



**2025** | **16-20**  
**GIJÓN** | **JUNIO**

**9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL**

# 9CFE-1932

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

Organiza





## Termografía aplicada al monitoreo del decaimiento en masas forestales de quercíneas

HORNERO, A. (1, 2), ZARCO-TEJADA, P.J. (2, 1), QUERO, J.L. (3), MARCOS PALACIOS, M.J. (3), TOMÁS RIERA, F. (3), MARENGO, I. (4), HERNANDEZ-CLEMENTE, R. (3, 5).

1. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Agricultura Sostenible.
2. The University of Melbourne. Faculty of Engineering and Information Technology.
3. Universidad de Córdoba. ETSIAM, Departamento de Ingeniería Forestal.
4. InnovPlantProtect. Departamento de Monitorização e Diagnóstico de Pragas e Doenças.
5. Swansea University. Geography Department.

### Resumen

El decaimiento de las masas de quercíneas es un fenómeno creciente y complejo que amenaza la supervivencia de estas especies a nivel mundial. Este proceso es resultado de la interacción de factores bióticos y abióticos como plagas, enfermedades, sequías, contaminación e inundaciones, que inducen alteraciones en las características fisiológicas y funcionales de las plantas. Estas alteraciones pueden ser detectadas mediante técnicas de teledetección, y las imágenes térmicas adquiridas desde plataformas aéreas ofrecen una herramienta prometedora para rastrear la respuesta dinámica de las plantas al estrés.

Este trabajo explora el uso de imágenes térmicas de alta resolución (<1 m/px) para la detección del decaimiento en quercíneas. Se evaluaron más de 3.000 árboles distribuidos en las zonas meridional y suroccidental de la península ibérica. Los resultados preliminares muestran que las variaciones en la temperatura de la copa de los árboles son un indicador clave para detectar el estrés, ofreciendo incluso una ventana de hasta dos años de antelación respecto a los métodos tradicionales de inspección visual. Este enfoque tiene el potencial de detectar el decaimiento con mayor anticipación, proporcionando una herramienta eficaz para el mapeo y monitoreo a gran escala del decaimiento en quercíneas y otras posibles enfermedades forestales.

### Palabras clave

Teledetección, Imágenes térmicas, Detección temprana, Estrés hídrico, Sensores aéreos.

#### 1. Introducción

La gestión eficiente del decaimiento forestal muestra dos necesidades primordiales que son la disposición de datos de precisión en el espacio y la necesidad de variables que puedan anticipar procesos de deterioro en la salud del arbolado irreversibles (ALLEN et al., 2015). La teledetección ha cubierto exitosamente y en gran medida la generación de datos espaciales asociados a cambios en cobertura (SENF et al., 2017; BURAS et al., 2021). Sin embargo, una alteración significativa en la cobertura del arbolado viene generalmente asociada a



un cambio irreversible que limita las opciones de gestión preventiva y la eficiencia en las actuaciones de recuperación del medio natural aumentado la vulnerabilidad de los ecosistemas. Recientemente, se han explorado enfoques complementarios, como el uso de sensores hiperspectrales y térmicos remotos de alta resolución, que ofrecen mayor precisión en etapas tempranas del deterioro.

En este contexto, la teledetección ha demostrado ser una herramienta prometedora para abordar las limitaciones de los métodos tradicionales. Las imágenes térmicas, en particular, permiten medir la temperatura del dosel arbóreo, un indicador clave de las alteraciones fisiológicas tempranas relacionadas con el estrés hídrico y otras condiciones de deterioro. Investigaciones recientes han identificado que la diferencia de temperatura entre el dosel y el aire ( $T_c - T_a$ ) es especialmente sensible para detectar estas alteraciones, permitiendo diferenciar entre árboles sanos y afectados antes de la aparición de síntomas visibles (HERNANDEZ-CLEMENTE et al., 2017; HORNERO et al., 2021). Esto es crítico, ya que intervenciones tempranas pueden mitigar los efectos adversos y prevenir el avance del deterioro (ROMERO et al., 2019).

