

# Mapas de Variabilidad intraparcelaria de Crecimiento (MVC) en el cultivo del almendro mediante series temporales de imágenes de satélite. Validación con vuelos UAS.

Yeray Pérez-García <sup>(1)\*</sup>, Álvaro Sánchez-Virosta <sup>(1)</sup>, David Gómez-Candón <sup>(1)</sup>, Francisco Montoya <sup>(2)</sup>, Jaime Campoy <sup>(1)</sup>, Ramón López-Urrea <sup>(3)</sup>, José González-Piqueras <sup>(1)</sup>, Alfonso Calera <sup>(1)</sup>, Juan Manuel Sánchez <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Teledetección y SIG. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Universitario s/n, 02071. Albacete, España. \*yeray.perez@uclm.es

<sup>(2)</sup> Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete, Parque Empresarial Campollano, 2ª Avda. N°61, 02007 Albacete, España.

<sup>(3)</sup> Centro de Investigación sobre Desertificación (CIDE), CSIC-UV-GVA. Carretera CV-315, km 10.7, 46113-Moncada, Valencia, España.

**Resumen:** El seguimiento y cuantificación de la variabilidad intraparcelaria en los cultivos adquiere especial relevancia en un contexto de aprovechamiento de los recursos hídricos y un manejo sostenible de las explotaciones. Los Mapas de Variabilidad de Crecimiento (MVC) obtenidos a través de series temporales de imágenes de satélite de media-alta resolución (Sentinel-2 y Landsat) han demostrado ser un instrumento eficaz para describir esta variabilidad, a escala de píxel y de parcela, en cultivos herbáceos. En este trabajo se estudia la aplicación y validación de esta metodología en el cultivo del almendro en regadío, por el aumento exponencial que ha experimentado la extensión de este cultivo leñoso en nuestro país en los últimos años. Durante dos campañas consecutivas, 2022 y 2023, se han elaborado mapas de MVC en una parcela comercial de almendros, empleando la herramienta TONIpbp, que determina píxel a píxel la transpiración acumulada. Se utiliza una serie de imágenes Sentinel 2 disponibles de la zona junto con datos meteorológicos. Para determinar la robustez y viabilidad de los MVC obtenidos como herramienta de manejo en almendro, se emplearon medidas de campo distribuidas por la parcela, y estimaciones, a través de varios vuelos con un sistema aéreo no tripulado (UAS), de variables estructurales de los árboles indicativas de su biomasa y crecimiento en campo, como la altura, fracción de cubierta vegetal y volumen de copa. Los resultados obtenidos son prometedores, permiten adquirir una mayor especialización sobre la técnica, y le otorgan fiabilidad también en cubiertas vegetales menos estudiadas, como son los cultivos leñosos.

**Palabras clave:** Sentinel-2, Manejo Agronómico, NDVI, transpiración, parámetros biofísicos.

**Growth Variability Maps (GVM) based on time series of satellite images. Validation using UAS flights.**

**Abstract:** The monitoring and quantification of within-plot variability in crops become particularly relevant in the context of water resources exploitation and sustainable management of agricultural farms. Growth Variability Maps (GVM) obtained through time series of medium to high-resolution satellite images (Sentinel-2 and Landsat) have proven to be an effective tool for describing this variability at the pixel and plot scale in herbaceous crops. Encouraged by the exponential increase in irrigated almond cultivation in our country in recent years, this study explores the application and validation of this methodology to woody crops. Over two consecutive growing seasons, 2022 and 2023, GVMs were generated for a commercial almond orchard using the TONIpbp tool, which pixel-wise determines accumulated transpiration based on Sentinel-2 images available in the area and meteorological data. To assess the robustness and viability of the obtained GVMs as a management tool in almond fruit trees, field measurements distributed across the plot and estimates from various unmanned aerial system UAS flights of structural variables indicative of tree biomass and field growth, such as height, fraction of ground cover, and canopy volume, were employed. The results obtained in this study are promising, providing a deeper understanding of the technique and ensuring reliability, also for less studied agricultural crops, such as fruit tree crops.

