

Quemada, M.; Pancorbo, J.; Arencibia-Pérez, N.; Raya-Sereno, M.; Zarco-Tejada, P.; Gabriel, J. Sensores remotos para la optimización de la fertilización nitrogenada en trigo

Sensores remotos para la optimización de la fertilización nitrogenada en trigo

Quemada, Miguel¹ **Pancorbo, Jose Luis**² **Arencibia-Pérez, Nuria**³ **Raya-Sereno, María Dolores**⁴ **Zarco-Tejada, Pablo J.**⁵ **Gabriel, Jose Luis**⁶

¹ CEIGRAM, Universidad Politécnica de Madrid, España

² Institute of BioEconomy, Italian National Research Council, Italia

³ CEIGRAM, Universidad Politécnica de Madrid, España

⁴ SpecLab, CSIC, Madrid, España

⁵ IAS, CSIC, Córdoba, España

⁶ INIA, CSIC, Madrid, España

ORCID: Quemada 0000-0001-5793-2835 Pancorbo 0000-0003-1837-7589 Arencibia-Pérez 0009-0000-5021-2157 Zarco-Tejada 0000-0003-1433-6165 Gabriel 0000-0002-5508-4120

Correspondencia: miguel.quemada@upm.es joseluis.pancorbodeonate@cnr.it nuria.arencibiap@upm.es
mdolores.raya@csic.es pablo.zarco@csic.es gabriel.jose@inia.csic.es

RESUMEN

La teledetección es una herramienta valiosa para crear mapas de aplicación variable de fertilizantes que permitan mejorar la eficiencia del nitrógeno (N) y reducir el impacto ambiental de la aplicación excesiva. El objetivo de este estudio fue aplicar la teledetección para estimar el estado nutricional del cultivo y ajustar la fertilización de N a las necesidades de trigo panificable (*Triticum aestivum* L.). Se llevó a cabo un experimento en un campo de trigo con cuatro niveles de N y dos regímenes hídricos en Aranjuez (Madrid) durante 2 años. Se tomaron en campo mediciones de biomasa, concentración de N en la planta y el índice de nutrición nitrogenada (NNI) en tres etapas de crecimiento, y se registraron el rendimiento del grano y la concentración de N en la cosecha. Cerca de las fechas de las mediciones en campo, se adquirieron imágenes hiperespectrales con un sensor que cubría las regiones del visible y parte del infrarrojo cercano (400–850 nm) y otro que cubría parte del infrarrojo de onda corta (950–1750 nm) desde una aeronave que voló a 300 m sobre el experimento. También se descargaron imágenes Sentinel-2 del sitio. Se evaluaron índices de vegetación extraídos de las imágenes aéreas y satelitales para estimar el NNI. El índice de contenido de clorofila del dosel (CCCI) fue el mejor indicador del NNI (RMSE = 0,21). Los mapas de NNI obtenidos a partir de las imágenes reflejaron la distribución espacial de las necesidades de N del trigo y permitieron identificar zonas que al ser fertilizadas responden al rendimiento en encañado y a la concentración de N en grano en floración. Los resultados destacan la capacidad de las imágenes hiperespectrales y satelitales para el monitoreo de cultivos y la gestión del N y de la fertilización.

Palabras clave: Estado nutricional cultivo, Mapas aplicación fertilizante, Rendimiento, Calidad grano

Fecha de recepción: 15 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 15 febrero 2026


Sensores remotos para la optimización de la fertilización nitrogenada en trigo

Quemada, Miguel ⁽¹⁾, Pancorbo, Jose Luis ⁽²⁾, Arencibia-Pérez, Nuria ⁽¹⁾, Raya-Sereno, María Dolores ⁽³⁾, Zarco-Tejada, Pablo J. ⁽⁴⁾, Gabriel, Jose Luis ⁽⁵⁾


⁽¹⁾ CEIGRAM, Universidad Politecnica de Madrid, España.

 0000-0001-5793-2835, miguel.quemada@upm.es ;  0009-0000-5021-2157, nuria.arencibiap@upm.es.


⁽²⁾ Institute of BioEconomy, Italian National Research Council, Italia.

 0000-0003-1837-7589, joseluis.pancorbodeonate@cnr.it.


⁽³⁾ SpecLab, CSIC, España.

