):5665, 200 pp. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2019.5665>.

EFSA (European Food Safety Authority) Panel on Plant Health (PLH), Bragard C, Dehnen-Schmutz K, Di Serio F, Gonthier P, Jacques M-A, Jaques Miret JA, Justesen AF, MacLeod A, Magnusson CS, Milonas P, Navas-Cortés JA, Potting R, Reignault PL, Thulke H-H, Van der Werf W, Vicent Civera A, Yuen J, Zappala L, Makowski D, Delbianco A, Maiorano A, Muñoz Guajardo I, Stančanelli G, Guzzo M and Parnell S, 2019b. Scientific Opinion on the effectiveness of plant control measures for *Xylella fastidiosa*. *EFSA Journal* 2019;17(5):5666, 17 pp. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2019.5666>.

EFSA (European Food Safety Authority), Delbianco, A., Gibin, D., Pasinato, L., and Morelli, M. (2022). European Food Safety Authority (EFSA). Update of the *Xylella* spp. host plant database – systematic literature search up to 30 June 2021. *EFSA J.* 20, e07039. doi:<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7039>.

Zarco-Tejada, P.J., Camino, C., Beck, P.S.A.A., Calderon, R., Hornero, A., Hernández-Clemente, R., Kattenborn, T., Montes-Borrego, M., Susca, L., Morelli, M., Gonzalez-Dugo, V., North, P.R.J.J., Landa, B.B., Boscia, D., Saponari, M., Navas-Cortés, J.A., 2018. Previsual symptoms of *Xylella fastidiosa* infection revealed in spectral plant-trait alterations. *Nat. Plants* 4, 432-439.

Zarco-Tejada, P.J., Poblete, T., Camino, C., Gonzalez-Dugo, V., Calderon, R., Hornero, A., Hernandez-Clemente, R., Román-Écija, M., Velasco-Amo, M.P., Landa, B.B., Beck, P.S.A., Saponari, M., Boscia, D., Navas-Cortés, J.A., 2021. Divergent abiotic spectral pathways unravel pathogen stress signals across species. *Nat. Commun.* 12, 6088. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26335-3>