

Arencibia Pérez, N.; Quemada, M.; Tarquis, A.; de Castro, A.; Ruiz, M.; San Juan, R.; Gabriel, J. Uso de sensores para estimar el potencial productivo y la fenología en genotipos de trigo

Uso de sensores para estimar el potencial productivo y la fenología en genotipos de trigo

Arencibia Pérez, Nuria¹ Quemada, Miguel¹ Tarquis, Ana M.¹ de Castro, Ana¹ Ruiz, Magdalena¹ San Juan, Raúl¹ Gabriel, José Luis¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid, España

ORCID: Arencibia Pérez 0009-0000-5021-2157 Quemada 0000-0001-5793-2835 Tarquis 0000-0003-2336-5371 de Castro 0000-0002-6699-2204 Ruiz 0000-0003-3901-703X San Juan 0009-0000-4468-2750 Gabriel 0000-0002-5508-4120

Correspondencia: nuria.arencibiap@upm.es miguel.quemada@upm.es anamaria.tarquis@upm.es ana.decastro@csic.es mruiz@inia.csic.es raul.sanjuan@inia.csic.es gabriel.jose@inia.csic.es

RESUMEN

El empleo de imágenes y sensores remotos pueden ser un apoyo importante para el fenotipado de cultivos. El objetivo de este estudio fue explorar la capacidad de medidas proximales y remotas para estimar la estimación de rendimiento y las diferencias en fenología de 57 genotipos de trigo procedentes de diversos países europeos. Para ello se seleccionaron 57 variedades de un ensayo que se llevó a cabo durante dos campañas de cultivo en Alcalá de Henares (Madrid). De cada variedad se determinaron las fechas de espigado, floración y maduración, así como el rendimiento en cosecha. Igualmente se tomaron medidas con un sensor de proximidad para calcular los índices NDVI, NDRE y CCCI así como imágenes de campo para obtener la cubierta vegetal en tres fechas. La altura del cultivo se obtuvo a partir de imágenes aéreas adquiridas con un UAV. La variable que mostró mayor capacidad para estimar el rendimiento fue la cubierta vegetal que, al incluir la altura estimada del dosel, permitió alcanzar un R^2 de 0,53 y un RMSE de 990 kg/ha. Al analizar las variedades según su origen, se observó que las mejoras más significativas correspondieron a las variedades españolas y suizas, con valores de R^2 de 0,43 y 0,53, respectivamente. En cuanto a la fecha de adquisición, la variable que mejor estimó el momento de espigado fue el índice CCCI, con un error del 47 %. Asimismo, los índices espectrales y los rasgos estructurales del cultivo aportaron información complementaria para explicar el rendimiento. Como alternativa basada en teledetección, se propone el uso de modelos texturales o geométricos del cultivo y técnicas de inteligencia artificial, que han demostrado ser eficaces en la estimación de la maduración de frutos y en la identificación de malas hierbas.


Palabras clave: sensores remotos, sensores próximos, fenotipado, rendimiento potencial, cereales.

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

Uso de sensores para estimar el potencial productivo y la fenología en genotipos de trigo

Arencibia Pérez, Nuria ⁽¹⁾, Quemada, Miguel ⁽¹⁾, Tarquis, Ana M. ⁽¹⁾, de Castro, Ana ⁽¹⁾, Ruiz, Magdalena ⁽¹⁾, San Juan, Raúl ⁽¹⁾, Gabriel, José Luis ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Politécnica de Madrid, España.