**Keywords:** Sentinel-2, Crop Management, NDVI, transpiration, biophysical parameters.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las prácticas de manejo dentro de una misma parcela o recinto agrícola suelen gestionarse de manera uniforme en el tiempo y en el espacio para un mismo cultivo. Sin embargo, en un contexto donde prima la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de los recursos, la caracterización de la heterogeneidad o variabilidad intraparcelaria cobra especial importancia. Esta caracterización cuantificada puede ayudar de manera significativa al ahorro y uso eficiente de recursos naturales limitados empleados en la agricultura, como son el agua u otros insumos agrícolas. Además de tener un impacto negativo sobre el medio ambiente, la aplicación de insumos en exceso puede

acarrear pérdidas económicas importantes para los productores (Gómez-Candón et al., 2012).

Un caso paradigmático en este contexto es el cultivo de almendro (*Prunus dulcis*). En España, se ha duplicado la extensión de almendro en regadío entre 2015 y 2022 (MAPA, 2022). Sin embargo, su rentabilidad depende considerablemente de los costes de producción, y resulta imperativo optimizar el manejo de este cultivo con fines tanto de reducción de costes, como de sostenibilidad ambiental, siendo éste un eje fundamental de las políticas agrarias.

Los avances tecnológicos y científicos actuales ofrecen la posibilidad de determinar con precisión diferencias intraparcelarias de crecimiento, necesidades hídricas, fertilidad del suelo, etc., lo que puede ayudar

significativamente a la toma de decisiones agronómicas de cara a un manejo más rentable, eficaz y sostenible, con especial impacto en zonas áridas y semiáridas. En el caso de la teledetección, herramientas basadas en el análisis de series temporales de imágenes multispectrales resultan especialmente útiles para describir la variabilidad espacial en la cubierta vegetal (Campos et al., 2018a). Las imágenes de satélite de los programas Landsat y, sobre todo Copernicus (Sentinel 2A y 2B), complementadas con información meteorológica y con observaciones en campo, proporcionan información única y objetiva, a una escala espacial y temporal difícilmente abarcable de otra manera.

Los Mapas de Variabilidad de Crecimiento (MVC) obtenidos a través de series temporales de imágenes de satélite de media-alta resolución han demostrado ser un eficaz instrumento para describir esta variabilidad, a escala de píxel y de parcela, en cultivos herbáceos (Campos et al., 2018a, 2018b; Campoy et al., 2023). En un trabajo reciente, Pérez-García et al., (2023) determinaron con precisión los factores limitantes del cultivo del almendro en una explotación comercial mediante el uso de MVC obtenidos durante varias campañas, demostrando que se trata de una herramienta operativa que ayuda a la toma de decisiones agronómicas. Este trabajo se centra en la validación de la capacidad de los MVC para discriminar diferencias intraparcelarias en variables de crecimiento de los árboles de almendro, a partir de medidas distribuidas tomadas en la propia parcela, así como estimaciones a muy alta resolución a través de vuelos de dron.

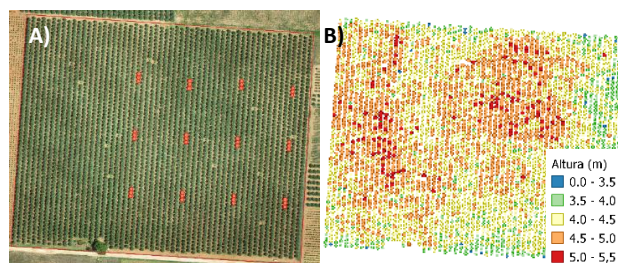
El estudio de los MVC obtenidos en campañas con cultivos previos a la plantación (2013-2017 en este trabajo) permite un análisis sobre los motivos y causas de dicha variabilidad, bien sean inherentes a la parcela o efecto del propio cultivo o manejo aplicado.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una explotación de 10,6 ha de almendros de la variedad Penta establecida en 2017, con riego por goteo, ubicada en el término municipal de Tarazona de La Mancha, Albacete (39°15'52"N, 1°56'26"O, 729msm). El marco de plantación es al tresbolillo con 6.5 m entre filas de árboles y 4.5 m entre árboles de la misma fila (Figura 1). Previamente al establecimiento de los almendros, la parcela se utilizó para cultivos extensivos.

