



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

**9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL**

**9CFE-1277**

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

Organiza





## ¿Puede la teledetección hiperespectral óptica y térmica identificar la respuesta diferenciada de los estratos de vegetación de un ecosistema de dehesa a la disponibilidad de nutrientes?

GONZALEZ-CASCON, R. (1), BURCHARD-LEVINE, V. (2), PACHECO-LABRADOR, J. (2), EL-MADANY, T. (3), MIGLIAVACCA, M. (3), CARRARA, A. (4), MORENO, G. (5), LAZARO- LOPEZ, A. (1), RAYA-SERENO, D. (2), HANGGARA B. (3), LEE, SC (3) , MARTIN, M.P. (2)

(1) Departamento de Medio Ambiente y Agronomía, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y Alimentarias (CN-INIA, CSIC), Ctra. Coruña, Km. 7,5, 28040 Madrid, España. [cascon@inia.csic.es](mailto:cascon@inia.csic.es).

(2) Laboratorio de Espectro-radiometría y Teledetección Ambiental (SpecLab, CSIC), Albasanz 26-28, 28037, Madrid, España.

(3) Max Planck Institute for Biogeochemistry, Department Biogeochemical Integration, 07745 Jena, Alemania.

(4) Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), 46980 Valencia, España.

(5) Instituto para el estudio de la dehesa, Universidad de Extremadura, 10600 Plasencia, España.

### Resumen

En la estación de seguimiento de Majadas de Tiétar (Cáceres), se ha realizado una experiencia de fertilización a gran escala para conocer la respuesta del ecosistema a la modificación en la disponibilidad de dos nutrientes esenciales: nitrógeno y fósforo. En ella se monitorizan entre otros el impacto sobre los flujos de carbono y agua mediante tres torres que realizan mediciones mediante métodos micrometeorológicos. También se hace un seguimiento de los cambios en los dos estratos de vegetación mediante técnicas de teledetección a varias escalas espacio-temporales. En este trabajo se presenta el análisis de los datos temporales adquiridos sobre la estación experimental mediante los sensores hiperespectrales aeroportados CASI (óptico VIS-NIR) y AHS (térmico) en el período inicial de la comprendido entre 2014-2017. Se realizaron cinco vuelos en un período de cuatro años en tres momentos del período vegetativo: máximo verdor durante el desarrollo de la brotación de las copas (3), en la etapa de transición pre-estival de expansión foliar (1) y en el inicio del período de sequía estival (1). La primera (2014), se realizó antes de la aplicación de fertilizante lo que permite analizar su efecto.

El análisis de las imágenes ópticas y térmicas ha permitido capturar cambios diferenciados en los dos estratos de vegetación en el período posterior a la fertilización. En el dosel de encina, una capa de vegetación que parece más estable a las perturbaciones, se ha observado un efecto significativo de enfriamiento en las copas de las zonas fertilizadas ya en el primer año después de la fertilización. En el estrato de pasto, el efecto de enfriamiento ha sido similar y más intenso. El análisis de los índices de vegetación ha demostrado cambios en la respuesta óptica de las dos capas de vegetación. En el caso del pasto herbáceo destaca la zona fertilizada con N con un incremento sostenido de los índices de vegetación VIS-NIR en las cuatro imágenes post-fertilización con respecto al control. En el caso del dosel de encina este incremento se aprecia sólo en las imágenes de primavera post-



fertilización.

### Palabras clave

*Quercus ilex*, CASI, AHS, temperatura de superficie, rasgos de copa, índices de vegetación.

