

Muñoz-Gómez, M.; carbonero, M.; Calbet, A.; Garcia-Moreno, A.; Villanueva, A.; González-Dugo, M. Seguimiento de servicios ecosistémicos en agrosistemas mediterráneos integrando teledetección

Seguimiento de servicios ecosistémicos en agrosistemas mediterráneos integrando teledetección

Muñoz-Gómez, M.José ¹ carbonero, M.Dolores ¹ Calbet, Ana ¹ Garcia-Moreno, Alma M. ¹ Villanueva, Anastasio J. ² González-Dugo, M.Pat. ¹

¹ Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA, 14071 (Córdoba)

² Dpto. Economía de la Cadena Alimentaria, IFAPA, 18071 (Granada)

ORCID: Muñoz-Gómez 0000-0003-3444-2459 carbonero 0000-0003-2301-4301 Calbet 0000-0002-2665-4921 Villanueva 0000-0002-1384-8372 González-Dugo 0000-0003-0423-8246

Correspondencia: maria.munoz.gomez@juntadeandalucia.es mariad.carbonero@juntadeandalucia.es
ana.calbet@juntadeandalucia.es alma.garcia@juntadeandalucia.es anastasioj.villanueva@juntadeandalucia.es
mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es

RESUMEN

Los agrosistemas mediterráneos proporcionan múltiples servicios ecosistémicos cuya valoración en las políticas agrarias requiere indicadores operativos y escalables. Este trabajo analiza las sinergias entre varios servicios ecosistémicos en el olivar tradicional y la dehesa del sur de España, mediante mediciones de campo, modelado y sensores remotos. Empleando la producción de biomasa, estimada a partir de información meteorológica y datos de Sentinel-2, como variable de referencia, se han analizado las relaciones espaciotemporales con la biodiversidad de aves y reptiles, el carbono orgánico del suelo, la protección frente a la erosión y la valoración del paisaje. Los resultados muestran asociaciones consistentes en el olivar, mientras que en la dehesa dichas relaciones están moduladas por la mayor complejidad estructural del ecosistema. En términos generales, se ha contrastado la eficacia de la producción de biomasa herbácea, medible mediante sensores remotos, como indicador integrador y operativo para el seguimiento de varios servicios ecosistémicos en paisajes agrarios mediterráneos.


Palabras clave: *servicios ecosistémicos, agrosistemas mediterráneos, teledetección, políticas agrarias*


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


Seguimiento de servicios ecosistémicos en agrosistemas mediterráneos integrando teledetección

Muñoz-Gómez, M.José ⁽¹⁾, carbonero, M.Dolores ⁽¹⁾, Calbet, Ana ⁽¹⁾, Garcia-Moreno, Alma M. ⁽¹⁾, Villanueva, Anastasio J. ⁽²⁾, González-Dugo, M.Pat. ⁽¹⁾


⁽¹⁾ Dpto. Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, IFAPA (Córdoba).

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


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

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

alma.garcia@juntadeandalucia.es

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

⁽²⁾ Dpto. Economía de la Cadena Alimentaria, IFAPA (Granada).

 0000-0002-1384-8372, anastasioj.villanueva@juntadeandalucia.es

Resumen: Los agrosistemas mediterráneos proporcionan múltiples servicios ecosistémicos cuya valoración en las políticas agrarias requiere indicadores operativos y escalables. Este trabajo analiza las sinergias entre varios servicios ecosistémicos en el olivar tradicional y la dehesa del sur de España, mediante mediciones de campo, modelado y sensores remotos. Empleando la producción de biomasa, estimada a partir de información meteorológica y datos de Sentinel-2, como variable de referencia, se han analizado las relaciones espaciotemporales con la biodiversidad de aves y reptiles, el carbono orgánico del suelo, la protección frente a la erosión y la valoración del paisaje. Los resultados muestran asociaciones consistentes en el olivar, mientras que en la dehesa dichas relaciones están moduladas por la mayor complejidad estructural del ecosistema. En términos generales, se ha contrastado la eficacia de la producción de biomasa herbácea, medible mediante sensores remotos, como indicador integrador y operativo para el seguimiento de varios servicios ecosistémicos en paisajes agrarios mediterráneos.