Los valores obtenidos en los MVC de 2022 y 2023 se han validado con variables de crecimiento geolocalizadas a partir de vuelos de dron (modelo DJI Phantom 4 RTK). Se realizaron dos vuelos, uno el 21 de junio de 2022 y otro el 22 de junio de 2023. De cada uno de estos vuelos se generó un ortomosaico 3D de la parcela con precisión RTK, que mediante aero-triangulación se extrajeron las variables volumen de copa, fracción de cobertura y altura para cada uno de los árboles de la parcela.



**Figura 1.** A) Ortofoto de la parcela de almendro objeto de estudio con los árboles de medida de campo señalados en rojo. B) Mapa de altura de copa. Las imágenes fueron obtenidas mediante un dron DJI Phantom 4 RTK el 22 de junio de 2023

### 2.2. Herramienta TONIpbp

La herramienta TONIpbp (*TOol for Numerical Integration pixel by pixel*), fue desarrollada en 2016 por el Grupo de Teledetección y SIG de la UCLM. TONIpbp ha sido previamente validada en otros cultivos (Campos et al., 2018a; Campoy et al., 2023) y permite obtener mapas de variabilidad mediante el uso de series temporales de índices espectrales y datos meteorológicos. En nuestro caso, los MVC se han elaborado a partir de la determinación de la transpiración potencial diaria ( $T_p$ ), basada en la metodología FAO56 asistida por teledetección (Campos et al., 2010). De acuerdo con esta metodología, las series temporales del índice de vegetación normalizado (NDVI) se usan para obtener curvas interpoladas de coeficientes de cultivo basal ( $K_{cb}$ ), que combinados a su vez con datos diarios de evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ , mm/día), permiten determinar finalmente la transpiración potencial acumulada, de acuerdo con la ecuación (1):

$$T_{p,acum} = \int_{t_0}^t T_p \cdot dt = \int_{t_0}^t K_{cb} \cdot ET_o \cdot dt \quad (1)$$

donde,  $T_{p,acum}$  es la transpiración potencial acumulada en mm por unidad de superficie durante el período entre  $t_0$  y  $t$  en días.

En nuestro caso, los datos de  $ET_o$ , calculados con la ecuación de FAO Penman-Monteith, se obtuvieron de la estación agro-meteorológica más cercana de la red SIAR, ubicada en La Gineta (a 20 km de distancia).

Para cada píxel del satélite, la variable  $T_p$  puede variar al verse afectada por diversos factores, tanto bióticos (plagas, enfermedades, etc.) como abióticos (salinidad, fertilidad del suelo, escasez de agua, etc.). Por tanto, seguidamente se calcula la variabilidad como:

$$\text{Variabilidad} = \frac{T_{p,acum}}{\bar{T}_{p,acum}} \quad (2)$$

donde  $T_{p,acum}$  es el valor de transpiración potencial acumulada durante todo el ciclo de crecimiento de cultivo en un píxel determinado, en mm;  $\bar{T}_{p,acum}$  es el valor de transpiración potencial acumulada media de la parcela, en mm.

### 2.3. Imágenes de satélite y vuelos UAS

Se han procesado un total de 87 imágenes libres de nubes, adquiridas por los satélites Sentinel-2 con una resolución espacial de 10 m y 89 imágenes de Landsat 8 con una

resolución de 30 m, correspondientes a un total de siete campañas. Estas imágenes se han procesado y normalizado para obtener la reflectividad en superficie y calcular el NDVI, de acuerdo con Campoy et al. (2023).

