

Calbet, A.; García Moreno, A.; Carbonero, M.; Muñoz Gómez, M.; Andreu, A.; Cáceres Clavero, F.; González-Dugo, M.
Evaluación de imágenes de alta resolución para el seguimiento de la floración de la encina

Evaluación de imágenes de alta resolución para el seguimiento de la floración de la encina

Calbet, Ana ¹ García Moreno, Alma M. ¹ Carbonero, M. Dolores ² Muñoz Gómez, M. Jose ¹ Andreu, Ana ³ Cáceres Clavero, Francisco ⁴ González-Dugo, María P. ¹

¹ Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA Alameda del Obispo, Córdoba, España

² Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA Hinojosa del Duque, Córdoba, España

³ Dpto. de Agronomía, Unidad de Excelencia María de Maeztu (DAUCO), Universidad de Córdoba, Córdoba, España,

⁴ Dpto. Recursos Naturales y Forestales, IFAPA Alameda del Obispo, 14071, Córdoba, España

ORCID: CALBET 0000-0002-2665-4921 CARBONERO 0000-0003-2301-4301 MUÑOZ GÓMEZ 0000-0003-3444-2459
ANDREU 0000-0001-8346-5417 CÁCERES CLAVERO 0000-0002-2961-9507 GONZÁLEZ-DUGO 0000-0003-0423-8246

Correspondencia: ana.calbet@juntadeandalucia.es alma.garcia@juntadeandalucia.es
mariad.carbonero@juntadeandalucia.es maria.munoz.gomez@juntadeandalucia.es ana.andreu@uco.es
francisco.caceres@juntadeandalucia.es mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es

RESUMEN

La fenología se emplea con frecuencia como indicador del impacto del calentamiento global. En sistemas agroforestales mediterráneos como la dehesa, la floración de la encina es clave por su sensibilidad al clima y por su papel en la producción de bellotas en el aprovechamiento ganadero que sostiene económicamente el sistema. Este trabajo tiene como objetivo evaluar imágenes de alta resolución capturadas por UAV para el seguimiento y la detección de la intensidad de floración de la encina. Se aplicó un índice basado en la distancia al amarillo y se comparó con observaciones de campo en dos dehesas de Córdoba durante tres años. Los resultados mostraron patrones consistentes entre años. En vista del comportamiento observado, se contempla el desarrollo de una metodología que permita ampliar la escala espacio-temporal y, junto con el componente meteorológico, contribuya a mejorar nuestro conocimiento y capacidad predictiva sobre la producción de bellota, ayudando a propietarios y gestores en la toma de decisiones.


Palabras clave: Fenología, floración, UAVs, encina


Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 17 febrero 2026

Evaluación de imágenes de alta resolución para el seguimiento de la floración de la encina

Calbet, Ana ⁽¹⁾, García Moreno, Alma M. ⁽¹⁾, Carbonero, M. Dolores ⁽²⁾, Muñoz Gómez, M. Jose ⁽¹⁾, Andreu, Ana ⁽³⁾, Cáceres Clavero, Francisco ⁽⁴⁾, González-Dugo, María P. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA Alameda del Obispo, Córdoba, España.

 0000-0002-2665-4921, ana.calbet@juntadeandalucia.es
alma.garcia@juntadeandalucia.es.


 0000-0003-3444-2459, maria.munoz.gomez@juntadeandalucia.es

 0000-0003-0423-8246, mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es.

⁽²⁾ Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA Hinojosa del Duque, Córdoba, España.

 0000-0003-2301-4301, mariad.carbonero@juntadeandalucia.es

⁽³⁾ Dpto. de Agronomía, Unidad de Excelencia María de Maeztu (DAUCO), Universidad de Córdoba, España.

 0000-0001-8346-5417, ana.andreu@uco.es.

⁽⁴⁾ Dpto. Recursos Naturales y Forestales, IFAPA Alameda del Obispo, España.

 0000-0002-2961-9507, francisco.caceres@juntadeandalucia.es.

Resumen: La fenología se emplea con frecuencia como indicador del impacto del calentamiento global. En sistemas agroforestales mediterráneos como la dehesa, la floración de la encina es clave por su sensibilidad al clima y por su papel en la producción de bellotas en el aprovechamiento ganadero que sostiene económicamente el sistema. Este trabajo tiene como objetivo evaluar imágenes de alta resolución capturadas por UAV para el seguimiento y la detección de la intensidad de floración de la encina. Se aplicó un índice basado en la distancia al amarillo y se comparó con observaciones de campo en dos dehesas de Córdoba durante tres años. Los resultados mostraron patrones consistentes entre años. En vista del comportamiento observado, se contempla el desarrollo de una metodología que permita ampliar la escala espacio-temporal y, junto con el componente meteorológico, contribuya a mejorar nuestro conocimiento y capacidad predictiva sobre la producción de bellota, ayudando a propietarios y gestores en la toma de decisiones.