Palabras clave: servicios ecosistémicos, agrosistemas mediterráneos, teledetección, políticas agrarias

Monitoring ecosystem services in Mediterranean agroecosystems through remote sensing integration

Abstract: *Mediterranean agroecosystems provide multiple ecosystem services, the integration of which into agricultural policies requires operational and scalable indicators. This study analyzes the synergies among ecosystem services in traditional olive groves and dehesas in southern Spain, using field measurements and remote-sensing data. Biomass production, estimated from meteorological and Sentinel-2 data, was used as a reference variable to analyze the spatiotemporal relationships with bird and reptile biodiversity, soil organic carbon, erosion protection, and landscape valuation. The results show consistent associations in olive groves, whereas in the dehesa, these relationships are modulated by the ecosystem's greater structural complexity. Overall, the effectiveness of herbaceous biomass production, as measured by remote sensing, has been assessed as an integrative and operational indicator for monitoring various ecosystem services in Mediterranean agricultural landscapes.*

Keywords: *ecosystem services, Mediterranean agroecosystems, remote sensing, agricultural policies*

1. INTRODUCCIÓN

La provisión de servicios ecosistémicos (SE) por los agrosistemas es un objetivo central de las políticas agrarias europeas, en las que la producción de alimentos debe compatibilizarse con la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático. Este enfoque se refleja en la Política Agraria Común (PAC), que ha incorporado objetivos de sostenibilidad mediante los esquemas agroambientales. Sin embargo, su aplicación tradicional, basada en el control de prácticas

genéricas de manejo, ha mostrado una eficacia limitada, debido a su escasa adaptación a los contextos locales y a la débil relación entre las acciones aplicadas y los resultados ambientales obtenidos. En respuesta a estas limitaciones, los esquemas agroambientales basados en el seguimiento de resultados han cobrado relevancia al vincular los pagos directamente con la provisión de SE, lo que ofrece mayor flexibilidad a los agricultores. No obstante, su aplicación requiere indicadores que permitan cuantificar y monitorizar los SE de forma

objetiva, a gran escala y a coste eficiente en agrosistemas heterogéneos.

En este contexto, la teledetección satelital se ha consolidado como una herramienta clave para el seguimiento de variables biofísicas relacionadas con el funcionamiento de los ecosistemas agrarios. Entre ellas, la biomasa herbácea o producción primaria neta aérea destaca por su estrecha relación con la productividad, el secuestro de carbono, la protección del suelo y la disponibilidad de hábitats, lo que le confiere un elevado potencial como indicador integrador de múltiples SE.

Este estudio se centra en dos agrosistemas mediterráneos de alto valor natural del sur de España, el olivar tradicional y la dehesa, caracterizados por una estructura agroforestal y una cubierta herbácea estacional. Ambos sistemas presentan una elevada multifuncionalidad, pero difieren en su complejidad estructural y en la respuesta de los SE al manejo, lo que los convierte en un marco idóneo para analizar sinergias entre diversos servicios ecosistémicos y las opciones para su seguimiento. El objetivo de este trabajo es analizar estas sinergias en olivares y dehesa mediterráneos a partir de estimaciones de biomasa herbácea obtenidas mediante teledetección, integrando información sobre biodiversidad, carbono orgánico del suelo, protección frente a la erosión y valoración del paisaje, y evaluar su potencial como indicador operativo para esquemas agroambientales basados en resultados.