#### 1. Introducción

La deposición atmosférica de nitrógeno (N) de origen antropogénico está generando una tendencia al incremento de la relación con el fósforo (P) en los ecosistemas, actuando sobre la capacidad fotosintética de la vegetación y consecuentemente su capacidad de retención de carbono (PEÑUELAS et al, 2020). El aporte de N en un ecosistema con bajos niveles de P disponible en suelo puede generar desequilibrios que repercutan en su productividad, su eficiencia en el uso del agua, su biodiversidad o en los rasgos estructurales y bioquímicos de la vegetación que regulan el ciclo de nutrientes (PEÑUELAS et al, 2020). Son escasos los trabajos que analizan los efectos de los cambios en la disponibilidad de nutrientes y su efecto sobre el arbolado en ecosistemas tipo sabana o agroforestales (MORENO & OBRADOR, 2007; VAN DER WAAL et al, 2011). Los estudios basados en la obtención de datos de campo pueden ofrecer información relevante y muy detallada puntualmente sobre estos procesos, pero es costosa y limitada en el espacio y/o en el tiempo ser resulta insuficiente para obtener una visión espacio-temporal más completa del estado del arbolado en estos ecosistemas en respuesta a la disponibilidad de nutrientes. Los avances tecnológicos en la adquisición y el procesamiento de los datos procedentes de teledetección la convierten en una herramienta fundamental y consolidada en numerosas aplicaciones ambientales y, particularmente, en el estudio del estado de la vegetación. Los sensores de teledetección, que miden la respuesta óptica y térmica del dosel a diferentes escalas espaciales y temporales, constituyen una herramienta muy valiosa para el seguimiento de su respuesta a las perturbaciones. En un sistema de dehesa, el estudio del funcionamiento del dosel de encina como respuesta a cambios en el ecosistema, presenta retos mayores que el dosel de pasto subyacente tanto por la dificultad de muestreo espacialmente representativo como por la heterogeneidad intrínseca dentro de las copas. La estimación de rasgos biofísicos y bioquímicos en copas arbóreas abiertas ha sido llevada a cabo con herramientas de teledetección mediante sensores ópticos satelitales (NAVARRO-CERRILLO et al, 2019), aeroportados (ZARCO-TEJADA et al, 2004) y terrestres de adquisición continua (SOUDANI et al. 2012). Sin embargo, la resolución espacial de los sensores satelitales ha limitado su uso en el estudio de cubiertas arbóreas poco densas como las de la dehesa. Las imágenes hiperespectrales aerotransportadas son un paso intermedio entre la información proporcionada a nivel de terreno y las mediciones basadas en sensores satelitales habiendo demostrado ser una herramienta útil para la estimación de nutrientes a nivel de dosel en cultivos (WANG et al, 2021) y bosques de especies caducifolias y coníferas (SINGH et al, 2015).

En una dehesa de uso ganadero extensivo en el norte de la provincia de Cáceres, sobre suelos ácidos con bajos niveles de N y P (WEINER et al, 2018), se ha llevado a cabo una experiencia para el seguimiento a escala de ecosistema del efecto de la modificación de la disponibilidad de los nutrientes sobre el sistema atmósfera-vegetación-suelo. La fertilización nitrogenada produjo un intenso efecto en el estrato herbáceo en la dehesa incrementando su producción primaria neta, el índice de área foliar (LAI) y los niveles foliares de nitrógeno y equilibrando los



flujos anuales de carbono a nivel de ecosistema, alcanzándose la neutralidad en emisiones de carbono (EL-MADANY et al, 2021). Sin embargo, también indujo un adelanto en el proceso de senescencia estival como consecuencia de un aumento en la evapotranspiración del pasto (LUO et al, 2020). Este efecto se compensó en el tratamiento con N+P, que produjo un incremento en la eficiencia del uso del agua en el estrato herbáceo (EL-MADANY et al, 2021).

El estrato arbóreo perenne contribuye con un 30% a la producción primaria neta de este ecosistema de dehesa. Sin embargo, no se han apreciado diferencias significativas entre tratamientos de fertilización y respecto al control en el estado nutritivo de las encinas (EL-MADANY et al, 2021). Sí se han apreciado cambios estructurales en el estrato arbóreo, concretamente un incremento significativo en la altura media de las encinas en las áreas fertilizadas frente a las del área control (BOGDANOVICH et al, 2021). La capacidad y velocidad de respuesta del arbolado a la fertilización no se ha cuantificado aún. Para poder abordar el análisis de los efectos de la fertilización a nivel de copa con una resolución espacial elevada, se ha realizado un análisis de la respuesta térmica y óptica del dosel arbóreo obtenida mediante sensores aeroportados sobre la zona de estudio a lo largo de cuatro años.

## 2. Objetivos

El objetivo del estudio es analizar el efecto de la disponibilidad de los nutrientes nitrógeno y fósforo, aportados al ecosistema mediante fertilización, sobre la respuesta espectral de la cubierta vegetal (dosel de encina y pasto herbáceo) en el rango visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico. Para ello, se aborda el análisis de las copas individuales de encina mediante los datos obtenidos de una serie temporal de imágenes aeroportadas CASI y AHS y se compara con la respuesta del sotobosque herbáceo circundante.