 0009-0000-5021-2157, nuria.arencibiap@upm.es ;  0000-0001-5793-2835, miguel.quemada@upm.es
 0000-0003-2336-5371, anamaria.tarquis@upm.es ;  0000-0002-6699-2204, ana.decastro@csic.es
 0000-0003-3901-703X, mruiz@inia.csic.es ;  0009-0000-4468-2750, raul.sanjuan@inia.csic.es
 0000-0002-5508-4120, gabriel.jose@inia.csic.es

Resumen: El empleo de imágenes y sensores remotos pueden ser un apoyo importante para el fenotipado de cultivos. El objetivo de este estudio fue explorar la capacidad de medidas proximales y remotas para estimar la estimación de rendimiento y las diferencias en fenología de 57 genotipos de trigo procedentes de diversos países europeos. Para ello se seleccionaron 57 variedades de un ensayo que se llevó a cabo durante dos campañas de cultivo en Alcalá de Henares (Madrid). De cada variedad se determinaron las fechas de espigado, floración y maduración, así como el rendimiento en cosecha. Igualmente se tomaron medidas con un sensor de proximidad para calcular los índices NDVI, NDRE y CCCI así como imágenes de campo para obtener la cubierta vegetal en tres fechas. La altura del cultivo se obtuvo a partir de imágenes aéreas adquiridas con un UAV. La variable que mostró mayor capacidad para estimar el rendimiento fue la cubierta vegetal que, al incluir la altura estimada del dosel, permitió alcanzar un R^2 de 0,53 y un RMSE de 990 kg/ha. Al analizar las variedades según su origen, se observó que las mejoras más significativas correspondieron a las variedades españolas y suizas, con valores de R^2 de 0,43 y 0,53, respectivamente. En cuanto a la fecha de adquisición, la variable que mejor estimó el momento de espigado fue el índice CCCI, con un error del 47 %. Asimismo, los índices espectrales y los rasgos estructurales del cultivo aportaron información complementaria para explicar el rendimiento. Como alternativa basada en teledetección, se propone el uso de modelos texturales o geométricos del cultivo y técnicas de inteligencia artificial, que han demostrado ser eficaces en la estimación de la maduración de frutos y en la identificación de malas hierbas.

Palabras clave: sensores remotos, sensores próximos, fenotipado, rendimiento potencial, cereales.

Use of sensors to estimate yield potential and phenology in wheat genotypes

Abstract: *The use of images and remote sensors can be an important aid in the phenotyping of crop genotypes. The objective of this study was to explore the ability of proximal and remote measurements to estimate the productive potential and differences in phenology of 57 wheat genotypes from various European countries. To this end, 57 varieties were selected from a trial carried out over two growing seasons in Alcalá de Henares (Madrid). For each variety, the dates of heading, flowering, and maturation were determined, as well as the harvest yield. Measurements were also taken with a proximity sensor to calculate the NDVI, NDRE, and CCCI, and digital images were taken to obtain the vegetation cover on three dates. Crop height was obtained from an aerial image acquired with a UAV. The variable that showed the greatest ability to estimate yield was vegetation cover, which, when including the estimated canopy height, achieved an R^2 of 0.53 and an RMSE of 990 kg/ha. When analyzing the varieties according to their origin, it was observed that the most significant improvements corresponded to the Spanish and Swiss varieties, with R^2 values of 0.40 and 0.58, respectively. Regarding the acquisition date, the variable that best estimated the moment of heading was the CCCI index, with an error of 47%. Likewise, spectral indices and structural traits of the crop provided complementary information to explain yield. As an alternative based on remote sensing, the use of textural or geometric models of the crop and artificial intelligence techniques is proposed, which have proven effective in estimating fruit ripeness and identifying weeds.*

Keywords: *remote sensors, proximal sensors, phenotyping, yield potential, cereals.*

1. INTRODUCCIÓN

La teledetección se ha convertido en una herramienta clave para el estudio de cultivos, al permitir la obtención rápida y no destructiva de información fenológica y fisiológica a partir de sensores remotos (Okyere *et al.*, 2024). En agronomía, esta tecnología facilita la monitorización del estado del cultivo a lo largo del ciclo, proporcionando indicadores del vigor y el estrés que complementan las medidas tradicionales de campo empleando múltiples índices de vegetación como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de vegetación normalizado de borde rojo (NDRE) que se han utilizado con éxito para caracterizar el comportamiento de diferentes genotipos de cultivo en distintas condiciones de crecimiento.