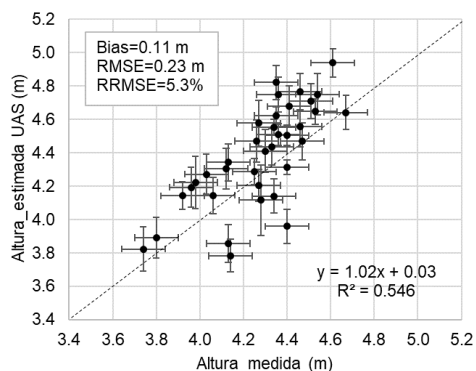
Para este trabajo se han utilizado también dos vuelos de alta resolución (<0.04m) adquiridos con un dron DJI Phantom 4 RTK, uno el 21 de junio de 2022 y otro el 22 de junio de 2023. Posteriormente se generó un ortomosaico de la parcela mediante aero-triangulación, extrayendo las variables volumen, área de copa y altura para cada uno de los árboles de la parcela. Con la información del área de la copa, se calculó la fracción de cobertura vegetal ( $F_{cv}$ ), definida como el cociente entre el área de la copa y el marco de plantación.

Para la validación se ha empleado el paquete estadístico SPSS (Version 29.0.1.0. Armonk, NY: IBM Corp) para evaluar la relación entre MVCs en diferentes campañas, así como la correlación entre las variables obtenidas a partir de los vuelos de dron con los MVCs de 2022 y 2023.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Validación vuelos dron

En la fecha de los vuelos, se realizaron transectos de medidas de alturas de forma manual sobre una selección de árboles repartidos por toda la parcela (ver Figura 1A). La Figura 2 muestra la correlación entre las estimaciones con el dron y las medidas de campo de altura. Esta baja desviación respecto a las medidas de campo (<5% de error relativo), otorga robustez a las estimaciones distribuidas a toda la parcela mediante el dron.



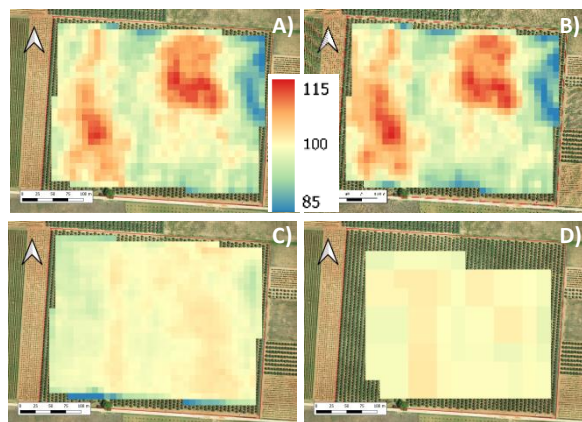
**Figura 2.** Regresión lineal entre las alturas estimadas a partir de los vuelos UAS y las medidas en campo sobre los 36 árboles seleccionados en la parcela del estudio para la fecha del 21 de junio de 2022. Las barras de error representan la desviación estándar de las medidas o estimaciones. Sobre la gráfica se han superpuesto los principales resultados estadísticos.

#### 3.2. Variabilidad intraparcelaria en las diferentes campañas

A partir de la serie de imágenes disponible se han elaborado Mapas de la Variabilidad del Crecimiento (MVC) durante un total de siete campañas: cuatro anteriores a la implantación del cultivo del almendro en 2013-2016 combinando Landsat y Sentinel-2, y dos consecutivas en los años 2022-2023, empleando

únicamente Sentinel-2 (Figura 3). Las campañas entre 2017 y 2021 se han excluido del estudio por ser árboles de porte todavía muy bajo para la aplicación de la técnica.

Como se aprecia en la Figura 3, independientemente del cultivo y campaña, los MVC son capaces de capturar las diferencias en el desarrollo de la cubierta vegetal (variabilidad) entre zonas de la misma parcela.