Palabras clave: Fenología, sistemas agroforestales, teledetección, UAVs

Evaluation of high-resolution imagery for monitoring the flowering of holm oak trees

Abstract: Phenology is often used as an indicator of the impact of global warming. In Mediterranean agroforestry systems, such as the dehesa, holm oak flowering is doubly relevant because of its susceptibility to climate and its importance for acorn production, which sustains the system economically. This study aims to evaluate high-resolution UAV images for monitoring and detecting the intensity of holm oak flowering. An index based on the distance to yellow was applied and compared with field observations in two dehesas of Córdoba over three years. The results showed consistent patterns between years. In light of the observed behavior, a methodology is being developed to extend the spatiotemporal scale and, together with the meteorological component, improve our understanding and predictive capacity of acorn production, thereby helping owners and managers in their decision-making.

Keywords: Phenology, agroforestry systems, remote sensing, UAVs

1. INTRODUCCIÓN

La dehesa es el sistema agrosilvopastoral más extenso de Europa, superando los 3,5 millones de hectáreas en la Península Ibérica. Incluido en la Directiva Hábitat (DOUE, 1992) como hábitat protegido, es un paisaje seminatural que permite establecer un equilibrio entre el aprovechamiento socioeconómico y el desarrollo rural, y la sostenibilidad ambiental. La especie más representativa del sistema es la encina (*Quercus ilex* subsp. *ballota*), prioritaria en el 70% de su superficie (Carbonero & Fernández-Rebollo, 2014; Díaz *et al.*, 2021). La producción de bellotas de encina tiene gran importancia ecológica y económica en este sistema, dadas sus implicaciones comerciales. Es crucial, por tanto, conocer los patrones de reproducción de bellotas para una gestión sostenible del ecosistema.

El evento fenológico más influyente en la producción final de bellotas es la floración y su éxito depende en gran medida de la intensidad de la polinización (García-Mozo *et al.*, 2012). Los estudios sobre la fenología y la producción de bellota en encina han sido escasos y aún no existe un modelo que integre todas las variables de su ciclo reproductivo. Esta falta se debe a la elevada variabilidad del sistema, influida tanto por factores inherentes al árbol como la diversidad genética, y a factores externos como el clima, el suelo y la gestión. Además, la producción es vecera y asincrónica entre individuos, lo que contribuye a la resiliencia del ecosistema frente al cambio climático, pero dificulta su caracterización, uso y planificación (Carbonero & Fernández-Rebollo, 2014).

Los modelos climáticos indican que la región mediterránea es especialmente vulnerable al calentamiento global. Estas previsiones indican un aumento de la aridez y una reducción de la productividad de los sistemas agroforestales. (Hidalgo-Triana *et al.*, 2023). En el caso de la dehesa, la disminución de la producción podría llevar al abandono de la actividad o al cambio de uso de suelo, lo que provocaría, en ambos casos, una degradación ambiental. El calentamiento global está modificando los ritmos biológicos, provocando un adelanto de las fases fenológicas debido al aumento de las temperaturas, así como un incremento del aborto de frutos debido al mayor estrés hídrico durante el verano. Estudios previos apuntan a cambios en las dinámicas fenológicas, como el aumento de episodios de floración otoñales en años de baja polinización durante la primavera, derivados de la ocurrencia de episodios meteorológicos extremos, como eventos de sequía o lluvias intensas (García-Mozo *et al.*, 2022; Díaz *et al.*, 2021).