## 3. Metodología

El estudio se ha realizado en la estación experimental de Majadas de Tiétar (Cáceres, 39°56'25 "N, 5°46'28 "W), una estación de monitorización continua y multidisciplinar del funcionamiento de un ecosistema de dehesa a nivel de atmósfera-vegetación-suelo y su respuesta a las perturbaciones determinados por el cambio climático, la disponibilidad de nutrientes y el manejo (EL-MADANY et al, 2021). Majadas de Tiétar constituye la primera estación ICOS terrestre en España ([https://meta.icos-cp.eu/resources/stations/ES\\_ES-LMa](https://meta.icos-cp.eu/resources/stations/ES_ES-LMa)). La dehesa de Majadas tiene una explotación ganadera extensiva. El arbolado presenta una cubierta de cubierta del 23% y una predominancia de *Quercus ilex* (95 %), con una altura media de 8.7 m (BOGDANOVICH et al, 2021). El rango de edad de las encinas se estima entre los 120-150 años. El estrato herbáceo está constituido por especies anuales con una elevada variabilidad intra- e interanual. El clima es mediterráneo continental con una temperatura media anual de 16.7°C y una precipitación media anual de 636 mm (LUO et al, 2018). El sustrato edáfico caracterizado como cambisol dístico (FAO, 1985), se ha desarrollado sobre depósitos aluviales del Plioceno-Mioceno; se caracteriza por una textura arenosa (80% arena), y un pH ligeramente ácido en los horizontes superficiales del suelo (CASALS et al, 2009).

En la estación experimental opera desde 2003 una torre de medición de flujos de agua y carbono por métodos micrometeorológicos. En el año 2014 se instalaron otras dos torres adicionales para el seguimiento a escala de ecosistema del efecto de la fertilización con N y con N+P (EL-MADANY et al, 2018). Para ello, se llevó a cabo una fertilización a gran escala con la cantidad de N equivalente a 10 veces la entrada atmosférica de N en el ecosistema (MORRIS et al, 2019). En paralelo se



llevó a cabo una fertilización con N+P con el objetivo de observar la respuesta del ecosistema al aumento de N, pero manteniendo la relación N/P. Las áreas de fertilización y la de control no fertilizada se sitúan en torno a las tres torres de medición de flujos: C (control), N (Fertilización con N) y NP (fertilización con N+P) y tienen una superficie aproximada (*footprint*) de 20 ha cada una (Figura 1). La fertilización fosfórica (50 kg P/ha en forma de superfosfato triple) fue aplicada en noviembre 2014 y la nitrogenada (100 kg N ha en forma de nitrato amónico-cálcico) en marzo de 2015. En los dos años siguientes se aplicaron dosis de 20 kg de N y 10 kg P por ha/año, aplicados en invierno.

Los datos espectrales fueron adquiridos en el contexto de los proyectos Fluxpec (<http://www.lineas.cchs.csic.es/fluxpec>) y SynerTGE (<http://www.lineas.cchs.csic.es/synertge>) por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Se utilizaron dos sensores hiperespectrales: el sensor CASI (CASI-1500i, Itres Research Ltd., Calgary, AB, Canadá) con 144 bandas en el rango espectral VNIR (0.38 -1.05  $\mu\text{m}$ ) y una resolución espacial de 1.5 m y el sensor AHS-160 (Sensytech Inc., USA), que adquiere información en 10 bandas espectrales en la región del térmico (8 and 13  $\mu\text{m}$ ) con una resolución espacial de 4 m. Se realizaron cinco campañas de vuelos en un período de cuatro años en tres momentos del período vegetativo: tres en el momento de máximo verdor durante el desarrollo de la brotación de las copas de encina en primavera: la primera en el período previo a la fertilización (8-abr-2014), y otras dos en el período posterior a la fertilización (23-abr-2015 y 3-may-2016). Una cuarta en la etapa de transición pre-estival de expansión foliar (19-5-2017) y una en el inicio del período de sequía estival (3-jul-2015). Las imágenes fueron adquiridas, en todas las campañas, siguiendo el mismo patrón espacio-temporal, en torno al mediodía solar y centradas en las tres torres de flujos. El procesado de las imágenes para la extracción de las bandas correspondientes a las copas de encina se realizó con el objetivo de eliminar al máximo los efectos de mezclas espectrales con pasto y/o sombras.

La temperatura de superficie fue calculada a partir de las bandas térmicas del sensor AHS usando el método *adjusted normalized emissivity method* (ANEM) y el software ATCOR-4<sup>TM</sup> (DE MIGUEL et al., 2015) y fueron desagregadas espacialmente a 1.5 m usando *Data Mining Sharpener* tal y como se describe en BUCHARD-LEVINE et al. (2019). Para cada variable, se extraen los valores de los píxeles interiores de la copa de encina para descartar la zona más periférica del dosel y disminuir el efecto de la cobertura herbácea sobre la señal espectral. Para esto se clasificó previamente la imagen CASI en las diferentes clases de cubierta (encina, cobertura herbácea, suelo/sombra) usando una clasificación supervisada basado en *Mahalanobis distance* (BUCHARD-LEVINE et al., 2021) y se extrae los píxeles clasificados como encina que estaban al menos 3 m de distancia de un píxel clasificado como cobertura herbácea (distancia calculada a partir de `gdal_proximity` en python). Para extraer las variables de la capa herbácea circundante a cada encina, se selecciona una zona buffer de 15\*15 m centrada en la encina y se extraen los valores de los píxeles de pasto alejados al menos 3 m del borde de la copa. A partir de ellos, se calcularon índices de vegetación relacionados con diferentes rasgos funcionales de la copa como su contenido en pigmentos, materia seca y su estructura (Tabla 1).

