

Martínez, A.; Simeón, R.; Agenjos Moreno, A.; Escudero, A.; Moreno, M.; Uris, A.; Alcaraz, A.; Naranjo, M.; Rubio, C.; San Bautista, A. Monitorización de la respuesta productiva en trigo a la aplicación de abonos orgánicos mediante el uso de imágenes satelitales

# Monitorización de la respuesta productiva en trigo a la aplicación de abonos orgánicos mediante el uso de imágenes satelitales

Martínez, Ana <sup>1</sup> Simeón, Rubén <sup>1</sup> Agenjos Moreno, Alba <sup>1</sup> Escudero, Ana Isabel <sup>1</sup>  
Moreno, Marcos <sup>1</sup> Uris, Antonio <sup>2</sup> Alcaraz, Alejandro <sup>3</sup> Naranjo, Miguel Ángel <sup>3</sup>  
Rubio, Contanza <sup>2</sup> San Bautista, Alberto <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación del Regadío y Agrosistemas Mediterráneos, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España

<sup>2</sup> Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España

<sup>3</sup> Fertinagro Biotech, Teruel 44002, España.

Correspondencia: [anmarde4@etsiamn.upv.es](mailto:anmarde4@etsiamn.upv.es) [rusibro@etsiamn.upv.es](mailto:rusibro@etsiamn.upv.es) [alagmo@etsiamn.upv.es](mailto:alagmo@etsiamn.upv.es) [anesiz@etsiamn.upv.es](mailto:anesiz@etsiamn.upv.es)  
[marmolea@etsiamn.upv.es](mailto:marmolea@etsiamn.upv.es) [auris@fis.upv.es](mailto:auris@fis.upv.es) [alejandra.alcaraz@tervalis.com](mailto:alejandra.alcaraz@tervalis.com) [mnaranjo@ibmcp.upv.es](mailto:mnaranjo@ibmcp.upv.es)  
[crubiom@fis.upv.es](mailto:crubiom@fis.upv.es) [asanbau@prv.upv.es](mailto:asanbau@prv.upv.es)

## RESUMEN

El suelo es un recurso clave para la producción agrícola, cuya calidad puede verse afectada por la intensificación de las prácticas agronómicas. Una medida alternativa para mantener las propiedades del suelo y el vigor de la planta es la aplicación de abonos orgánicos y bioestimulantes. En este sentido se desarrolló un experimento para determinar la influencia de materias orgánicas aplicadas al cultivo de trigo en una parcela experimental situada en Coscurita (Soria) mediante un diseño en bloques al azar con cuatro tratamientos agronómicos (control; abono orgánico; bioestimulante; combinado). La respuesta productiva del cultivo se monitorizó mediante imágenes Sentinel-2 e índices de vegetación (NDVI, NDRE, GNDVI y RVI) para caracterizar su dinámica fenológica y vigor. Los resultados evidenciaron una marcada variabilidad espacial y una clara relación entre las zonas de mayor vigor y los mayores rendimientos de grano, confirmando el potencial de la teledetección para el análisis de la variabilidad productiva y el manejo agronómico en agricultura de precisión.

**Palabras clave:** Suelo, Trigo, Agricultura de Precisión, Índices de Vegetación, Rendimiento

Fecha de recepción: 10 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 10 febrero 2026

# Monitorización de la respuesta productiva en trigo a la aplicación de abonos orgánicos mediante el uso de imágenes satelitales

Martínez, Ana <sup>(1)</sup>, Simeón, Rubén <sup>(1)</sup>, Agenjos Moreno, Alba <sup>(1)</sup>, Escudero, Ana Isabel <sup>(1)</sup>, Moreno, Marcos <sup>(1)</sup>, Uris, Antonio <sup>(2)</sup>, Alcaraz, Alejandro <sup>(3)</sup>, Naranjo, Miguel Ángel <sup>(3)</sup>, Rubio, Contanza <sup>(2)</sup>, San Bautista, Alberto <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro de Investigación del Regadío y Agrosistemas Mediterráneos, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España.

anmarde4@etsiamn.upv.es; rusibro@etsiamn.upv.es; alagmo@etsiamn.upv.es; anesiz@etsiamn.upv.es; marmolea@etsiamn.upv.es; asanbau@prv.upv.es.

<sup>(2)</sup> Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España  
auris@fis.upv.es; crubiom@fis.upv.es

<sup>(3)</sup> Fertinagro Biotech, Teruel 44002, España.  
alejandros.alcaraz@tervalis.com; mnaranjo@ibmcp.upv.es.