2. METODOLOGÍA

2.1. Zona de estudio

El estudio se ha desarrollado en el norte de la provincia de Córdoba, en áreas representativas de olivar tradicional en pendiente y dehesa (Fig. 1a), seleccionadas para cubrir un gradiente de condiciones ambientales y de manejo, durante el periodo comprendido entre 2021 y 2023. En total, se estudiaron seis fincas de cada sistema. En el caso del olivar, las fincas presentaron una superficie media de 16 ha (9-27 ha), mientras que en dehesa fue de 118 ha (22-258 ha). Todas ellas están caracterizadas por una estructura de árboles dispersos, en algunos casos acompañados de matorral de escaso porte, y por una cubierta herbácea estacional. En dehesa, las fincas se agruparon en grupos de manejo (1, 2 y 3, dos fincas por grupo), de mayor a menor grado de intensificación, mientras que en olivar se diferenciaron parcelas con y sin cubierta herbácea.

2.2. Estimación de biomasa mediante teledetección

La biomasa herbácea se estimó a partir de datos del satélite Sentinel-2 mediante un modelo basado en la eficiencia de uso de la luz (LUE), originalmente propuesto por Monteith (1977) para cultivos agrícolas. Este modelo permite estimar la producción primaria neta aérea (AGB above-ground biomass) a partir de la radiación absorbida por la vegetación y de variables meteorológicas, integrando la contribución del estrato herbáceo y minimizando la interferencia del arbolado (previamente adaptado a zonas mediterráneas de olivar y dehesa). El análisis cubrió el periodo del 01/09/2020 al 31/08/2023, en el que se emplearon 420 imágenes

Sentinel-2 MSI Nivel-2A de la colección S2_HR_HARMONIZED, distribuidas en dos escenas. Los detalles completos sobre la aplicación, calibración y validación del modelo pueden consultarse en trabajos previos (Gómez-Giráldez *et al.*, 2019; Blázquez-Carrasco *et al.*, 2021; Muñoz-Gómez *et al.*, 2024).

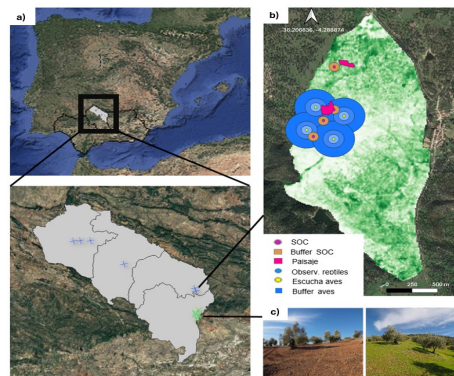


Figura 1. a) Localización de las parcelas de olivar (verde) y dehesa (azul); b) Distribución de las medidas realizadas en una finca piloto de dehesa; c) Ejemplo de olivares con diferentes manejos, con y sin mantenimiento de la cubierta herbácea.

2.3. Servicios ecosistémicos analizados

Las medidas de campo realizadas incluyeron variables relacionadas con la biodiversidad, la producción de biomasa, el carbono orgánico del suelo (SOC) y el paisaje. Metodología descrita en el libro de actas del XX Congreso de la Asociación Española de Teledetección (González-Dugo *et al.*, 2024). A continuación, se presenta un breve resumen: **Producción de biomasa**, considerada un servicio de aprovisionamiento y estimada mediante teledetección a partir de la producción primaria neta aérea del estrato herbáceo. **Biodiversidad**, evaluada a partir de aves y reptiles como grupos indicadores, debido a su sensibilidad a los cambios en la estructura del hábitat y al manejo de la cubierta herbácea. **Carbono orgánico del suelo (SOC)**, determinado mediante muestreos de suelo a distintas profundidades, como indicador del potencial de secuestro de carbono asociado a la entrada de biomasa en el sistema. **Protección del suelo**, evaluada a partir de la presencia y continuidad de la cubierta herbácea mediante teledetección, considerando su efecto en la reducción del riesgo de erosión. **Paisaje**, analizado mediante encuestas a la población general basadas en fotografías representativas de los sistemas estudiados, con el fin de capturar la valoración social asociada a diferentes niveles de cobertura vegetal (Win *et al.*, 2025).