 0000-0000-0000-0001, mdolores.raya@csic.es.

⁽⁴⁾ IAS, CSIC, España.

 0000-0003-1433-6165, pablo.zarco@csic.es.

⁽⁵⁾ INIA, CSIC, España

 0000-0002-5508-4120, gabriel.jose@inia.csic.es.

Resumen: La teledetección es una herramienta valiosa para crear mapas de aplicación variable de fertilizantes que permitan mejorar la eficiencia del nitrógeno (N) y reducir el impacto ambiental de la aplicación excesiva. El objetivo de este estudio fue aplicar la teledetección para estimar el estado nutricional del cultivo y ajustar la fertilización de N a las necesidades de trigo panificable (*Triticum aestivum* L.). Se llevó a cabo un experimento en un campo de trigo con cuatro niveles de N y dos regímenes hídricos en Aranjuez (Madrid) durante 2 años. Se tomaron en campo mediciones de biomasa, concentración de N en la planta y el índice de nutrición nitrogenada (NNI) en tres etapas de crecimiento, y se registraron el rendimiento del grano y la concentración de N en la cosecha. Cerca de las fechas de las mediciones en campo, se adquirieron imágenes hiperespectrales con un sensor que cubría las regiones del visible y parte del infrarrojo cercano (400–850 nm) y otro que cubría parte del infrarrojo de onda corta (950–1750 nm) desde una aeronave que voló a 300 m sobre el experimento. También se descargaron imágenes Sentinel-2 del sitio. Se evaluaron índices de vegetación extraídos de las imágenes aéreas y satelitales para estimar el NNI. El índice de contenido de clorofila del dosel (CCCI) fue el mejor indicador del NNI (RMSE = 0,21). Los mapas de NNI obtenidos a partir de las imágenes reflejaron la distribución espacial de las necesidades de N del trigo y permitieron identificar zonas que al ser fertilizadas responden al rendimiento en encañado y a la concentración de N en grano en floración. Los resultados destacan la capacidad de las imágenes hiperespectrales y satelitales para el monitoreo de cultivos y la gestión del N y de la fertilización.

Palabras clave: Estado nutricional cultivo, Mapas aplicación fertilizante, Rendimiento, Calidad grano

Remote sensors for optimizing nitrogen fertilization in bread wheat

Abstract: Remote sensing is a valuable tool for creating site-specific maps to reduce the environmental impact of excessive nitrogen (N) fertilization. The aim of this study was the application of remote sensing to improve N management and harvest assessment in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). A wheat field experiment with four N levels and two water regimes was conducted in Aranjuez (Madrid) over 2 years. Ground-truth measurements of biomass, plant N concentration, and nitrogen nutrition index (NNI) were collected at three growth stages, with grain yield and N concentration recorded at harvest. Close to the dates of the ground measurements, hyperspectral imagery was acquired with a sensor covering the visible and part of the near-infrared regions (400–850 nm) and other covering part of the short-wave infrared (950–1750 nm) from an aircraft flying 300 m above the experiment. Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery of the site were downloaded. Vegetation indices extracted from the airborne imagery were tested to assess NNI. The canopy chlorophyll content index (CCCI) was the best proxy for crop N status, assessing NNI with RMSE = 0.21. The NNI maps from aerial imagery reflected the spatial distribution of wheat N requirements and enabled identification of N-responsive and nonresponsive sites for

yield at stem elongation and for grain N at flowering. The findings highlight the effectiveness of hyperspectral and multispectral imagery for crop monitoring and N-fertilizer management.

Keywords: Crop nutritional status, Fertilizer application maps, Yield, Grain quality

1. INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es un nutriente esencial para el crecimiento y la productividad de los cultivos, por lo que se aplica frecuentemente como fertilizante (Fitzgerald *et al.*, 2010). Sin embargo, la eficiencia en el uso del N es relativamente baja y solo alrededor de la mitad del fertilizante aplicado es asimilado por los cultivos. El resto se pierde al medio ambiente, causando problemas graves para la calidad del agua y del aire. Ajustar la fertilización a las necesidades del cultivo es una estrategia clave para aumentar la eficiencia del N y reducir la contaminación del agua y del aire.