<sup>(9)</sup> Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España.  
crubiom@fis.upv.es.

**Resumen:** El suelo es un recurso clave para la producción agrícola, cuya calidad puede verse afectada por la intensificación de las prácticas agronómicas. Una medida alternativa para mantener las propiedades del suelo y el vigor de la planta es la aplicación de abonos orgánicos y bioestimulantes. En este sentido se desarrolló un experimento para determinar la influencia de materias orgánicas aplicadas al cultivo de trigo en una parcela experimental situada en Coscurita (Soria) mediante un diseño en bloques al azar con cuatro tratamientos agronómicos (control; abono orgánico; bioestimulante; combinado). La respuesta productiva del cultivo se monitorizó mediante imágenes Sentinel-2 e índices de vegetación (NDVI, NDRE, GNDVI y RVI) para caracterizar su dinámica fenológica y vigor. Los resultados evidenciaron una marcada variabilidad espacial y una clara relación entre las zonas de mayor vigor y los mayores rendimientos de grano, confirmando el potencial de la teledetección para el análisis de la variabilidad productiva y el manejo agronómico en agricultura de precisión.

**Palabras clave:** Suelo, Trigo, Agricultura de Precisión, Índices de Vegetación, Rendimiento.

## ***Monitoring wheat yield response to organic fertilizer application using satellite imagery***

**Abstract:** Soil is a key resource for agricultural production, and its quality can be affected by the intensification of agronomic practices. An alternative measure to maintain soil properties and plant vigor is the application of organic fertilizers and biostimulants. In this regard, an experiment was developed to determine the influence of organic matter applied to wheat cultivation on an experimental plot located in Coscurita (Soria) using a randomized block design with four agronomic treatments (control; organic fertilizer; biostimulant; combined). The crop's productive response was monitored using Sentinel-2 images and vegetation indices (NDVI, NDRE, GNDVI, and RVI) to characterize its phenological dynamics and vigor. The results showed marked spatial variability and a clear relationship between areas of greater vigor and higher grain yields, confirming the potential of remote sensing for the analysis of productive variability and agronomic management in precision agriculture.

**Keywords:** Soil, Wheat, Precision Agriculture, Vegetation Indices, Yield

## 1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural fundamental para la vida en el planeta y se considera no renovable, lo que resalta la necesidad de su protección y conservación. Cumple funciones clave, como la filtración del agua, el

mantenimiento de la biodiversidad y el soporte de la vegetación natural y agrícola, siendo indispensable para el equilibrio ambiental y el bienestar humano. Desde el punto de vista agrario, la conservación del suelo es esencial para garantizar la seguridad alimentaria mundial, ya que cerca del 95 % de los alimentos

consumidos dependen directa o indirectamente de este recurso (FAO, 2015). Sin embargo, el crecimiento poblacional y la creciente demanda de alimentos han impulsado sistemas de producción intensivos que favorecen la degradación del suelo. Este escenario plantea uno de los principales retos actuales: incrementar la productividad agrícola sin comprometer la sostenibilidad de los agroecosistemas (Kopittke *et al.*, 2019).

Asimismo, la agricultura moderna contribuye de manera significativa a las emisiones globales de gases de efecto invernadero, especialmente a través de los cambios en el uso del suelo y la intensificación de las prácticas agrícolas (Campbell *et al.*, 2017). Estas actividades han provocado la liberación de entre 130 y 190 Pg de carbono en forma de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, intensificando el calentamiento global (Sanderman *et al.*, 2017). Prácticas como la labranza, la rotación de cultivos y la incorporación de materia orgánica contribuyen a este objetivo y favorecen una agricultura más sostenible (Dignac *et al.*, 2017). Sin embargo, las prácticas agrícolas intensivas han reducido notablemente sus reservas (Sanderman *et al.*, 2017).

Frente a ello, el uso de bioestimulantes surge como una alternativa sostenible para mejorar las propiedades del suelo y favorecer la estabilidad del carbono orgánico mediante la estimulación de la actividad microbiana (Dębska *et al.*, 2016; Mitter *et al.*, 2021). Esta estrategia resulta especialmente relevante en cultivos como el trigo, clave para la seguridad alimentaria y de gran importancia en España, donde la producción nacional es insuficiente para cubrir la demanda interna (MAPA, 2025).

El objetivo de este trabajo es monitorizar la respuesta productiva en trigo mediante los valores de reflectancia y los índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes satelitales en Sentinel 2 después de la aplicación de sustancias orgánicas al suelo y bioestimulantes a la planta.