Con el objetivo de conocer la respuesta del dosel de encina a la fertilización, se evaluó la modificación de estas variables en las imágenes anteriores y posteriores a la fertilización. Se analizaron todas las encinas dentro de los tres *footprints* (57-

86) en cada una de las áreas fertilizadas y de control.

Para el análisis estadístico de los resultados se realizó un test de ANOVA comparando los valores medios para cada imagen entre las tres áreas estudiadas y los dos estratos de vegetación.

Tabla 1: Índices de vegetación calculados a partir de los espectros de copa de la imagen CASI

Índice vegetación

ZARCO-TEJADA et al, 2001

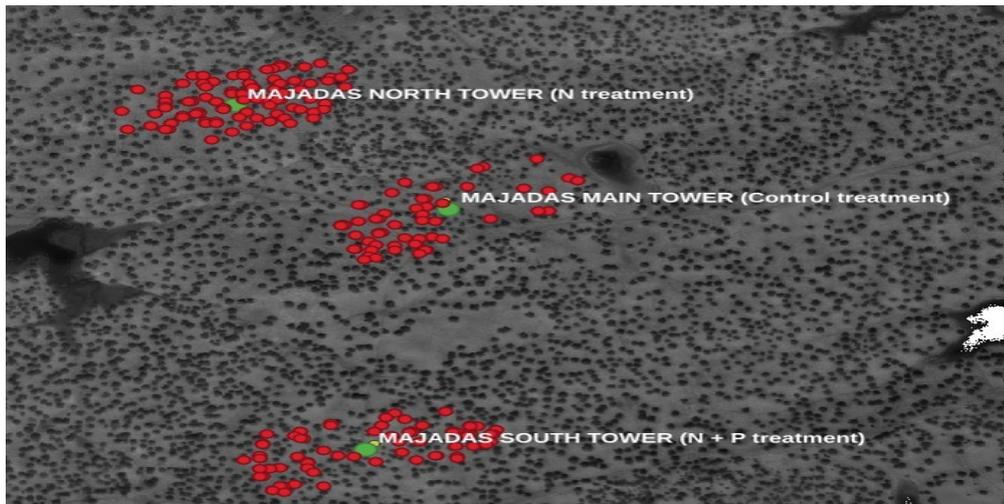


Figura 1. Izquierda: mapa con la localización de las copas de encinas analizadas en las tres zonas de fertilización: Main tower (zona de control sin fertilización), North tower (zona de fertilización nitrogenada) y South tower (zona de fertilización con nitrógeno y fósforo).

#### 4. Resultados

##### 4.1 Modificación de la temperatura de la cubierta de vegetación con la fertilización

El dosel de encina presenta una temperatura significativamente inferior (3-5 K en primavera, y 12-14 K en la época estival) al estrato de pasto circundante en las cinco imágenes TIR ( $P < 0.0000$ ), confirmando así, como la temperatura de superficie a alta resolución obtenida de las imágenes AHS ha permitido diferenciar los dos estratos de vegetación en la dehesa.

En la cubierta arbórea, vemos que en la imagen térmica previa a la fertilización

(2014-04-08) el dosel de encina en la zona de control presentaba temperaturas significativamente inferiores a las de las zonas fertilizadas con N y N+P (-0.4 K y -0.5 K) (Tabla 1 y figura 2). En las dos imágenes de primavera posteriores a la fertilización, se invierte estas diferencias, siendo la temperatura en las dos zonas fertilizadas (2015-04-23) significativamente inferiores a la de control -0.6 K en el área N y -1.0 K en la zona N+P, manteniéndose esta diferencia significativa sólo en el área N+P en la siguiente primavera (2016-05-03). Este efecto desaparece en las dos imágenes pre-estival y estival en las que no hay diferencias entre las tres zonas.