Comprender la floración de la encina resulta, por tanto, muy relevante. Sin embargo, estimarla en campo es una tarea compleja y laboriosa y no es posible hacerlo a gran escala. El presente estudio se basa en la metodología propuesta por Gómez-Giráldez *et al.* (2021), basada en imágenes de UAV de alta resolución para la

identificación y estimación de la intensidad de floración de *Quercus ilex*. El objetivo es ampliar la escala espacio-temporal de aplicación, reforzar la robustez del índice y de la metodología aplicada. Esto, junto con avances en el conocimiento sobre la influencia de la meteorología, abriría nuevas posibilidades para mejorar la comprensión de la fenología y de la producción de encina, con el fin de mejorar la planificación y gestión sostenible de las fincas de dehesa.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se ha llevado a cabo en dos parcelas de dehesa situadas en la comarca de Los Pedroches, provincia de Córdoba (Fig. 1). La región presenta un clima mediterráneo continental, con precipitaciones moderadas (400-700 mm) irregularmente distribuidas a lo largo del año. La temperatura media anual es de 17 °C, con temperaturas invernales frecuentemente inferiores a 10 °C y veraniegas con máximos de 47 °C. Los suelos son silíceos, de textura arenosa y ricos en cuarzo, presentando una baja capacidad de retención de agua debido a su escaso contenido de arcilla.

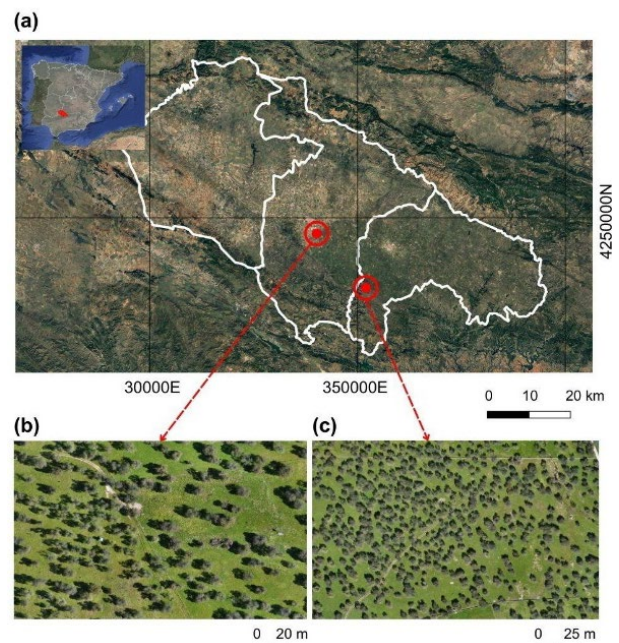


Figura 1. Localización de las parcelas de dehesa en la Península Ibérica (a). Imágenes RGB tomadas con un UAV en las dos parcelas (b) y (c).

2.2. Fuentes de datos

Durante tres años se realizaron campañas de campo y se adquirieron, simultáneamente, imágenes aéreas a bordo de UAV en primavera, coincidiendo con el pico de floración de la encina. Para la captura de imágenes se utilizó una cámara fotogramétrica S.O.D.A. (senseFLY, North Carolina, USA) montada en un UAV, con una resolución espacial de 3 cm, así como un dron DJI Mini

2 equipado con un sensor de 1/2,3" y una resolución espacial de 2 cm. Los vuelos se realizaron entre las 11:00 h y las 13:00 h, bajo condiciones climáticas favorables y con cielos despejados.

Se seleccionaron aleatoriamente entre 30 y 40 árboles por parcela. De forma simultánea a los vuelos, se llevó a cabo el registro de datos en campo, con la clasificación de cada individuo en función de la intensidad de floración (nula-baja = 1, media = 2, alta = 3). Se tomaron fotografías digitales laterales de cada individuo para su posterior valoración en gabinete.

2.3. 2.3. Estimación, validación y análisis del índice

Para el desarrollo de este trabajo se adoptó la metodología propuesta en un estudio preliminar de Gómez-Giráldez *et al.* (2021), que propone la aplicación de un índice de proximidad al amarillo puro en un espacio RGB cartesiano para determinar la intensidad de floración de la encina a partir de imágenes RGB. La flor masculina de la encina cuelga en amentos de color amarillo intenso, y la intensidad varía según el árbol. La hipótesis establece que a mayor intensidad de floración de un árbol, más amarillo aparecerá en la imagen.

Para calcular el índice de amarillo, se generaron mapas de distancia cromática hasta el amarillo puro (255, 255, 0). Para ello, cada píxel se representó en el espacio RGB (0–255) y se calculó el módulo del vector que conecta su posición con el color de referencia. Se establecieron máscaras sobre las copas de los árboles muestreados, excluyendo áreas de sombra y de alto grado de defoliación, para evitar interferencias del pasto presente bajo las copas. De cada individuo se extrajeron el valor promedio de la copa y el promedio de los valores correspondientes al primer cuartil, con el fin de analizar específicamente los píxeles más cercanos al amarillo. Esto permitió diferenciar entre la floración general y las zonas con mayor intensidad de floración.