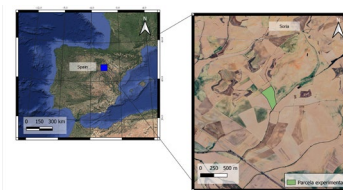
## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Diseño experimental

En el presente trabajo, se seleccionó una parcela (Fig. 1), situada en el municipio de Coscurita (Soria). Según la clasificación agroclimática de Papadakis, la zona presenta un clima mediterráneo continentalizado, de carácter templado-frío y seco, con inviernos fríos prolongados, veranos moderados y déficit hídrico estival (Papadakis, 1966). El suelo para el cultivo de trigo en la zona suele ser franco arcilloso. La parcela fue cultivada con la variedad trigo 'Marcopolo', utilizando una dosis de siembra de 200 kg/ha. La siembra se llevó a cabo el 15 de noviembre del 2024 y la recolección se efectuó el 14 de julio del 2025. La fertilización mineral del cultivo fue acorde con las recomendaciones de López-Bellido *et al.* (2000): 150 UFN, 60 UF P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 120 UF K<sub>2</sub>O. El suelo de cultivo presentó una textura franco-arenosa, el pH fue de 8,1 y la CE de 0,78 dS m<sup>-1</sup>.

La parcela tiene una superficie total de 6 hectáreas. El cultivo se estableció en un diseño experimental en

bloques (Tabla 1), donde se aplicaron los distintos tratamientos agronómicos definidos para el ensayo.



**Figura 1.** Localización de la parcela experimental en la provincia de Soria (España).

Cada bloque constituyó una unidad experimental independiente, permitiendo evaluar la variabilidad espacial y la respuesta del cultivo a escala intraparcular (Fig. 2). A lo largo del ciclo del cultivo se realizaron visitas periódicas a la parcela en fechas estratégicas, coincidentes con los principales estadios fenológicos (macollaje, floración/lleñado de grano y madurez fisiológica previa a la cosecha), con el objetivo de supervisar el estado fenológico del cultivo y validar la información obtenida mediante técnicas de teledetección.

**Tabla 1.** Descripción de los tratamientos agronómicos evaluados en el ensayo.

Tratamiento	Descripción
Control (CK)	Manejo agronómico estándar requerido por el cultivo.
Orgánico (Org)	Manejo estándar, adicionando un biofertilizante orgánico como abonado de fondo.
Bioestimulante (Bio)	Manejo estándar, suplementado con un bioestimulante microbiano aplicado en cobertera mediante aspersión foliar.
Combinado (Org+Bio)	Manejo agronómico combinando tratamiento orgánico y bioestimulante.



**Figura 2.** Distribución de los tratamientos aplicados.

### 2.2. Monitoreo mediante teledetección

El monitoreo remoto del cultivo se realizó a partir de imágenes satelitales multiespectrales obtenidas por el sensor Sentinel-2 (número total de imágenes 20), utilizando productos con corrección atmosférica (nivel L2A). A partir de estas imágenes se calcularon distintos índices espectrales de vegetación con el objetivo de caracterizar el estado fisiológico y el vigor del cultivo a lo largo del ciclo productivo.

El índice principal empleado fue el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974), ampliamente utilizado como indicador del vigor vegetal y de la densidad de biomasa fotosintéticamente activa. De manera complementaria, se calcularon otros índices

espectrales, tales como el NDRE (índice de diferencia normalizada de borde rojo) (Barnes *et al.*, 2000), el GNDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada verde) (Gitelson *et al.*, 1996) y el RVI (índice relativo de vigor) (Pearson & Miller, 1972), con el fin de contrastar la consistencia espacial de los patrones observados.

### 2.3. Evaluación del rendimiento

La productividad final del cultivo se evaluó mediante la generación de un mapa de rendimiento real, elaborado a partir del software específico instalado en la cosechadora John Deere. Estos datos fueron procesados y especializados para obtener la distribución intra-parcelaria del rendimiento de grano.

El mapa de rendimiento se utilizó como referencia para validar los patrones espaciales identificados previamente mediante los índices espectrales de vegetación y analizar la relación entre el vigor observado durante el ciclo del cultivo y la productividad final.