*Tabla 2. Resultado del análisis de ANOVA (razón F y probabilidad) para la temperatura de superficie en el dosel de encina y el pasto circundante entre las tres áreas: control, fertilizada con N y con N+P para cada imagen térmica en el período 2014-2017 y diferencia de temperaturas medias entre la zona de control y las fertilizadas (N - Control y N+P - Control) y el grado de significación de las diferencias (\* P <0.5, \*\* P<0.01 y \*\*\* P<0.001).*

Imagen TIR	Strato	vegetación	F	P	$\Delta T_s$	N - Control	$\Delta T_s$	N+P - Control
Pre	fertilización	08/04/2014	Encina	9.80	0.0001	0.36**		0.51***
Pasto	4.86	0.0087	0.24*			-0.02		
Pos	fertilización	23/04/2015	Encina	7.92	0.0005	-0.61*		-1.00***
Pasto	11.68	0.0000	-0.81***			-0.68***		
03/05/2016	Encina	8.81	0.0002	-0.12			-0.56***	
Pasto	120.81	0.0000	-0.91***				-1.81***	
19/5/2017	Encina	1.10	0.3360	0.22			0.53	
Pasto	10.26	0.0001	-1.02***				-0.18	
03/07/2015	Encina	2.70	0.0695	-0.10			0.53	
Pasto	9.74	0.0001	1.13***				0.54	

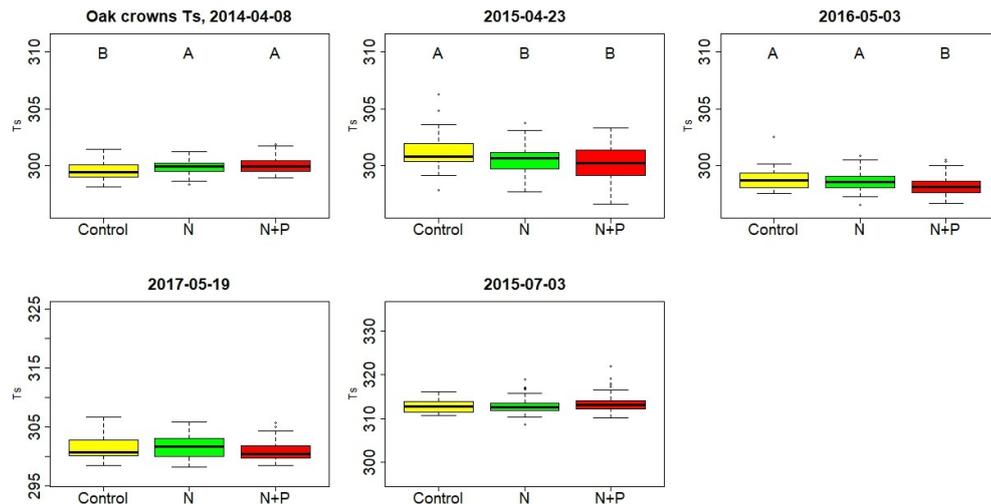


Figura 2: diagramas de cajas de la temperatura de superficie de las copas de encina para el período de brotación pre-fertilización 2014-04-08 y post-fertilización 2015-04-23 y 2016-05-03 (arriba), expansión de las hojas (2017-05-19) y sequía estival (2015-07-03) abajo. Área control (amarillo), fertilizada con N (verde) y fertilizada con N+P (rojo).

El efecto de enfriamiento tras la fertilización ha sido más intenso en el estrato de pasto herbáceo, especialmente en la época de primavera (2015 y 2016), coincidiendo con el momento de máxima producción de biomasa herbácea. En la imagen previa a la fertilización la zona de Control presenta temperaturas significativamente inferiores (-0.2 K) que área con adicción de N (figura 3). El efecto de enfriamiento en la cubierta de pasto ha sido más intenso en el área fertilizada con N+P en el año 2016 (-1.8 K), que en la zona con adicción de N (-0.9 K). En la imagen de verano, la variación de temperatura entre zonas fue similar a la imagen pre-fertilización. En la primavera de 2017 el efecto es el contrario, con temperaturas significativamente inferiores en la zona fertilizada sólo con N.

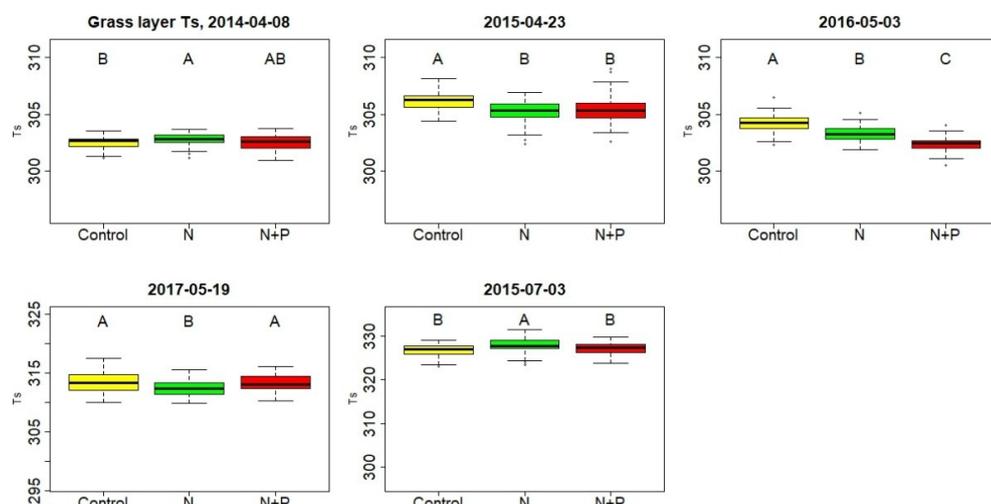


Figura 3: diagramas de cajas de la temperatura del pasto herbáceo circundante a las encinas para el período de primavera pre-fertilización 2014-04-08 y post-