Por otra parte, la combinación de datos térmicos con modelos radiativos tridimensionales ha mejorado significativamente la precisión en la detección de árboles afectados. ZARCO-TEJADA et al. (2021) demostraron que este enfoque no solo facilita la identificación temprana, sino que también permite integrar información sobre factores ambientales y estructurales del bosque, proporcionando una visión más completa de las dinámicas de estrés. Además, estudios como los de GONZALEZ-DUGO et al. (2012) y CAMINO et al. (2018) han señalado que la heterogeneidad de las copas y la interacción entre el estrés hídrico y los patógenos pueden analizarse eficazmente mediante técnicas avanzadas de teledetección de alta resolución espacial. La mayoría de los avances realizados en la formulación de índices que puedan ser utilizados como indicadores de salud de la vegetación han sido formulados en medio agrícola debido a que presentan coberturas homogéneas que pueden ser fácilmente instrumentalizadas y monitorizadas. Uno de los índices más validado es el índice de estrés hídrico en cultivos (CWSI, por sus siglas en inglés) que fue inicialmente propuesto como un índice normalizado para evaluar la temperatura del dosel vegetal como indicador del estrés hídrico en las plantas, minimizando el efecto de las condiciones ambientales variables (IDSO et al., 1981; JACKSON et al., 1981).

Sin embargo, el estudio de indicadores térmicos como el CWSI que puedan ser analizados a través de diferentes escalas temporales y localizaciones para cartografiar con precisión el decaimiento forestal es aún muy limitado debido a la dificultad que presentan dicho tipo de coberturas para la instrumentalización y caracterización de cubiertas tan heterogéneas.

Este trabajo se centra en la aplicación de imágenes térmicas de alta resolución adquiridas en las regiones meridional (Córdoba) y suroccidental (Huelva) de la península ibérica para evaluar su eficacia como herramienta de monitoreo del decaimiento en quercíneas. Nuestra hipótesis plantea que estas imágenes, complementadas con mediciones fisiológicas y ambientales, pueden proporcionar



una base robusta para la detección y el mapeo del estrés arbóreo con mayor precisión y anticipación, abriendo nuevas posibilidades para la gestión sostenible de estos ecosistemas forestales vulnerables.

## 2. Objetivos

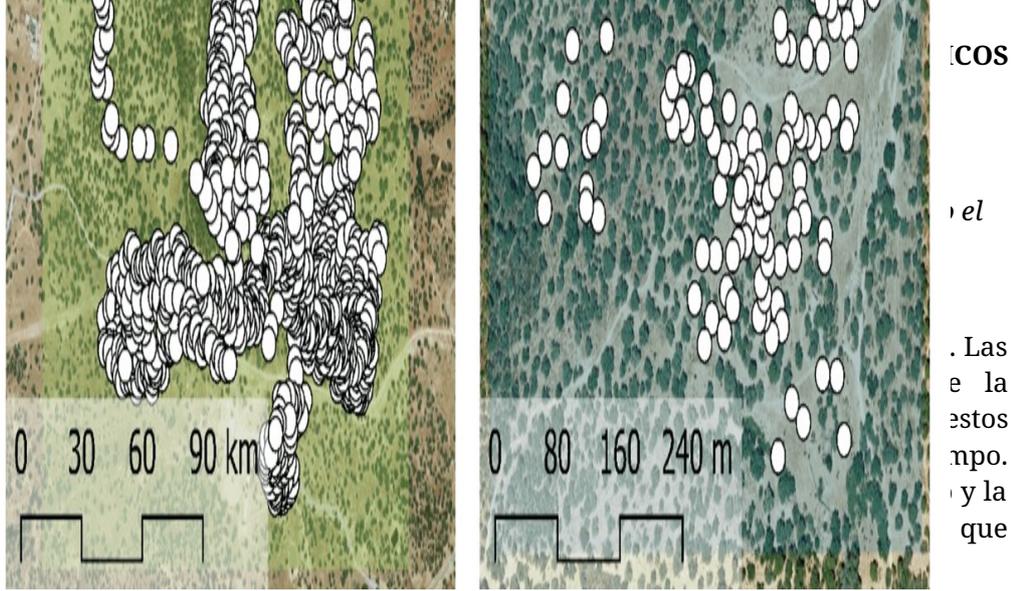
Este trabajo tiene como objetivo evaluar el uso de imágenes térmicas de alta resolución para detectar signos tempranos de estrés hídrico en quercíneas, examinando la relación entre las variaciones térmicas del dosel arbóreo y los factores de estrés biótico y abiótico que contribuyen al decaimiento. Además, busca proponer una metodología práctica que facilite el mapeo y monitoreo eficiente del decaimiento en masas forestales a partir de indicadores como el CWSI.