**Figura 3.** MVCs obtenidos en la parcela de estudio. En A) y B) se observan los MVCs obtenidos a partir de imágenes Sentinel-2 en la parcela de almendro en 2022 y 2023, respectivamente. En C) se muestra el MVC obtenido con Sentinel 2 en guisante (2016) y en D) MVC obtenido a partir de imágenes Landsat en cultivo de cebada (2013).

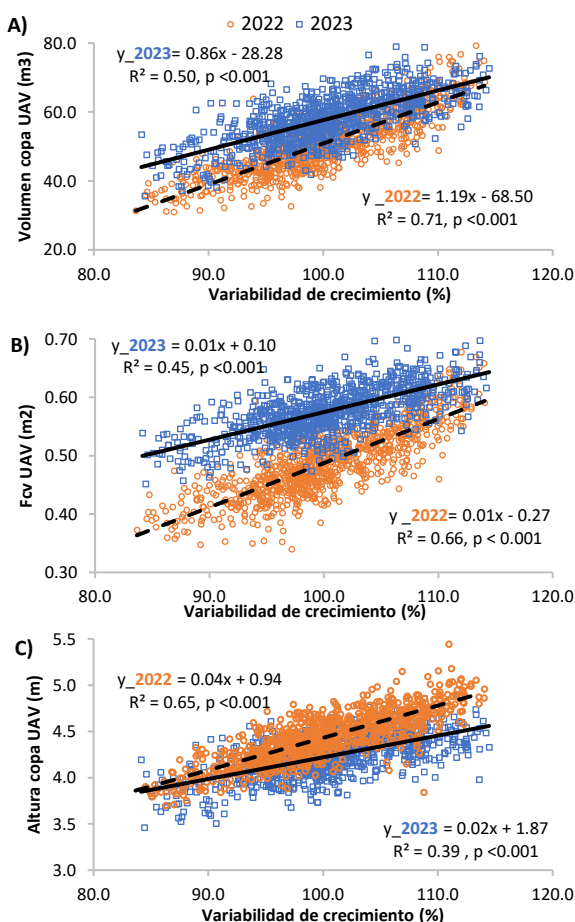
En la Figura 3 se destaca que la variabilidad fue especialmente marcada en las campañas 2022 y 2023. En estos años, y a pesar de que los almendros tenían una edad y manejo similar (ver Figura 1), podemos observar cómo en ambas campañas presentan unos valores notablemente diferentes en diferentes localizaciones del MVC. Concretamente, encontramos los valores más altos de variabilidad de transpiración potencial acumulada ( $T_p$ ), en la franja centro-oeste de la parcela y en la parte central NE (tonalidades rojizas  $T_p > 100\%$  del promedio). Por otro lado, los valores más bajos (tonalidades verdes  $T_p < 100\%$  del promedio) los encontramos en el borde este y en el centro-sur de los MVC 2023 y 2022.

Estas tendencias espaciales no son tan evidentes a nivel visual en las campañas 2016 y 2013 (Figs. 3C y 3D), sembradas con cultivos herbáceos y una  $T_p$  mucho más homogénea en toda la parcela. Estas tendencias de variabilidad espacial en  $T_p$  observadas a nivel visual fueron corroboradas con análisis de correlación entre valores unificados de MVC por pixel geolocalizado. Así, la correlación entre los MVC de 2022 y 2023 muestra un coeficiente de determinación elevado ( $R^2=0.88$ ). Por otro lado, también existe una correlación significativa entre las correlaciones de Pearson del MVC 2023 y el MVC de 2016 ( $p\_valor < 0.001$ ) y marginalmente significativa entre el de 2022 y el 2016 ( $p\_valor < 0.074$ ), aunque sea con coeficientes de determinación muy bajos ( $R^2 < 0.1$ ). Sin embargo, hay más dificultad para encontrar correlaciones significativas con los MVC generados a partir de imágenes Landsat en campañas previas con otros cultivos (2013-2016). Esto es indicativo de que, la resolución espacial de las imágenes Landsat limita de manera notable el análisis de la variabilidad espacial en

términos de MVC sobre plantaciones comerciales de almendro del tamaño de la parcela de estudio (~10 ha), en comparación con los resultados obtenidos de imágenes Sentinel-2.