fertilización 2015-04-23 y 2016-05-03 (arriba), inicio de senescencia (2017-05-19) y período de sequía estival (2015-07-03), abajo. Área control (amarillo), fertilizada con N (verde) y fertilizada con N+P (rojo).

#### 4.2 Modificación de la respuesta óptica de la vegetación con la fertilización

Todos los índices de vegetación calculados presentan diferencias significativas entre las tres áreas de la dehesa en las cinco imágenes CASI para los dos estratos de vegetación (encina y pasto herbáceo) a excepción del MTCI\_encina y MTCI\_pasto y NIRv\_pasto que en la imagen pre-fertilización de 8-4-2004 no presentan diferencias (Tabla 3). Las diferencias son mucho más intensas en los índices de las imágenes de las dos primaveras post-fertilización con valores de la razón F, que en el dosel de encina en algunos índices como el RE y GNDVI alcanza un valor 10 veces superior en el vuelo de la primavera 2015 con respecto a la de 2014. Este incremento es mucho más intenso en la cubierta de pasto verde en primavera (Tabla 3).

*Tabla 3. Resultado del análisis de ANOVA de diferentes índices de vegetación de copas y de pasto entre los tres tratamientos para las cinco imágenes CASI.*

El índice RE del dosel de encina en la zona fertilizada con N+P presenta valores significativamente más altos que la zona control en las cinco imágenes analizadas, incrementándose estas diferencias con la fertilización, con un incremento máximo en la imagen de verano 2015-07-03. En las encinas del área con adicción sólo de N, tras la aplicación de la fertilización, se produce un aumento significativo de este índice RE con respecto al control más tarde, en el segundo y tercer año tras la fertilización (primavera 2016 y 2017), y desaparece en la imagen de verano (Figura 4).

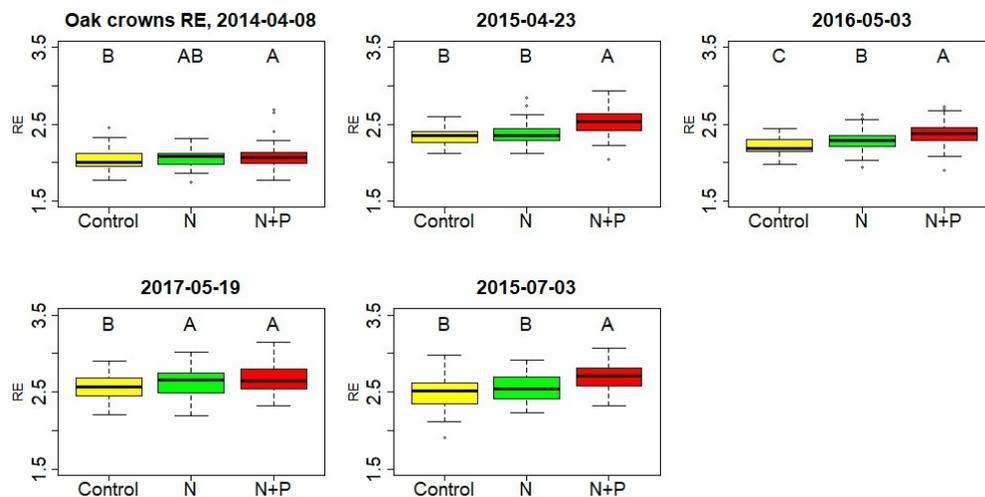


Figura 4: diagramas de cajas del índice Red Edge (RE) del dosel de encina para el período de brotación pre-fertilización 2014-04-08 y post-fertilización 2015-04-23 y 2016-05-03 (arriba), expansión de las hojas (2017-05-19) y sequía estival (2015-07-03) abajo. Área control (amarillo), fertilizada con N (verde) y fertilizada con N+P (rojo).