2.4. Análisis de sinergias

La relación entre la biomasa herbácea estimada por teledetección y los distintos servicios ecosistémicos evaluados en campo se analizó mediante un enfoque de correspondencia espacial entre las mediciones de cada indicador y las estimaciones satelitales. Dado que los servicios ecosistémicos operan a distintas escalas espaciales, la biomasa se agregó en zonas de influencia definidas en torno a las unidades de muestreo (Fig. 1b). Para el carbono orgánico en suelo (SOC), la biomasa se

promedió en un *buffer* de 50 m alrededor de los puntos de muestreo. En el caso de los reptiles, también se utilizó un *buffer* de 50 m que cubría el área efectiva de los transectos de muestreo y para las aves *buffers* de hasta 200 m en torno a los puntos de escucha. En el caso del paisaje, la biomasa se analizó en la zona de influencia del encuadre de las fotografías utilizadas en las encuestas de valoración social.

2.5 Análisis socioeconómico

Con el fin de integrar una perspectiva socioeconómica, se realizaron encuestas a gestores agrarios para analizar la aceptación de distintos esquemas agroambientales y de indicadores basados en resultados. El análisis se centró en comparar la preferencia por enfoques basados en prácticas y en resultados (Granado-Díaz *et al.*, 2024; Villanueva *et al.*, 2024), así como en la percepción del riesgo asociada a diferentes objetivos ambientales y al uso de la monitorización por teledetección. Esta información se integró con los resultados biofísicos para evaluar la viabilidad operativa del indicador propuesto.

3. RESULTADOS

La biomasa herbácea estimada mediante teledetección permitió identificar contrastes en los estados funcionales de los agrosistemas estudiados. En el olivar tradicional, la presencia de cubierta herbácea generó diferencias claras en la biomasa acumulada durante los periodos productivos, con valores superiores a 500 kg ha⁻¹ en invierno-primavera, frente a valores muy reducidos en los sin cubierta. En la dehesa, la biomasa mostró una elevada variabilidad estacional, con máximos primaverales de 850-1000 kg ha⁻¹ y mínimos durante el verano e invierno, sin generar estados funcionales tan claramente segregados entre los grupos de manejo de diferentes intensidades.

Las relaciones entre biomasa y biodiversidad mostraron patrones que variaron según el tipo de sistema. En el olivar, los valores de biomasa acumulados en las ventanas temporales asociadas a los muestreos se correlacionaron de manera consistente con la abundancia de aves y la actividad de reptiles, lo que configura un dominio funcional de alta biomasa y biodiversidad. En la dehesa, estas relaciones fueron más débiles a escala mensual y solo emergieron al comparar los valores medios anuales de biomasa, lo que indica que la productividad herbácea modula la biodiversidad, pero no actúa como su principal determinante en sistemas estructuralmente complejos.

La relación entre la biomasa y el carbono orgánico del suelo (SOC) se analizó a partir de la biomasa anual acumulada. En el olivar, los sistemas con cubierta herbácea presentaron valores más altos de biomasa anual y de stocks de SOC (32.98 frente a 20.23 Mg ha⁻¹ en 0–30 cm), como se observa en la Figura 2, lo que refleja una conexión directa entre la producción herbácea sostenida y la acumulación de carbono en el suelo. En la dehesa, esta relación fue menos directa, observándose valores elevados de SOC incluso en situaciones de menor biomasa anual, lo que pone de manifiesto el papel dominante del arbolado y de los procesos de acumulación a largo plazo.

En cuanto a los servicios de regulación y culturales, la biomasa herbácea presente durante los periodos críticos de erosión se asoció con mejoras simultáneas en la protección del suelo y en la valoración del paisaje, especialmente en el olivar. Los sistemas con mayor biomasa invernal presentaron valores del factor C de la USLE claramente inferiores (0.48 frente a 0.63), lo que implica una reducción del riesgo de erosión cercana al 30 % (Fig. 3), y fueron sistemáticamente mejor valorados en las encuestas de paisaje, coincidiendo con una biomasa acumulada de 500–600 kg ha⁻¹ en el momento de las fotografías. En la dehesa, la percepción del paisaje estuvo más ligada a la combinación de biomasa moderada y cobertura arbórea permanente que a la productividad herbácea aislada (Fig. 3).