Para el análisis estadístico, se evaluó la normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk. Cuando se cumplió el supuesto de normalidad, se aplicó un ANOVA, seguido del test de Tukey para la comparación de medias (IC = 95%; FWER = 5%). En ausencia de normalidad, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, complementada con el test de Dunn y el ajuste de Holm para el control del error.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron las relaciones entre la intensidad de floración en tres clases y el índice propuesto durante los tres años de estudio. La Figura 2 permite comparar el comportamiento del índice según la intensidad y el año. En conjunto, se observa que, a medida que aumenta la intensidad de floración, se reduce la distancia al amarillo, siendo $I_1 > I_2 > I_3$ en ambas variables analizadas a lo largo de los tres años de estudio. Esto sugiere que existe un patrón constante. Destaca el año 2024 por presentar una mayor dispersión e inestabilidad en los valores

promedio; esto podría indicar una mayor variabilidad fenológica y de las condiciones climáticas entre las parcelas.

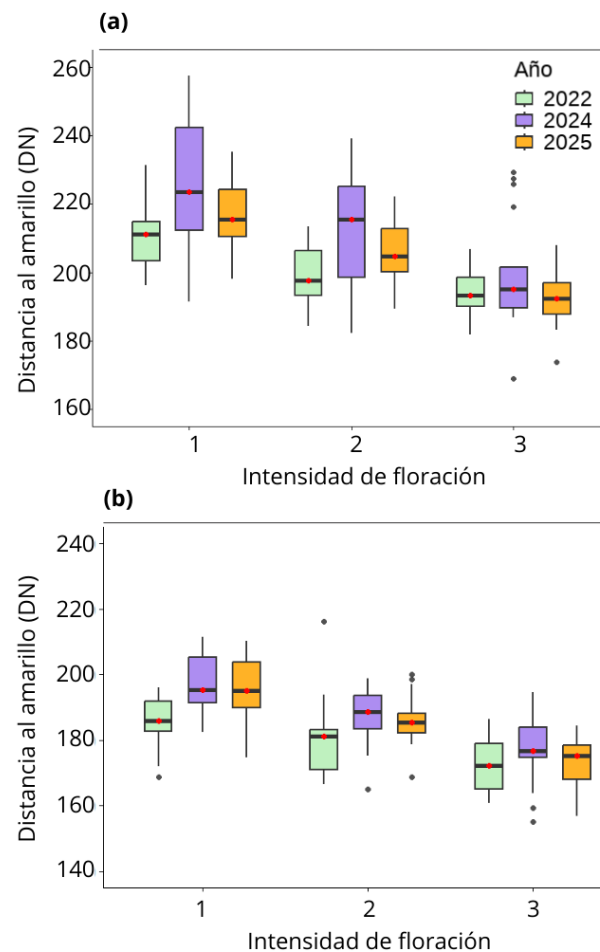


Figura 2. Valores promedio (a) y promedios de Q1 (b) de la distancia al amarillo frente a la intensidad de floración. Años 2022, 2024 y 2025.

Los análisis estadísticos mostraron que, en todos los años analizados, existieron diferencias significativas entre clases (Tabla 1). Asimismo, el análisis de comparaciones dos a dos indicó diferencias significativas entre cada par de clases en prácticamente todos los casos, excepto en los valores promedio de 2022 entre las clases 2-3, en los valores promedio de Q1 de 2022 entre las clases 1-2, y en 2024 en los promedios de las clases contiguas 1-2 y 2-3. Los resultados muestran comparativa entre el análisis de valores medios y de valores de Q1 indica que el estudio de valores más bajos de la distribución resulta más adecuado para evaluar el efecto de la intensidad de floración, ya que presenta un mayor grado de diferenciación entre clases dos a dos en los tres años de estudio.