En el caso de la cubierta de pasto, la fertilización produce un incremento muy intenso y significativo del índice RE en las dos zonas fertilizadas en las cuatro imágenes de post-fertilización. En la primavera 2015 y 2016 el efecto es muy superior en la zona N+P. Sin embargo, en la imagen de 2017 al inicio de la senescencia del pasto, la zona de sólo N ostenta valores superiores

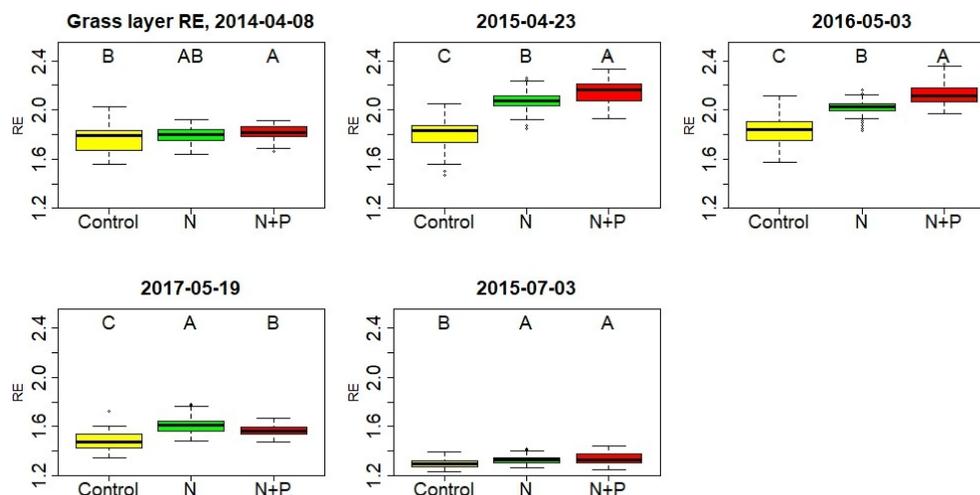


Figura 5: diagramas de cajas del índice Red Edge (RE) del sustrato de pasto herbáceo circundante a las encinas para el período de primavera pre-fertilización 2014-04-08 y post-fertilización 2015-04-23 y 2016-05-03 (arriba), inicio de senescencia (2017-05-19) y período de sequía estival (2015-07-03), abajo. Área control (amarillo), fertilizada con N (verde) y fertilizada con N+P (rojo).

## 5. Discusión

Para cuatro de los índices espectrales estudiados la respuesta espectral de los dos estratos de vegetación no es homogénea ya antes de la aplicación de la fertilización, aunque las diferencias en esta imagen inicial de 2014 son poco intensas. De la misma forma existen diferencias en la temperatura de superficie con el control en la imagen de 2014. La fertilización provoca cambios significativos en la temperatura y en la respuesta óptica, no solo en la cubierta de pasto sino también en el dosel de encina, con un patrón diferente en cada estrato de vegetación.

El descenso en la temperatura del dosel estaría relacionado con un incremento de la evapotranspiración, favorecida en primavera por una mayor producción de biomasa, las condiciones de temperatura más suaves y mayor humedad ambiental. La fertilización podría producir, en el caso del dosel de encina, un adelanto de la brotación en la copa y, por tanto, un incremento en su densidad.

Todos los índices estudiados (NDVI, GNDVI, CIre, RE, MTCI, NIRv) utilizan bandas espectrales en la región del visible, eje rojo y NIR. Cambios en estos índices, responderían tanto a alteraciones en el verdor de la copa como en la estructura y densidad del dosel vegetal. El índice NIRv, estaría relacionado con este último rasgo y la capacidad fotosintética de la copa (BADGLEY, et al., 2017).

En el caso de la cubierta de pasto, la fertilización nitrogenada provoca un despegue de los cinco índices estudiados (en la figura 5 se muestra el RE) con diferencias significativas con respecto al control, que se sostienen en las cuatro imágenes CASI posteriores. En la zona fertilizada con N+P, la diferencia significativa inicial con el control y la zona nitrogenada, se incrementa con la fertilización en todas las imágenes menos en la primavera de 2017, al inicio del período de senescencia en mayo de 2017. Los cambios en la cubierta de pasto



parecen estar relacionados con el incremento en biomasa, LAI y nutrientes cuantificados en campo (EL-MADANY et al, 2021), especialmente en los vuelos de primavera post-fertilización realizados en el momento de máximos de producción de biomasa.

En el dosel de encina, resalta la zona N+P con una respuesta óptica diferenciada de las otras dos ya antes de la fertilización con índices espectrales significativamente superiores en todas las imágenes CASI. La fertilización incrementa estas diferencias. Las encinas de la zona nitrogenada se diferencian del control más tardíamente, en las imágenes de 2016 y 2017.

Los resultados indican la capacidad de las imágenes ópticas y térmicas para detectar cambios en la vegetación, especialmente en la cubierta arbórea.