Este ensayo se centrará en la caracterización de la respuesta de varios genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) en secano para comprender su capacidad de adaptación en escenarios de estrés hídrico. Se compararán tanto *landraces*, variedades autóctonas de cada país, que han mostrado una mayor resiliencia frente a la sequía, como variedades comerciales. Los genotipos comparados provienen de varios países europeos e incluyen unos controles comunes (Checks) que permiten reflejar una variedad de respuestas diversas para el estudio y la mejora del cultivo en ambientes limitantes. Partimos de la hipótesis de que la integración de información fenológica y agronómica es esencial para identificar materiales con potencial para sistemas más resilientes.

El presente estudio tiene por objetivos explorar la capacidad de medias proximales y remotas para estimar: (1) la estimación de rendimiento de los trigos cultivados en secano basándose en medidas adquiridas durante el desarrollo del trigo y (2) las diferencias en fenología existentes entre *landraces* y variedades comerciales de trigo. Para ello, se utilizaron variables derivadas de imágenes como el NDVI, el NDRE, la cubierta vegetal y la altura del cultivo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Material Vegetal y diseño experimental

Los ensayos de campo se llevaron a cabo durante las campañas 2022-2023 (Año 1) y 2023-2024 (Año 2) en la finca experimental La Canaleja (INIA-CSIC), Alcalá de Henares, Madrid.

El ensayo incluía 290 variedades de trigo de las que se seleccionaron un total de 57 representativas entre las que se encontraban *landraces europeas* (Suiza, Chequia, Italia, Polonia y España), variedades comerciales y Checks comunes europeos. Las seleccionadas eran 8 variedades de Chequia, 10 de Suiza, 10 de España, 7 de Italia, 9 Checks y por último 13 de Polonia. El diseño utilizado fue un Alpha-lattice con plots de 3.3 x 1.2m (Fig. 1). En el Año 1 se dispuso de una repetición por tratamiento, mientras que en el Año 2 se incluyeron dos repeticiones. Todas las variedades de trigo se sembraron en noviembre (11/11/2022; 16/11/2023).

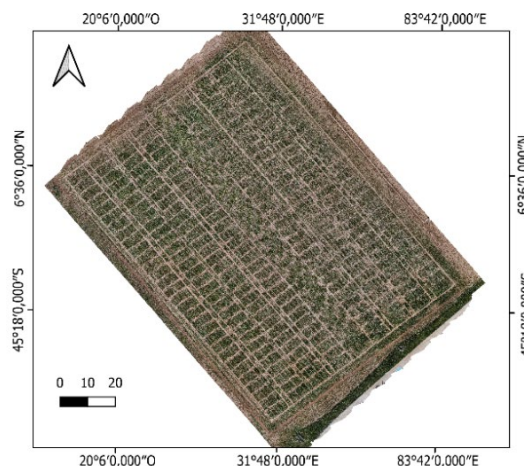


Figura 1. Ortofoto del ensayo.

2.2. Adquisición y procesamiento de datos

En cada parcela se registraron las siguientes variables agronómicas: fenología (fecha de espigado, floración y madurez) y rendimiento de grano (kg/ha) al 14% de humedad. Los datos meteorológicos fueron registrados a lo largo de todo el ciclo en ambas campañas.

En tres momentos del año (diciembre, febrero y abril) se adquirieron los índices espectrales mediante el sensor proximal RapidScan CS-45 (Holland Scientific, Lincoln, NE, EE. UU.). La metodología consistió en realizar un barrido del sensor sobre la parcela, obteniéndose una media de la medición representativa en cada fecha. Se trata de un sensor activo de radiación que permite la medición directa de reflectancias en bandas roja (670 nm), infrarroja cercana (780 nm) y borde rojo (730 nm). A partir de estas mediciones se calcularon los índices NDVI y NDRE:

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo} \quad (1)$$

$$NDRE = \frac{NIR - Borde\ rojo}{NIR + Borde\ rojo} \quad (2)$$

En estas fechas se midió la cubierta vegetal a partir de tres imágenes de campo por variedad, tomadas en la zona central de cada subparcela con el fin de evitar efectos de borde. Las imágenes nadir se adquirieron situando la cámara a 1 m por encima del dosel del cultivo para mantener una distancia de muestreo uniforme independientemente de la altura de las plantas. Estas imágenes se utilizaron posteriormente para cuantificar el porcentaje de suelo cubierto por vegetación utilizando el programa Canopeo (Patrignani *et al.*, 2015).