## 3. Metodología

El estudio se llevó a cabo en las regiones bioclimáticamente diferentes como son Córdoba y Huelva de la península ibérica. Córdoba se encuentra en la región norte-central de Andalucía, dentro del valle del Guadalquivir, y se caracteriza por un clima mediterráneo continentalizado, con veranos extremadamente calurosos, inviernos relativamente fríos y una influencia marítima reducida. Su ubicación más interior respecto a la costa genera una mayor amplitud térmica tanto diaria como anual, lo que intensifica las condiciones de aridez durante los meses de verano. Por otro lado, Huelva, situada en la región suroccidental de Andalucía y cercana al océano Atlántico, presenta un clima mediterráneo marítimo con temperaturas más moderadas debido a la influencia atlántica. Los veranos, aunque cálidos, son menos extremos que en Córdoba, con una humedad relativa más alta. Además, en Huelva las precipitaciones son más frecuentes, especialmente en invierno, y la evaporación es menor gracias a la cercanía al mar, lo que contribuye a una menor aridez en comparación con Córdoba.

Se seleccionaron áreas con alta incidencia histórica de decaimiento en dehesa (*Quercus ilex* y *Quercus suber*) y se identificaron más de 3.000 árboles para su monitoreo (*Figura 1*). Las imágenes térmicas se obtuvieron mediante vuelos con sensores de alta resolución (<1 m/px) durante los meses de verano, cuando las diferencias térmicas entre árboles sanos y afectados son más pronunciadas (HERNÁNDEZ-CLEMENTE et al., 2017; HORNERO et al., 2024).