El trigo ocupa el 15% de la superficie mundial de tierras cultivadas y supone el 17% del uso global de fertilizantes nitrogenados (FAOstat, 2019). Una estrategia común para mejorar la eficiencia del N en trigo es la fertilización fraccionada, aplicando un abonado de cobertura antes del encañado para asegurar el rendimiento y otro adicional en floración para aumentar el contenido de proteína del grano. La evaluación del estado nitrogenado del cultivo en estos estadios permite a los agricultores ajustar la aplicación de fertilizante N.

El índice de nutrición nitrogenada (NNI) es la herramienta de diagnóstico más reconocida para evaluar el estado de N del cultivo (Lemaire *et al.*, 2008). El NNI se calcula como la relación entre la concentración de N en los brotes aéreos y la concentración mínima de N necesaria para la acumulación máxima de biomasa. Cuando $NNI < 1$, el cultivo presenta deficiencia de N, y cuando $NNI > 1$, está sobre fertilizado. Su determinación en campo es destructiva y presenta gran variabilidad espacial por lo que existe potencial para la estimación con sensores remotos (Lemaire *et al.*, 2008).

Para ello, se han seguido dos enfoques principales. La estimación de las propiedades del cultivo (biomasa, concentración de N en brotes) mediante teledetección y su utilización posterior para calcular el NNI. Otros autores han creado modelos de regresión entre índices de vegetación (VIs) y el NNI en enfoque semi-empírico. El VI que ha mostrado mayor potencial es el índice de clorofila del dosel del cultivo (CCCI; Fitzgerald *et al.*, 2010) que podría ser útil para reflejar la variabilidad espacial del NNI en campo y obtener mapas para la aplicación variable de fertilizante.

En este trabajo nos centramos en i) explorar la capacidad de CCCI para estimar el NNI del trigo, ii) desarrollar relaciones que permitiesen obtener mapas que reflejen el estado nitrogenado del cultivo y iii) estimar el error cometido al identificar las zonas de cultivo donde se recomienda aplicar fertilizante N.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Experimento y toma de datos en campo

El ensayo se llevó a cabo en un campo de 8 ha de la finca experimental La Chimenea (Aranjuez, Madrid); ocupaba

la mitad de un campo regado con un pivote (Fig.1). El clima en la zona es frío semi-árido (BSk) según la clasificación de Köppen. El suelo está clasificado como *Haplic Calcisol*, con $pH \approx 8.1$, materia orgánica 1.8% y textura franco arcillo-limosa.

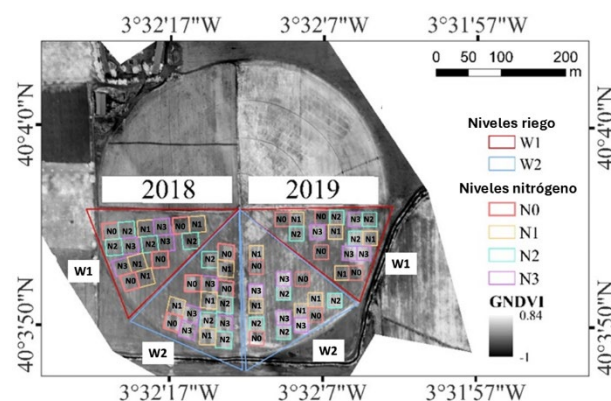


Figura 1. Localización del ensayo e índice de vegetación verde normalizado (GNDVI) en floración para las 32 parcelas distribuidas en 2 niveles de riego y 4 de nitrógeno.

En noviembre de 2017, la mitad del campo experimental se sembró con trigo de invierno (*Triticum aestivum* L.) a una densidad de siembra de 220 kg ha^{-1} y la otra mitad se sembró en 2018 (Fig. 1). Cada año, se estableció un ensayo factorial con cuatro repeticiones distribuyendo 32 parcelas ($25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$) aleatoriamente en cuatro niveles de N (N0, N1, N2 y N3, respectivamente) y dos regímenes hídricos en floración (W1 y W2). Las parcelas se marcaron con cinemática en tiempo real (RTK) a través de la Red Nacional de Estaciones de Referencia GNSS, con un receptor Topcon HiPer Pro (Topcon Singapore Holdings Pte. Ltd, Singapur) utilizando estaciones permanentes en Sonseca (Toledo) y Aranjuez (Madrid).