Las imágenes remotas fueron adquiridas con el sensor visible DJI Zenmuse acoplados a un dron DJI Matrice 300-RTK volando a 15 m de altura. Las imágenes individuales se ortomosaicaron con el programa Agisoft Metashape, siguiendo el protocolo descrito en de Castro *et al.* (2018) que consiste en tres pasos: alineado de imágenes, construcción del modelo 3D y generación de ortofotos con resolución espacial de 1,5 cm/píxel de las cuales se extrajo la altura.

2.3. Cálculo índices y búsqueda de relaciones

A partir de los índices de vegetación NDVI y NDRE, se estudió el Índice de Contenido de Clorofila del Dosel (CCCI), empleando su formulación estándar basada en la relación entre ambos índices.

$$NDRE_{\text{mínimo}} = 0.32 * NDVI \quad (3)$$

$$NDRE_{\text{máximo}} = 0.48 * NDVI \quad (4)$$

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

Para explorar la relación entre las variables ópticas medidas y el rendimiento, se generaron gráficos de dispersión y regresiones entre los índices espectrales (NDVI, NDRE y CCCI), la Cubierta y el Rendimiento de grano. Con el objetivo de evaluar la influencia de la arquitectura de la planta en estas relaciones, se ajustó un modelo lineal múltiple incorporando la altura de planta (Altura) como covariable. El modelo, implementado en RStudio, se expresó de la siguiente forma:

$$\text{Rendimiento} = \beta_0 + \beta_1 * \text{Índice} + \beta_2 * \text{Altura} + \varepsilon \quad (6)$$

Donde β_0 es el coeficiente de intercepto y β_1 y β_2 son los coeficientes de regresión asociados al índice espectral y a la altura de la planta respectivamente, y ε es el término de error.

3. RESULTADOS

3.1. Estimación de rendimiento

La fecha de adquisición de las medidas en la que se obtuvo la mejor estimación para todas las variables ópticas empleadas como indicadores fue abril. La variable que mejor estimó el rendimiento fue la cubierta vegetal estimada a partir de las imágenes digitales adquiridas en campo (Fig. 2). Incluir la altura de la cubierta estimada a partir de las imágenes aéreas mejoró la estimación del rendimiento en todas las variables, y en el caso de la cubierta permitió alcanzar un coeficiente de determinación (R^2) de 0.53 y un RMSE de 990 kg/ha (Fig. 2B).

Cuando se analizaron las variedades separadas por su origen, se observó una asociación positiva y consistente en todos los orígenes alcanzando R^2 entre 0,18 y 0,59 (Tabla 2). Al incorporar altura como covariable el ajuste mejoró en todos los casos (R^2 entre 0,22 y 0,59), aunque la ganancia de R^2 fue modesta en algunos orígenes (Checks, Italia, Chequia, Polonia) y marcada en aquellos en los que la variabilidad de la altura era elevada (España, Suiza).

En el caso de las variedades españolas, la pendiente de cubierta se redujo fuertemente de +70,41 a +15,00 ($\approx -78,7\%$), mientras que altura aportó +41 kg ha⁻¹ por cm ($\approx^{**}+410$ kg ha^{-1**} por +10 cm). Esto se debió probablemente a que el coeficiente de variación de las variedades españolas fue muy elevado (117%) frente al de los otros orígenes que fue menor (22-27%).

En las variedades suizas el R^2 se incrementó de 0,43 a 0,53 al incluir la altura. En los orígenes con mejoras más discretas como son los Checks, Italia, Chequia y Polonia la incorporación de la altura produjo aumentos pequeños en el R^2 (en todos ellos inferiores a 0,02). En este grupo,

la altura añadió efectos modestos, desde apenas +1 a +7 kg ha⁻¹ por cm, lo que confirma que su contribución estructural es limitada en comparación con otros orígenes, aunque suficiente para mejorar ligeramente el ajuste.