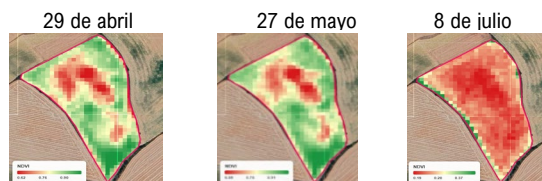
Para evaluar la influencia estadística de los tratamientos aplicados en el experimento, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor. Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, se procedió a la comparación de medias mediante la prueba de diferencia mínima significativa (LSD, *Least Significant Difference*), estableciendo un nivel de significación de  $p < 0,05$ .

El procesamiento de los datos se ha efectuado con el programa QGIS 3.10.14 y el análisis estadístico con Statgraphics Centurion XVIII.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Dinámica fenológica del cultivo a partir de NDVI

La evolución espacio-temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) permitió caracterizar la dinámica fenológica del cultivo a lo largo del ciclo productivo. Los mapas de NDVI reflejan claramente los cambios en el vigor vegetal en diferentes fechas clave de la fenología del cultivo (Fig. 3).



**Figura 3.** Evolución espacio-temporal del NDVI en la parcela de estudio durante tres momentos clave del ciclo fenológico: macollaje (29 de abril), floración/llenado de grano (27 de mayo) y madurez fisiológica (8 de julio).

En las fechas del 29 de abril y 27 de mayo, los mapas muestran una predominancia de valores elevados de NDVI, con rangos comprendidos entre 0,60 y 0,90. Estos valores indican un alto vigor vegetativo y una elevada densidad de biomasa fotosintéticamente activa, correspondientes a las etapas de macollaje y floración/llenado de grano, respectivamente. No obstante, aun en estos estadios de máximo desarrollo, se observa una marcada heterogeneidad espacial dentro

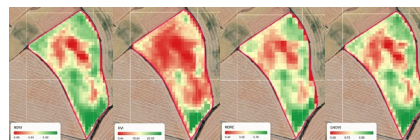
de la parcela, con sectores de menor vigor concentrados principalmente en la franja central, correspondientes a la zona control del experimento.

El mapa correspondiente al 8 de julio evidencia un cambio drástico en la respuesta espectral del cultivo. En esta fecha predominan valores bajos de NDVI, con rangos entre 0,19 y 0,37, asociados al proceso de senescencia, pérdida de clorofila y disminución de la actividad fotosintética. Esta respuesta confirma el estado de madurez fisiológica del cultivo previo a la cosecha.

### 3.2. Evaluación multispectral en el pico de vigor del cultivo

Con el objetivo de profundizar en la caracterización fisiológica del cultivo durante su máximo desarrollo vegetativo en cada uno de los tratamientos, se realizó un análisis comparativo de distintos índices espectrales a fecha 9 de mayo, en la cual se registró el mayor valor histórico de NDVI medio de la parcela.

Además del NDVI, se calcularon el NDRE, el GNDVI y el RVI, cuyos mapas se presentan de forma comparativa en la Figura 5. La evaluación visual y espacial de estos índices evidencia una elevada coherencia en los patrones identificados por los distintos algoritmos, observándose una alta correlación espacial entre ellos.

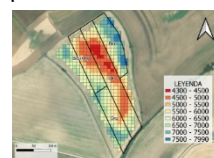


**Figura 5.** Panel comparativo de índices espectrales de vegetación (NDVI, NDRE, GNDVI y RVI) correspondientes a la fecha de máximo vigor del cultivo (9 de mayo).

Todos los índices identifican zonas de menor vigor principalmente en el sector central de la parcela (tratamiento control), así como áreas de mayor desarrollo vegetativo en los bordes. Esta consistencia confirma que la heterogeneidad espacial observada responde a diferencias estructurales reales del cultivo y la efectividad de los tratamientos (orgánico, bioestimulante y combinado).

### 3.3. Variabilidad espacial del rendimiento

El mapa de rendimiento permitió cuantificar la variabilidad intra-parcelaria de la productividad final del cultivo (Fig. 6). Los resultados evidencian una marcada heterogeneidad espacial, coherente con los patrones de vigor observados previamente mediante teledetección.



**Figura 6.** Mapa de rendimiento real de grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) obtenido a partir de los datos del monitor de cosecha. Se muestra la distribución espacial de la productividad en relación con la rejilla experimental.

Por último, el rendimiento medio del cultivo mostró diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 2). El tratamiento bioestimulante registró el mayor

rendimiento, seguido del orgánico, mientras que el tratamiento combinado mostró valores intermedios y el control los más bajos. Los índices espectrales presentaron un patrón similar: los tratamientos orgánico y bioestimulante alcanzaron los valores más altos de NDVI, RVI, GNDVI y NDRE, asociados a una mayor vigorosidad y contenido de clorofila, el tratamiento combinado mostró valores intermedios y el control los menores.