La fertilización con sulfato amónico nítrico se fraccionó en dos aplicaciones de cobertura: 66% en ahijado y 33% al final de encañado. Los cuatro niveles de N correspondieron a N0 (control), N1 (estrés por N), N2 (dosis recomendada) y N3 (sobrefertilizado). Los dos regímenes hídricos se establecieron al inicio de la floración regando la mitad de las parcelas (W2) con 25 mm en mayo de 2018 y 46 mm en 2019 (Fig. 1).

La respuesta del trigo a los tratamientos se determinó tomando dos muestras de biomasa aérea ($0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$) por parcela en inicio, final de encañado y floración, así como cosechando franja central ($1,4 \text{ m} \times 20 \text{ m}$) de cada parcela en julio. Las muestras de biomasa aérea y de grano se secaron y una submuestra se analizó en el laboratorio para determinar la concentración de N mediante el método de combustión Dumas (analizador LECO FP-428, St. Joseph, MI, EE. UU.). El estado de N del cultivo en cada parcela se estimó con la curva crítica de dilución propuesta por Pancorbo *et al.* (2021):

$$\%N_{critical} = 4.42 \cdot Biomass^{-0.832} \quad (1)$$

donde $\%N_{critical}$ es el mínimo $\%N$ en los brotes aéreos que produce el crecimiento máximo para un valor dado de biomasa. El NNI se calculó en las muestras como:

$$NNI = \frac{\%N}{\%N_{critical}} \quad (2)$$

Por lo tanto, valores de $NNI < 1$ muestran parcelas deficientes en N, y $NNI > 1$ sobre fertilizadas.

2.2. Adquisición imágenes aéreas y satelitales

Se capturaron imágenes hiperespectrales aéreas a 300 m sobre el experimento en encañado inicial, final y floración. En ambos años, los sensores espectrales se instalaron en una aeronave Cessna que volaba a 75 km h⁻¹ sobre el campo experimental, siguiendo el plano solar a las 11 GMT. Las campañas aéreas fueron operadas por el Laboratorio de Métodos de Investigación en Teledetección Cuantitativa del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (QuantaLab, IAS-CSIC, España). Las imágenes se adquirieron bajo condiciones de cielo despejado y un máximo de 4 días después de la recolección de biomasa. Uno de los sensores hiperespectrales (Hyperspec VNIR, Headwall Photonics, Fitchburg, MA, EE.UU.) capturó la reflectancia en las regiones visible (VIS) y NIR (400–850 nm) con una resolución espectral de 6,5 nm de ancho completo a mitad de altura (FWHM) y un campo de visión (FOV) de 50°, que proporcionó una resolución espacial de 0,2 m. El otro sensor (NIR-100, Headwall Photonics, Fitchburg, MA, EE.UU.) capturó la reflectancia en el SWIR (950–1750 nm) con 6,05 nm FWHM, un FOV de 38,6° y resolución espacial de 0,6 m. Los sensores se calibraron radiométricamente con una esfera integradora (CSTM-USS-2000C LabSphere, North Sutton, NH, EE. UU.) utilizando cuatro niveles de iluminación y seis tiempos de integración. La corrección atmosférica se realizó midiendo la irradiancia entrante simultáneamente con los vuelos y mediante simulaciones del modelo SMARTS usando datos de profundidad óptica de aerosoles y condiciones meteorológicas.

También se descargaron imágenes de Sentinel-2 en los días libres de nubes próximos a la adquisición de las muestras de biomasa del servidor de la Agencia Espacial Europea (ESA, 2022). Los productos descargados estaban corregidos atmosféricamente (Level 2A).

2.3. Extracción índices y búsqueda relaciones

De cada parcela, los datos se extrajeron de las imágenes ortorrectificadas utilizando las coordenadas RTK GNSS y dejando un margen de 2 m en todos los lados de las parcelas. Se obtuvieron espectros promedio de cada parcela de los que se calcularon el NDVI, el NDRE y el CCCI siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$NDVI = \frac{NIR-Rojo}{NIR+Rojo} \quad (3)$$

$$NDRE = \frac{NIR-Borde\ rojo}{NIR+Borde\ rojo} \quad (4)$$

$$CCCI = \frac{NDRE - NDRE_{mínimo}}{NDRE_{mínimo} + NDRE_{máximo}} \quad (5)$$

Además, para construir una representación planar con múltiples combinaciones, las imágenes aéreas se remuestrearon a 2 m para todo el campo de trigo cultivado cada año y se calculó NDVI, NDRE y CCCI.