Tabla 1. Resultados de pruebas estadísticas (Shapiro, ANOVA/Kruskal-Wallis) y comparaciones post-hoc (Tukey/Dunn) de valores promedio (a) y valores promedio de Q1 (b).

a)			
Año	Shapiro	ANOVA	Tukey
2022	0.575	4.4e-7***	2-1: 1.3e-4; 3-1: 7e-7; 3-2: 0.108
2024	0.234	1.95e-3***	2-1: 0.057; 3-1: 1.14e-4; 3-2: 0.058
2025	0.552	2.65e-13***	2-1: 5.23e-5; 3-1: 0.0; 3-2: 3.60e-6

b)			
Año	Shapiro	ANOVA	Tukey
2022	0.129	1.03e-6***	2-1: 1.96e-3; 3-1: 7e-7; 3-2: 0.019
2024	0.019	2,18e-2	2-1: 2.32e-2; 3-1: 1.11e-5; 3-2: 1.94e-2
2025	0.141	5.03e-11***	2-1: 1.16e-3; 3-1: 0.0; 3-2: 1.48e-5

En definitiva, la tendencia observada en los diagramas es respaldada por los resultados del análisis estadístico. En ambos casos, se aprecian diferencias estables entre años, donde la distancia de amarillo varía en función de la intensidad de floración, lo que refleja una diferencia progresiva entre clases.

4. CONCLUSIONES

En conjunto, los resultados ponen de manifiesto que la intensidad de floración influye de manera consistente en la variación del índice de distancia al amarillo, afectando tanto a los valores centrales como a los mínimos representativos, y que este efecto se mantiene a lo largo del tiempo, aunque modulado por la variabilidad interanual. Estos hallazgos resaltan la utilidad de combinar información derivada de vuelos de dron con datos de campo para caracterizar patrones ecológicos complejos en sistemas de dehesa y sientan las bases para futuros estudios.

Es preciso señalar que no se pudieron establecer umbrales definidos de intensidad de floración que permitieran realizar comparaciones interanuales, debido a que las imágenes no fueron calibradas de forma homogénea. Esto se debe al uso de distintos sensores y a la ausencia de paneles de calibración, lo que implica que los valores de color registrados no son directamente comparables entre años, al estar influenciados por diferencias en la respuesta espectral, las condiciones de iluminación y el procesamiento interno de cada dispositivo. En consecuencia, el análisis se realizó a partir de valores digitales. En este sentido, será necesario avanzar hacia el uso de valores de reflectancia y la estandarización de los procedimientos metodológicos.

Se está estudiando la posibilidad de ampliar la escala espacio-temporal, con la adquisición de imágenes satelitales que permitan incrementar la frecuencia de las fuentes de datos para mejorar la continuidad y

consistencia de la información. De tal forma que se pueda aportar grandes paquetes de información simultáneamente a un gran número de técnicos y propietarios, con la previsión de facilitar la gestión. Este avance, junto con el estudio de la influencia de la meteorología en la fenología de la encina, podría abrir la puerta a la creación de indicadores que estimen la producción anual de bellota.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PP.AVA23.INV202301.030, PR.TRA23.TRA2023.002 y PR.TRA23.TRA2023.009 (O.P. Andalucía 2021-2027, 80% cofinanciado por FEDER) y por el proyecto EU Horizon Europe DRYAD (nº 101156076). La investigación realizada por A. Calbet ha sido posible gracias al contrato que forma parte de la ayuda PRE2022-105210, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

6. REFERENCIAS

- Carbonero, M. D., & Fernández-Rebollo, P. (2014). Dehesas de encinas: Influencia de la meteorología en la producción de bellotas. *Ecosistemas*, 23(2), 55–63. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-2.08>
- Díaz M, Sánchez-Mejía T, Morán-López T (2021) Long-Term Tree Regeneration of Fragmented Agroforestry Systems Under Varying Climatic Conditions. *Front. Ecol. Evol.* 9:640143. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.640143>
- DOUE-L-1992-81200 1992. Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. (s/f).
- García-Mozo, H., Domínguez-Vilches, E., & Galán, C. (2012). A model to account for variations in holm-oak (*Quercus ilex* subsp. *ballota*) acorn production in southern Spain. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 19(3), 403–408
- Díaz, M., Sánchez-Mejía, T., & Morán-López, T. (2021). Long-term tree regeneration of fragmented agroforestry systems under varying climatic conditions. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 640143. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.640143>
- Hidalgo-Triana, N., Solakis, A., Casimiro-Soriguer, F., Choe, H., Navarro, T., Pérez-Latorre, A. V., & Thorne, J. H. (2023). The high climate vulnerability of western Mediterranean forests. *Science of the Total Environment*, 895, 164983. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164983>
- Gómez-Giráldez, P. J., Carbonero, M. D., Carpintero, E., & González-Dugo, M. P. (2021). Estimation of holm oak flowering intensity in dehesa farms using high-resolution aerial images. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXIII* (Proceedings of SPIE, Vol. 11856, 1185616). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2601186>