**Tabla 2.** Rendimiento medio del cultivo (kg/ha) e índices espectrales (NDVI, RVI, GNDVI y NDRE) en función del tratamiento aplicado. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según la prueba LSD ( $p < 0,05$ ) Tratamientos con al menos una letra en común no difieren significativamente. Las letras se asignaron en orden descendente (a = mayor valor).

Tratamiento	Rendimiento	NDVI	RVI	GNDVI	NDRE
CK	4892,84 <sup>c</sup>	0,69 <sup>b</sup>	0,51 <sup>b</sup>	0,69 <sup>b</sup>	5,48 <sup>b</sup>
ORG	6333,99 <sup>ab</sup>	0,83 <sup>a</sup>	0,65 <sup>a</sup>	0,79 <sup>a</sup>	7,32 <sup>b</sup>
ORG+BIO	5507,3b <sup>c</sup>	0,73 <sup>ab</sup>	0,55 <sup>b</sup>	0,72 <sup>ab</sup>	12,07 <sup>a</sup>
BIO	6487,96 <sup>a</sup>	0,79 <sup>a</sup>	0,60 <sup>ab</sup>	0,76 <sup>a</sup>	8,71 <sup>ab</sup>

#### 4. CONCLUSIÓN

El uso de la teledetección permitió describir la evolución fenológica del cultivo de trigo a lo largo de su ciclo. Los índices espectrales NDVI, NDRE, GNDVI y RVI permitieron identificar zonas con menor vigor del cultivo, correspondientes al tratamiento control, que se diferenciaron de los tratamientos orgánico, bioestimulante y combinado. La distribución espacial del rendimiento mostró una clara correspondencia con la respuesta espectral del cultivo. Destacando el tratamiento bioestimulante con mayores valores de rendimiento, mientras que el control presentó los resultados más bajos.

En conclusión, estos resultados demuestran la efectividad de los tratamientos aplicados, así como la utilidad de la teledetección como herramienta eficaz para evaluar el comportamiento del cultivo y contribuir a la toma de decisiones en sistemas de agricultura de precisión.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto BIOFER-CO2 SCPP2200C009686XV0, de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España.

#### 6. REFERENCIAS

Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J. U. L. I. O., Kostrzewski, M., ... & Moran, M. S. (2000, July). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. In Proceedings of the fifth international conference on precision agriculture, Bloomington, MN, USA (Vol. 1619, No. 6).

- Campbell, B. M., Beare, D. J., Bennett, E. M., Hall-Spencer, J. M., Ingram, J. S. I., Jaramillo, F., ... Shindell, D. (2017). Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society*, 22(4), 8. <https://doi.org/10.5751/ES-09595-220408>
- Dębska, B., Banach-Szott, M., & Szombathová, N. (2016). Impact of bio-stimulants on soil organic matter structure. *Journal of Soils and Sediments*, 16, 1407–1418. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1337-2>
- Dignac, M. F., Derrien, D., Barré, P., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., & Basile-Doelsch, I. (2017). Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 14. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2>
- FAO. (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- 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*, 58, 289–298.
- Kopittke, P. M., Dalal, R. C., Finn, D., & Menzies, N. W. (2019). Global changes in soil stocks of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur as influenced by long-term agricultural production. *Global Change Biology*, 25(11), 3576–3590. <https://doi.org/10.1111/gcb.14736>
- López-Bellido, L., López-Bellido, R. J., Castillo, J. E., & López-Bellido, F. J. (2000). Effects of tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization on wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, 92(6), 1054–1063.
- MAPA. (2025). Avances de superficies y producciones de cultivos. Campaña 2024/2025. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Mitter, E. K., Tosi, M., Obregón, D., Dunfield, K. E., & Germida, J. J. (2021). Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: Innovative biofertilizer technologies. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 606815. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606815>
- Papadakis, J. (1966). Climates of the world and their agricultural potentialities.
- Pearson, R.L.; Miller, L.D. Remote mapping of standing crop biomass for estimating the productivity of the short grass prairie. In Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ERIM), Ann Arbor, MI, USA, 2–6 October 1972; pp. 1357–1381.
- Rouse, J.W.; Hasas, R.H.; Schell, J.A.; Deerino, D.W.; Harlan, J.C. Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation. Type III. Final Report; NASA/OSFC: Oreenbello, MD, USA, 1974; p. 371.
- Sanderman, J., Hengl, T., & Fiske, G. J. (2017). Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36), 9575–9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>