De las imágenes satelitales se extrajeron las bandas de 10 m (NIR y Rojo) de los píxeles puros de cada parcela. Al no haber píxeles puros de las bandas de 20 m, se realizó una convolución en los espectros medios de cada parcela para obtener los valores de la banda de Borde rojo. Aplicando las Ecuaciones 3, 4 y 5 se obtuvieron los VIs de cada parcela (Pancorbo *et al.* (2023).

3. RESULTADOS

Los resultados de rendimiento y concentración de N en grano de trigo se vieron afectados por los distintos niveles de N y riego, mostrando diferentes respuestas según los años (Pancorbo *et al.*, 2023). Esto muestra el papel de los sensores que midan el estado del cultivo durante la campaña para ajustar las aplicaciones a las necesidades reales del cultivo.

El índice CCCI mostró mejor relación que NDVI y NDRE con el estado nitrogenado del cultivo. CCCI presentó una relación lineal con NNI (RMSE = 0,21; R² = 0,41), que cuando se calculó con los datos extraídos del avión fue:

$$NNI = 0,321 + 0,981\ CCCI \quad (6)$$

Esta relación para los datos extraídos de Sentinel-2 presentó una pendiente de 1,64 e intercepto de -0,01, siendo el RMSE = 0,29 y R² = 0,36. CCCI fue calculado en ambos casos con las ecuaciones de $NDRE_{max}$ y $NDRE_{min}$ obtenidas de los datos del avión (Fig. 2).

Al estudiar la relación entre otras bandas de reflectancia con las propiedades del cultivo no se observaron relaciones significativas (datos no mostrados) con algunas excepciones. Entre ellas destaca la capacidad de CCCI para estimar la biomasa y las bandas de la región en torno a 1600nm para la concentración de N en los brotes aéreos.

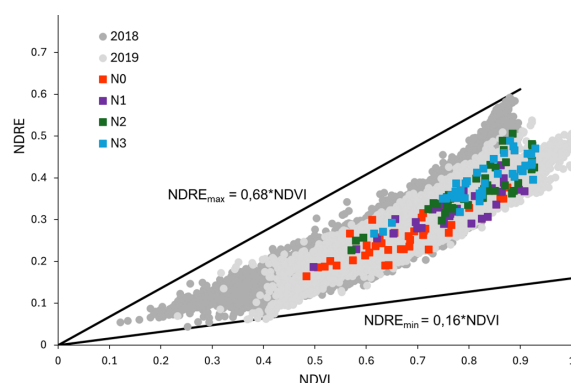


Figura 2. Representación planar de NDVI y NDRE extraídos de las imágenes aéreas de las cinco campañas. Los símbolos grises son los valores de los píxeles de 2m de todo el campo experimental. Los símbolos coloreados son el valor medio para cada parcela según los niveles de nitrógeno. Las líneas sólidas son las envolventes de todas las observaciones para el cálculo de CCCI en la Ecuación 5.

El mapa de NNI obtenido a partir de las imágenes adquiridas desde el avión refleja la variabilidad del estado nutricional del cultivo en el estadio de encañado (Fig. 3). NNI varó desde 0,1 en las áreas no fertilizadas hasta 1,22 en las sobre fertilizadas.

En este estadio y en floración el error cometido al distinguir parcelas en las que el rendimiento respondió a la aplicación de fertilizante fue del 18%, mientras que el inicio de encañado fue del 38%. El error cometido al distinguir parcelas en las que la concentración de N en grano respondió a la aplicación de fertilizante en el inicio de encañado fue del 39%, en final de encañado fue del 26% y en floración del 22%.