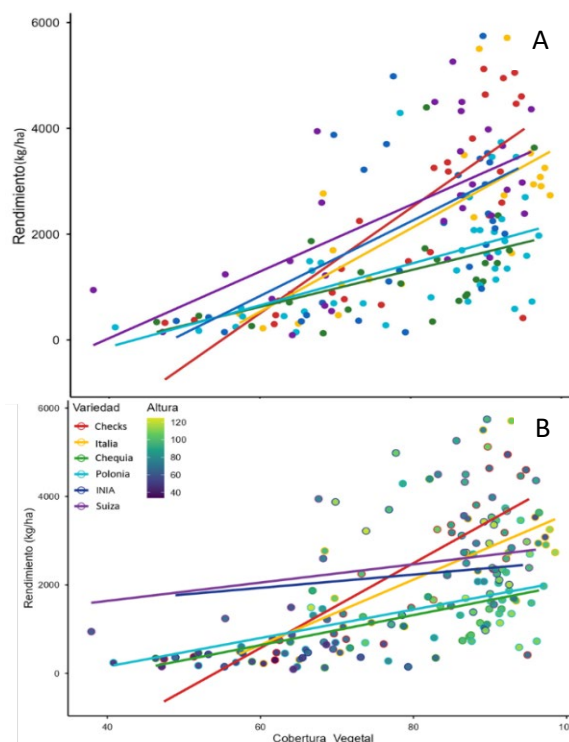


Figura 2. Relación entre el rendimiento y A) la cubierta vegetal estimada mediante imágenes digitales en abril y B) la Cubierta combinada con la altura estimada de la cubierta

Tabla 2. Valores estadísticos de la relación lineal entre Cubierta y Rendimiento para los distintos orígenes de las variedades sin aplicar y aplicando la corrección de altura

Origen	f(Cubierta)		f(Cubierta&Altura)	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Chequia	0.18	896	0.22	890
Suiza	0.43	1085	0.53	990
España	0.30	1345	0.43	1210
Italia	0.49	1067	0.51	1059
Checks	0.59	1134	0.59	1134
Polonia	0.31	831	0.32	825

3.2. Estimación del estadio fenológico

La fecha de adquisición de las medidas en la que se obtuvo la mejor estimación del estadio de espigado para todas las variables ópticas empleadas como indicadores fue abril. La variable que mejor estimó la fecha en la que se produjo el espigado fue CCCI. Los modelos múltiples que añadieron las otras variables no supusieron una gran mejora.

Se clasificaron las variedades en tres categorías: tempranas, medias y tardías. Estableciendo una Tbase (T_b) como 2°C, las variedades medias son aquellas cuyos grados días acumulados (GDA) hasta floración fue 1218±40, las tempranas < 1178 y las tardías >1258. La

T_b se determinó seleccionando el error que minimizó el error entre campañas, calculando los GDA como:

$$GDA = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b) \quad (7)$$

Siendo T_i la temperatura media diaria.

En general, el error cometido por los distintos índices para distinguir el grupo en el que se clasifican las diferentes variedades fue elevado, siendo el menor 47%, cometido por el CCCI en la fecha de abril (Fig. 3).

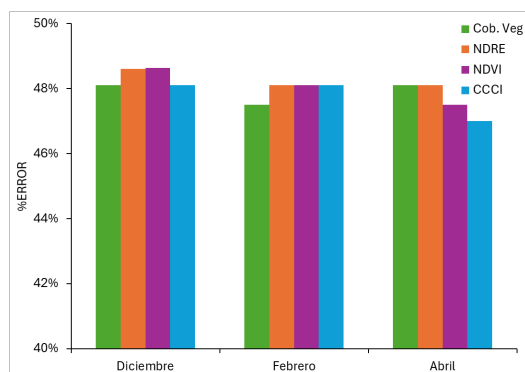


Figura 3. Error cometido por las distintas variables indicadoras en la estimación del tipo de variedad de trigo (temprana, media, tardía).