## 6. Conclusiones

Las herramientas de teledetección han permitido apreciar modificaciones en la temperatura y en la respuesta óptica del dosel de encina especialmente en la época de brotación de las copas difícilmente cuantificables mediante muestreos destructivos.

## 7. Agradecimientos

Los autores reconocen el soporte de los proyectos PID2023-151046NB-I00 (MICIU), CGL2015-69095-R and CGL-2012 34383 (MINECO) research projects; the Alexander von Humboldt Foundation con el Max-Planck Prize a Markus Reichstein, el proyecto transnacional EUFAR y el proyecto SENSensOFOREST (G-05-2023) financiado por la Unión Europea a través del proyecto FORWARDS.

## 8. Bibliografía

BADGLEY, G.; FIELD, C.B.; BERRY, J.A. 2017. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. *Science Advances*, 3, e1602244.

BOGDANOVICH, E.; PEREZ-PRIEGO, O.; EL-MADANY, T. S.; GUDERLE, M.; PACHECO-LABRADOR, J.; LEVICK, S. R.; MIGLIAVACCA, M. 2021. Using terrestrial laser scanning for characterizing tree structural parameters and their changes under different management in a Mediterranean open woodland. *Forest Ecology and Management*, 486, 118945.

BURCHARD-LEVINE, V.; NIETO, H.; RIAÑO, D.; MIGLIAVACCA, M.; EL-MADANY, T. S.; PEREZ-PRIEGO, O.; CARRARA, A.; MARTÍN, M. P. 2019. Adapting the thermal-based two-source energy balance model to estimate energy fluxes in a complex tree-Pasto ecosystem. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1-37.

BURCHARD-LEVINE, V.; NIETO, H.; RIAÑO, D.; MIGLIAVACCA, M.; EL-MADANY, T.S.; GUZINSKI, R.; CARRARA, A.; MARTÍN, M. P. 2021. The effect of pixel heterogeneity for remote sensing based retrievals of evapotranspiration in a semi-arid tree-Pasto ecosystem. *Remote Sensing of Environment* 260: 112440.

CASALS, P.; GIMENO, C.; CARRARA, A.; LOPEZ-SANGIL, L.; SANZ, M.J. 2009. Soil CO<sub>2</sub> efflux and extractable organic carbon fractions under simulated precipitation events in a Mediterranean Dehesa. *Soil Biology & Biochemistry*, 419, 1915-1922.

EL-MADANY, T.S.; REICHSTEIN, M.; CARRARA, A.; MARTÍN, M.; MORENO, G.; GONZALEZ-CASCON, R.; MIGLIAVACCA, M. 2021. How Nitrogen and Phosphorus Availability Change Water Use Efficiency in a Mediterranean Savanna Ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 1265, e2020JG006005.

EL-MADANY, T. S.; REICHSTEIN, M.; PEREZ-PRIEGO, O.; CARRARA, A.; MORENO, G.; MARTIN, M.P.; MIGLIAVACCA, M. 2018. Drivers of spatio-temporal variability of



carbon dioxide and energy fluxes in a Mediterranean savanna ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 258-278.

DASH, J. AND CURRANT, P. 2007. J., Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI). *Advances in Space Research*, 39, (1), 100-104.

de MIGUEL, E.; JIMÉNEZ, M.; PÉREZ, I.; de la CÁMARA, O.G.; MUÑOZ, F.; GÓMEZ-SÁNCHEZ, J.A. (2015). AHS and CASI processing for the REFLEX remote sensing campaign: Methods and results. *Acta Geophysica*, 63(6), 1485–1498.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; & MERZLYAK, M. N. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 583, 289-298.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; ARKEBAUER, T. J.; RUNDQUIST, D. C.; KEYDAN, G.; & LEAVITT, B. 2003. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters*, 305, n/a-n/a.

LUO, Y.; EL-MADANY, T.S.; FILIPPA, G.; MA, X.; AHRENS, B.; CARRARA, A.; MIGLIAVACCA, M. 2018. Using Near-Infrared-Enabled Digital Repeat Photography to Track Structural and Physiological Phenology in Mediterranean Tree–Pasto Ecosystems. *Remote Sensing*, 108, 1293.

LUO, Y.; EL-MADANY, T.S.; MA, X.; NAIR, R.; JUNG, M.; WEBER, U.; MIGLIAVACCA, M. 2020. Nutrients and water availability constrain the seasonality of vegetation activity in a Mediterranean ecosystem. *Global Change Biology*, 26,4379– 4400.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; & DEERING, D.W. 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS Paper presented at the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, National Aeronautics and Space Administration, Washington DC.

ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; NOLAND, T. L.; MOHAMMED, G. H.; & SAMPSON, P. H. 2001. Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 397, 1491-1507.