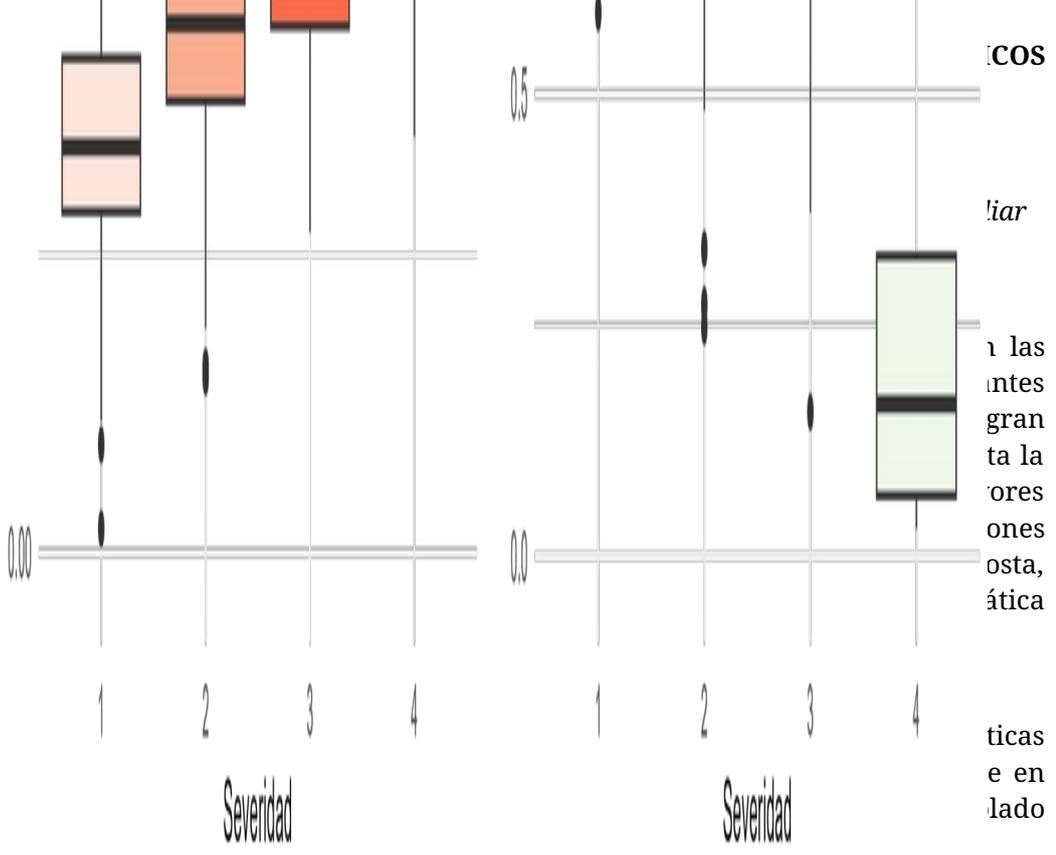




#### 4. Resultados

Los resultados evidenciaron que el CWSI fue capaz de identificar árboles con síntomas incipientes de decaimiento hasta dos años antes de que estos fueran detectados mediante inspecciones visuales. Esto subraya el potencial del índice como herramienta de alerta temprana, proporcionando un marco temporal valioso para implementar medidas de gestión preventiva (*Figura 2*).









*Figura 3. Mapa de CWSI en dos localizaciones de bosque de quercíneas afectadas por decaimiento, a la izquierda se muestra la zona localizada en Huelva y a la derecha la sita en Córdoba.*

## 5. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran la eficacia de las imágenes térmicas de alta resolución como herramienta clave para la detección temprana del estrés hídrico en quercíneas. La diferenciación observada en los valores de CWSI entre árboles sanos y afectados en las regiones meridional y suroccidental de la península ibérica confirma la hipótesis inicial y subraya su utilidad en el monitoreo de ecosistemas vulnerables (STILL et al. 2019).

Investigaciones previas han señalado el potencial del Tc-Ta como indicador temprano de alteraciones fisiológicas (HERNÁNDEZ-CLEMENTE et al., 2011). Este trabajo refuerza dichos hallazgos al demostrar que el uso de datos térmicos, cuando están adecuadamente normalizados, facilita su aplicación a gran escala, permitiendo comparaciones entre estaciones del año y estados fenológicos de la vegetación (GONZALEZ-DUGO et al., 2019). Además, estos resultados soportan la utilidad de la teledetección térmica como herramienta robusta para la gestión forestal para la detección temprana de decaimiento en quercíneas (HORNERO et al., 2024).

El uso de mapas interpolados derivados de datos térmicos proporciona una herramienta visual valiosa para identificar áreas críticas que requieren intervenciones. Aunque no miden directamente el potencial hídrico ni la conductancia estomática, estos mapas son proxies efectivos para evaluar el estado general de los bosques añadiendo información de cambios no visuales que pueden mejorar la detección temprana como se ha comprobado en cultivos (GONZALEZ-DUGO & ZARCO-TEJADA, 2024). Este enfoque también facilita el análisis espacial del estrés, contribuyendo al diseño de estrategias de gestión más eficaces.

No obstante, el estudio presenta limitaciones que deben considerarse. La heterogeneidad de las copas y las condiciones microclimáticas influyen en la precisión de las mediciones térmicas, lo que resalta la necesidad de combinar estos datos con otros indicadores funcionales, como modelos radiativos tridimensionales. Además, se recomienda expandir el análisis a otras especies forestales y condiciones climáticas para validar la generalización de los hallazgos.

## 6. Conclusiones

Este estudio confirma que las imágenes térmicas de alta resolución son una herramienta eficaz para la detección temprana del estrés hídrico en quercíneas en las regiones meridional y suroccidental de la península ibérica. Los datos térmicos demostraron su capacidad para diferenciar entre árboles sanos y afectados con alta precisión, incluso en etapas iniciales del decaimiento. Los resultados de este estudio resaltan la capacidad de las imágenes térmicas para identificar áreas de estrés hídrico y su potencial como herramienta para priorizar intervenciones de gestión forestal. La posibilidad de normalizar los datos térmicos y utilizarlos en



diversos escenarios fenológicos y estaciones del año amplía su aplicabilidad práctica y operativa. Aunque el enfoque aún enfrenta desafíos derivados de la heterogeneidad estructural y las condiciones microclimáticas, su integración con modelos avanzados y otros indicadores funcionales promete maximizar su utilidad. La extensión de estas metodologías a diferentes ecosistemas y especies es un paso crucial para consolidar su impacto en la gestión forestal sostenible.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, a través de los proyectos QUERCUSAT (CGL2013-40790-R), ESPECTRAMED (CGL2018-86161-R) y D-TRAITS (PID2021-124058OA-I00). También contó con el apoyo de la Fundación La Caixa, en colaboración con BPI y FCT, en el marco de la iniciativa Promove2020 – O Futuro do Interior. RHC agradece el apoyo recibido a través del Programa Ramón y Cajal (RYC2020-029187-I) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España.