4. DISCUSIÓN

Los resultados confirman que los índices espectrales y los rasgos estructurales del cultivo aportan información complementaria para explicar el rendimiento, con variaciones según la arquitectura de los genotipos. La altura mejoró particularmente el ajuste de los modelos cuando la variabilidad de esta variable entre genotipos era elevada, en línea con trabajos que muestran que añadir variables estructurales incrementa la capacidad predictiva cuando los índices pueden saturarse o están condicionados por fenología y arquitectura del dosel (Gracia-Romero *et al.*, 2023).

Se observó variabilidad marcada entre *landraces* y variedades comerciales en rendimiento y rasgos estructurales/funcionales; algunas *landraces* mostraron mayor estabilidad fenológica, mientras que ciertos materiales comerciales alcanzaron máximos cuando presentaron una arquitectura de dosel favorable. En conjunto, y de forma consistente con otros sistemas, la combinación de la altura de la planta (derivada de LiDAR/UAV) con índices espectrales mejora la precisión y transferibilidad de los modelos frente a enfoques espectrales aislados.

La estimación del estadio fenológico fue deficiente, ya que el menor error cometido en distinguir variedades tempranas, medias y tardías por un indicador derivado de los sensores ópticos fue del 47%. La relación entre la temperatura del aire y el desarrollo de las plantas, expresada mediante el concepto de grados día, constituye un elemento central para predecir las fases fenológicas, mientras que factores como el fotoperiodo también modulan estas respuestas en muchas especies (Paredes *et al.*, 2025). Una alternativa basada en teledetección sería el empleo de modelos texturales o

geométricos del cultivo y de inteligencia artificial, como han sido empleados con éxito para estimación de maduración de frutos e identificación de malas hierbas (de Castro *et al.*, 2018).

5. CONCLUSIONES

La cubierta vegetal estimada a partir de imágenes digitales adquiridas en abril fue la variable que mejor estimó la estimación de rendimiento de los genotipos de trigo. Combinándola con la altura mejoró la estimación, particularmente cuando el conjunto de *landraces* y variedades comerciales tuvieron alturas muy diferentes, como fue el caso de las provenientes de España. La estimación del estadio fenológico basada exclusivamente en las medidas de los sensores ópticos fue deficiente. El mejor indicador fue el CCCI que logró distinguir entre variedades tempranas, medias y tardías con un 47% de error. Por ello se aconseja apoyarse en modelos basados en datos climáticos o en medidas texturales de la planta para la caracterización fenológica.

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

- de Castro, A. I., Jiménez-Brenes, F. M., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Borra-Serrano, I., & López-Granados, F. (2018). 3-D characterization of vineyards using a novel UAV imagery-based OBIA procedure for precision viticulture applications. *Remote Sensing*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/rs10040584>
- Gracia-Romero, A., Rufo, R., Gómez-Candón, D., Soriano, J. M., Bellvert, J., Yannam, V. R. R., Gulino, D., & Lopes, M. S. (2023). Improving in-season wheat yield prediction using remote sensing and additional agronomic traits as predictors. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1063983>
- Okyere, F. G., Cudjoe, D. K., Virlet, N., Castle, M., Riche, A. B., Greche, L., Mohareb, F., Simms, D., Mhada, M., & Hawkesford, M. J. (2024). Hyperspectral Imaging for Phenotyping Plant Drought Stress and Nitrogen Interactions Using Multivariate Modeling and Machine Learning Techniques in Wheat. *Remote Sensing*, 16(18). <https://doi.org/10.3390/rs16183446>
- Paredes, P., López-Urrea, R., Martínez-Romero, Á., Petry, M. T., Cameira, M. do R., Montoya, F., Almeida, W., Salman, M., & Pereira, L. S. (2025). Base and upper temperature thresholds to support the calculation of growing degree days aiming at their use with the FAO56rev crop coefficients curve: A review. In *Agricultural Water Management* (Vol. 319). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109755>