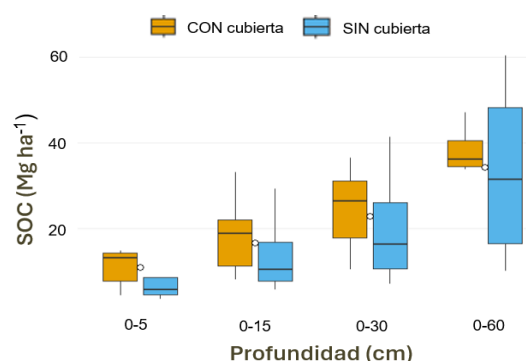


Figura 2. Contenido de carbono orgánico del suelo (SOC, Mg ha⁻¹) en función de la profundidad (0–5, 0–15, 0–30 y 0–60 cm) en olivares con y sin cubierta herbácea.

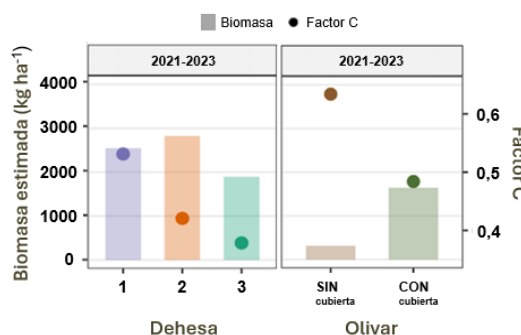


Figura 3. Biomasa herbácea (AGB media acumulada) (2021–2023) en kg ha⁻¹ y el factor C de la USLE en dehesa (tipos 1–3) y en olivar (con y sin cubierta herbácea).

Desde una perspectiva socioeconómica, los patrones biofísicos observados se reflejaron en preferencias contrastadas hacia los esquemas agroambientales. En el olivar se observó una mayor aceptación de programas basados en prácticas, lo que indica, una menor compensación necesaria para incentivar la participación. Estos programas vinculan el pago a la adopción de actuaciones concretas de manejo. En el caso de la dehesa, se observó una mayor disposición a participar en programas basados en resultados, en los que la compensación depende del desempeño ambiental medido mediante indicadores. Asimismo, los programas cuyo objetivo ambiental se centra en el secuestro de carbono presentan una menor compensación que los centrados en la biodiversidad (medida en el número de

especies de aves), debido a la mayor incertidumbre percibida en estos últimos. Estos resultados indican que la viabilidad de los programas basados en indicadores también depende de la percepción del riesgo asociada a su aplicación.

En conjunto, estos resultados indican que la biomasa herbácea estimada por teledetección, interpretada en su dimensión temporal, puede actuar como un indicador integrador y operativo de múltiples servicios ecosistémicos, especialmente en sistemas mediterráneos simplificados como el olivar, y como indicador complementario en sistemas complejos como la dehesa, como se muestra en la Figura 4.