## 8. Bibliografía

ALLEN, C.D., BRESHEARS, D.D., MCDOWELL, N.G. 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6: 155.

BURAS, A., RAMMIG, A., ZANG, C.S. 2021. The European Forest Condition Monitor: Using Remotely Sensed Forest Greenness to Identify Hot Spots of Forest Decline. *Front. Plant Sci.* vol. 12: 689220.

CAMINO, C., ZARCO-TEJADA, P.J., GONZALEZ-DUGO, V. 2018. Effects of Heterogeneity within Tree Crowns on Airborne-Quantified SIF and the CWSI as Indicators of Water Stress in the Context of Precision Agriculture. *Remote Sens.* 10: 604.

GONZALEZ-DUGO, V., LOPEZ-LOPEZ, M., ESPADAFOR, M., ORGAZ, F., TESTI, L., ZARCO-TEJADA, P., LORITE, I.J., FERERES, E. 2019. Transpiration from canopy temperature: Implications for the assessment of crop yield in almond orchards. *Eur. J. Agron.* 105: 78-85.

GONZALEZ-DUGO, V., ZARCO-TEJADA, P., BERNI, J.A.J., SUÁREZ, L., GOLDHAMER, D., FERERES, E. 2012. Almond tree canopy temperature reveals intra-crown variability that is water stress-dependent. *Agric. For. Meteorol.* 154-155: 156-165.

GONZALEZ-DUGO, V., ZARCO-TEJADA, P.J. 2024. Assessing the impact of measurement errors in the calculation of CWSI for characterizing the water status of several crop species. *Irrig. Sci.* 42: 431-443.

HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R., NAVARRO-CERRILLO, R.M., SUAREZ, L., MORALES, F., ZARCO-TEJADA, P.J. 2011. Assessing structural effects on PRI for stress detection in conifer forests. *Remote Sens. Environ.* 115: 2360-2375.

HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R., NORTH, P.R.J., HORNERO, A., ZARCO-TEJADA, P.J. 2017. Assessing the effects of forest health on sun-induced chlorophyll fluorescence using the FluorFLIGHT 3-D radiative transfer model to account for forest structure. *Remote Sens. Environ.* 193: 165-179.

HORNERO, A., ZARCO-TEJADA, P.J., MARENCO, I., FARIA, N., HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R. 2024. Detection of oak decline using radiative transfer modelling



and machine learning from multispectral and thermal RPAS imagery. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 127: 103679.

HORNERO, A., ZARCO-TEJADA, P.J., QUERO, J.L., NORTH, P.R.J., RUIZ-GÓMEZ, F.J., SÁNCHEZ-CUESTA, R., HERNANDEZ-CLEMENTE, R. 2021. Modelling hyperspectral- and thermal-based plant traits for the early detection of *Phytophthora*-induced symptoms in oak decline. *Remote Sens. Environ.* 263: 112570.

IDSO, S.B., JACKSON, R.D., PINTER, P.J., REGINATO, R.J., HATFIELD, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24: 45-55.

JACKSON, R.D., IDSO, S.B., REGINATO, R.J., PINTER, P.J., JR. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17: 1133-1138.

SENF, C., SEIDL, R., HOSTERT, P. 2017. Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 60: 49-60.

STILL, C., POWELL, R., AUBRECHT, D., KIM, Y., HELLIKER, B., ROBERTS, D., RICHARDSON, A.D., GOULDEN, M. 2019. Thermal imaging in plant and ecosystem ecology: applications and challenges. *Ecosphere* 10: e02768.

ZARCO-TEJADA, P.J., POBLETE, T., CAMINO, C., GONZALEZ-DUGO, V., CALDERON, R., HORNERO, A., HERNANDEZ-CLEMENTE, R. ET AL. 2021. Divergent abiotic spectral pathways unravel pathogen stress signals across species. *Nat. Commun.* 12: 6088.