### 3.3. Correlación MCV con medidas de dron

Los valores obtenidos en los MVC de 2022 y 2023 se han validado enfrentado los valores MCV con las variables de crecimiento geocalizadas obtenidas a partir de los vuelos UAS (Figura 4).



**Figura 4.** Regresión lineal entre los valores de MVC para cada píxel, y las medidas de dron para cada árbol correspondientes a: A) volumen de copa; B) fracción de cobertura y C) altura.

Todas las correlaciones obtenidas fueron positivas y significativas ( $p < 0.001$ ), con valores del coeficiente de determinación elevados, próximas a 0.70 para el año 2022. Entre las 3 variables de crecimiento analizadas, hay de destacar que las mejores correlaciones con el MVC se obtuvieron con el volumen de copa, que es la variable más relacionada con la biomasa y la que mejor relación guarda con la producción de fruto. Por tanto, estos resultados son prometedores no solo de cara al manejo del cultivo, sino también incluso a una posible predicción de cosecha.

Sin embargo, se hace necesario extender el estudio sobre una mayor escala espacio-temporal, que permita evaluar el potencial de los MVC sobre una mayor variabilidad de condiciones del cultivo del almendro en la propia parcela del experimento, y también en otras zonas geográficas.

## 4. CONCLUSIONES

En este estudio se refleja la capacidad de los MVC elaborados a partir de series temporales de imágenes Sentinel-2 para capturar la variabilidad espacial intraparcelaria en el cultivo del almendro. La buena correlación obtenida con variables de crecimiento directamente relacionadas con la acumulación de biomasa, y por tanto con la producción, hacen de los MVC una herramienta de uso de gran potencial para un manejo más eficiente y sostenible en parcelas de cultivos leñosos en general, y de almendro en particular.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado a través del Ministerio Español de Ciencia e Innovación, MICINN/AEI (Proyecto WATERSNUTS, TED2021-130405B-I00) y la Consejería de Educación, Cultura y Deportes, JCCM (proyecto PISATEL, SBPLY/21/180501/000070), junto con fondos FEDER y Next Generation EU/PRTR.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Campos, I., González-Gómez, L., Villodre, J., Calera, M., Campoy, J., Jiménez, N., Plaza, C., Sánchez-Prieto, S., Calera, A., 2018a. Mapping within-field variability in wheat yield and biomass using remote sensing vegetation indices. *Prec Agric.* 20, 214–236.
- Campos, I., González-Gómez, L., Villodre, J., González-Piqueras, J., Suyker, A.E., Calera, A., 2018b. Remote sensing based crop biomass with water or light-driven crop growth models in wheat commercial fields. *Field Crop. Res.* 216, 175–188.
- Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J.G., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manag.* 98, 45–54.
- Campoy, J., Campos, I., Villodre, J., Bodas, V., Osann, A., Calera, A., 2023. Remote Sensing-based crop yield model at field and within-field scales in wheat and barley crops. *Eur. J. Agron.* 143, 126720.
- Gómez-Candón, D., López-Granados, F., Caballero-Novella, J.J., García-Ferrer, A., Peña-Barragán, J.M., Jurado-Expósito M., García-Torres L., 2012. Sectioning remote imagery for characterization of *Avena sterilis* infestations. Part B: Efficiency and economics of control. *Prec Agric.* Vol 13 (3), 337-350.
- MAPA, 2022. Anuario de estadística, 2021. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.
- Pérez-García, Y., Campoy, J., Sánchez, J.M., González-Piqueras, J., Calera, A., 2023. Análisis de la variabilidad intraparcelaria en una explotación de almendros mediante técnicas de teledetección. *Revista Tierras.* 319, 46-52.