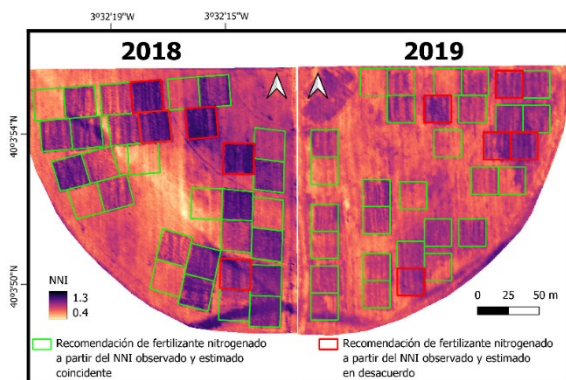


Figura 3. Mapas de índice de nutrición del cultivo (NNI) obtenidos de las imágenes hiperespectrales adquiridas desde un avión sobrevolando un campo de trigo en el estadio de final de encañado en los dos años experimentales.

4. DISCUSIÓN

Este estudio confirmó que el CCCI es un indicador fiable del índice de nutrición de nitrógeno (NNI); por lo tanto, puede utilizarse para obtener mapas que representen la variabilidad espacial del estado de N del cultivo y utilizarlos para ajustar la fertilización nitrogenada de cobertera con el fin de aumentar el rendimiento (final encañado) o la calidad del grano (floración) en trigo.

El CCCI tiene varias ventajas (Fitzgerald *et al.*, 2010). En primer lugar, su base conceptual es similar a la del índice fisiológico NNI, ya que combina en un plano el NDVI (sustituto de la biomasa) y el NDRE (sustituto de la concentración de N en los brotes). En segundo lugar, es muy común que los VIs se saturen cuando la biomasa es abundante; esto ocurre con los índices basados en el visible y el NIR (como el NDVI) y se reduce ligeramente cuando los índices incorporan la banda de borde rojo (como el NDRE). La combinación de ambos índices en una representación planar ayuda a minimizar este inconveniente. Por último, estimar el NNI a partir del CCCI puede reflejar la verdadera necesidad de N del cultivo, proporcionando una regla clara para técnicos, agricultores o herramientas de decisión. Resuelve el dilema de aplicar más fertilizante nitrogenado a las zonas menos fértiles (esquema Robin Hood) o a las zonas con mayor potencial de rendimiento (esquema del Rey).

A partir de los datos proporcionados, pueden crearse mapas de NNI que reflejan el estado de N del cultivo y así un mapa de aplicación de fertilizante (Fig. 4). Estos

pueden orientar decisiones sobre la fertilización de cobertera para mejorar el rendimiento en el encañado, y para la calidad del grano en torno a floración. Utilizar mapas de estadios más tempranos implica una alta incertidumbre en la identificación de sitios sensibles lo que puede hacerlo no viable en la práctica.

5. CONCLUSIONES

El CCCI estimó mejor el estado de N del cultivo que otros índices espectrales. Con las ecuaciones obtenidas se generaron mapas que reflejan la distribución espacial del NNI del trigo a partir de imágenes aéreas. La tasa de error en estos mapas al identificar sitios sensibles y no sensibles a la aplicación de N para aumentar el rendimiento en la fase final de encañado fue del 18%, y para aumentar la concentración de N en grano fue del 22% en floración.

6. AGRADECIMIENTOS

Proyecto (PID2021-124041OB-C21/C22) financiado por la Agencia Estatal de Investigación, Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033/).

7. REFERENCIAS

- FAO. World Fertilizer Trends and Outlook to 2019; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2016.
- Fitzgerald, G., Rodriguez, D., O'Leary, G. (2010). Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index-The canopy chlorophyll content index (CCCI). *Field Crops Res.*, 116, 318–324. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.01.010>.
- Lemaire G., M.-H. Jeuffroy, F. Gastal. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28 (4) (2008) 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.005>
- Pancorbo, J. L., Camino, C., Alonso-Ayuso, M., Raya-Sereno, M. D., Gonzalez-Fernandez, I., Gabriel, J. L., Zarco-Tejada, P. J., & Quemada, M. (2021). Simultaneous assessment of nitrogen and water status in winter wheat using hyperspectral and thermal sensors. *Eur. J. Agron.*, 127, 126287. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126287>
- Pancorbo, J. L., Alonso-Ayuso, M., Camino, C., Raya-Sereno, M. D., Zarco-Tejada, P. J., Molina, I., Gabriel, J.L., Quemada, M. (2023). Airborne hyperspectral and Sentinel imagery to quantify winter wheat traits through ensemble modeling approaches. *Precis. Agric.* 24, 1288-1311. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-09990-y>.