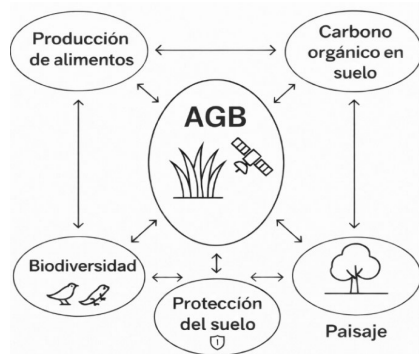


Figura 4. Propuesta de la biomasa aérea (AGB) como indicador operativo de cinco servicios ecosistémicos clave.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran cómo AGB permite integrar de manera coherente información sobre distintos servicios ecosistémicos en agrosistemas mediterráneos, lo que revela patrones diferenciados entre sistemas simplificados y complejos. En el olivar, la biomasa se asocia de manera consistente con servicios de aprovisionamiento, regulación y culturales, así como con indicadores de biodiversidad, lo que refuerza su idoneidad como indicador operativo para esquemas agroambientales basados en resultados, fácilmente monitorizables y escalables. En la dehesa, aunque la biomasa no actúa como determinante principal de la biodiversidad, sí contribuye a caracterizar estados funcionales relevantes cuando se interpreta junto con índices de complejidad estructural y métricas de heterogeneidad del hábitat, que desempeñan un papel dominante en estos sistemas agro-silvopastorales. La incorporación de la dimensión socioeconómica pone de manifiesto que la viabilidad de estos enfoques depende no solo de la robustez biofísica del indicador, sino también de su aceptación por parte de los gestores, especialmente en contextos de incertidumbre. En conjunto, este estudio respalda la producción herbácea como indicador integrador y operativo, con un elevado potencial para apoyar el diseño y el seguimiento de políticas agroambientales orientadas a resultados en paisajes agrarios mediterráneos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de la AEI (PID2019-107693RRC22/AEI/10.13039/501100011033),

al proyecto EU Horizon Europe ScaleAgData (101086355), al proyecto DRYAD (nº 101156076) y al proyecto PP.AVA23.INV202301.030 (O.P. Andalucía 2021-2027, 80% cofinanciado por FEDER).

6. REFERENCIAS

- Blázquez-Carrasco, Á., Gómez-Giráldez, P. J., Castro-Rodríguez, J., Colombo, S., Carpintero, E., & González-Dugo, M. P. (2021). Estimation of olive groves cover crops net primary productivity using remote sensing data. *Proceedings of SPIE, 11856, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXIII*, 118560S. <https://doi.org/10.1117/12.2601181>
- Granado-Díaz, R., Villanueva, A. J., & Colombo, S. (2024). Land manager preferences for outcome-based payments for environmental services in oak savannahs. *Ecological Economics, 220*, 108158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108158>
- Gómez-Giráldez, P.J., Aguilar, C., Caño, A.B., García-Gómez-Giráldez, P. J., Aguilar, C., Caño, A. B., García-Moreno, A., & González-Dugo, M. P. (2019). Remote sensing estimation of net primary production as monitoring indicator of holm oak savanna management. *Ecological Indicators, 106*, 105526. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105526>
- González-Dugo, M. P., Muñoz-Gómez, M. J., Gálvez, C., Blázquez-Carrasco, Á., Carbonero, M. D., Castro, J. C., Guerrero-Casado, J., Tortosa, F. S., Castro, J., Arriaza, M., Colombo, S., & Villanueva, A. (2024). Integración de la teledetección en el seguimiento de los servicios ecosistémicos como apoyo al desarrollo de políticas agrarias. En *Teledetección y cambio global: Retos y oportunidades para un crecimiento azul* (pp. 333–336). XX Congreso de la AET.
- Monteith, J. L., & Moss, C. J. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 281*(980), 277–294. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>
- Muñoz-Gómez, M. J., Andreu, A., Carbonero, M. D., Blázquez-Carrasco, Á., & González-Dugo, M. P. (2024). Impact of water stress on Mediterranean oak savanna grasslands productivity: Implications for on-farm grazing management. *Agricultural Water Management, 303*, 109025. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109025>
- Villanueva, A. J., Granado-Díaz, R., & Colombo, S. (2024). Comparing practice- and results-based agri-environmental schemes controlled by remote sensing: An application to olive groves in Spain. *Journal of Agricultural Economics, 75*(2), 524–545. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12573>
- Win, K. Z., Arriaza, M., & Villanueva, A. J. (2025). Monetary and non-monetary valuation of Mediterranean agricultural landscapes: The case of oak savannah and sloping olive groves. *Spanish Journal of Agricultural Research, 23*(2), 21502. <https://doi.org/10.5424/sjar/2025232-21502>