

Molina-Medina, A.; González-Piqueras, J.; Garrido-Rubio, J. Comparación entre la demanda teórica de riego y la estimación derivada de un balance hídrico asistido por teledetección a escala de parcela

Comparación entre la demanda teórica de riego y la estimación derivada de un balance hídrico asistido por teledetección a escala de parcela

Molina-Medina, Antonio ¹ González-Piqueras, José ¹ Garrido-Rubio, Jesús ²

¹ Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Castilla – La Mancha, Campus Universitarios/n 02071 Albacete España.

² Instituto IMDEA Agua, Avda. Punto Com 2, Alcalá de Henares, 28805, Madrid, Spain

ORCID: Molina-Medina 0000-0002-3706-2489 González-Piqueras 0000-0003-2226-5731
Garrido-Rubio 0000-0002-1739-2616

Correspondencia: antoniojesus.molina@uclm.es jose.gonzalez@uclm.es jesus.garrido@imdea.org

RESUMEN

La estimación precisa del consumo de agua es un elemento clave para la optimización del uso del agua en cultivos extensivos, especialmente en zonas con alta variabilidad climática y creciente presión sobre los recursos hídricos. Los métodos tradicionales, basados en aforos y programación empírica del riego, presentan limitaciones para captar la variabilidad espacial del cultivo. En este trabajo se evalúa la capacidad de la herramienta HIDROMOREweb para estimar las necesidades de riego a escala de parcela mediante balance de agua en el suelo y coeficiente dual de cultivo (FAO56), integrando imágenes de satélite y datos meteorológicos. La estimación se valida con datos suministrados por la Junta Central de Regantes Mancha Oriental que publica para cada campaña su plan de explotación. Los resultados muestran una buena correspondencia entre el consumo teórico asignado a los cultivos y el consumo estimado por teledetección, con coeficientes de R2 superiores al 0.95. Se presenta por tanto la metodología aplicada y los resultados obtenidos para la OCA de La Roda empleando tres años consecutivos con diferentes condiciones climáticas en cuanto a la pluviometría.


Palabras clave: Teledetección, Riego, Balance hídrico, HIDROMOREweb


Fecha de recepción: 5 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 5 febrero 2026

Comparación entre la demanda teórica de riego y la estimación derivada de un balance hídrico asistido por teledetección a escala de parcela


Molina-Medina, Antonio ⁽¹⁾, González-Piqueras, José ⁽¹⁾, Garrido-Rubio, Jesús ⁽²⁾

⁽¹⁾ Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Castilla – La Mancha. España

 0000-0002-3706-2489, antoniojesus.molina@uclm.es.

 0000-0003-2226-5731, jose.gonzalez@uclm.es.

⁽²⁾ Instituto IMDEA Agua, España.

 0000-0002-1739-2616, jesus.garrido@imdea.org.

Resumen: La estimación precisa del consumo de agua es un elemento clave para la optimización del uso del agua en cultivos extensivos, especialmente en zonas con alta variabilidad climática y creciente presión sobre los recursos hídricos. Los métodos tradicionales, basados en aforos y programación empírica del riego, presentan limitaciones para captar la variabilidad espacial del cultivo. En este trabajo se evalúa la capacidad de la herramienta HIDROMOREweb para estimar las necesidades de riego a escala de parcela mediante balance de agua en el suelo y coeficiente dual de cultivo (FAO56), integrando imágenes de satélite y datos meteorológicos. La estimación se valida con datos suministrados por la Junta Central de Regantes Mancha Oriental que publica para cada campaña su plan de explotación. Los resultados muestran una buena correspondencia entre el consumo teórico asignado a los cultivos y el consumo estimado por teledetección, con coeficientes de R^2 superiores al 0.95. Se presenta por tanto la metodología aplicada y los resultados obtenidos para la OCA de La Roda empleando tres años consecutivos con diferentes condiciones climáticas en cuanto a la pluviometría.

Palabras clave: Teledetección, Riego, Balance hídrico, HIDROMOREweb.

Comparison between theoretical irrigation demand and estimates derived from a remote sensing-assisted water balance at plot scale

Abstract: Accurate estimation of water consumption is a key factor for optimizing water use in extensive cropping systems, particularly in areas with high climatic variability and increasing pressure on water resources. Traditional methods, based on flow measurements and empirical irrigation scheduling, show limitations in capturing the spatial variability of crops. In this study, the ability of the HIDROMOREweb tool to estimate irrigation requirements at the field-plot scale is evaluated through a soil water balance and the dual crop coefficient approach (FAO56), integrating satellite imagery and meteorological data. The estimation is validated using data provided by the Central Board of Irrigators of the Mancha Oriental (JCRMO), which publishes an annual exploitation plan for each irrigation campaign. The results show a strong correspondence between the theoretical water consumption assigned to crops and the consumption estimated through remote sensing, with R^2 coefficients above 0.95. The methodology applied and the results obtained for the OCA of La Roda are therefore presented, using three consecutive years with different climatic conditions in terms of rainfall.

Keywords: Remote sensing, Irrigation, Water balance, HIDROMOREweb.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de regadío en regiones semiáridas enfrenta un creciente estrés hídrico ligado a la variabilidad climática e intensificación de la demanda, lo que exige herramientas operativas que permitan cuantificar y gestionar el agua con resolución espacial fina y actualización frecuente. En el contexto europeo, los informes de la Agencia Europea de Medio Ambiente señalan que el estrés hídrico estacional afecta de forma

recurrente a amplias zonas del sur de Europa y recomiendan mejorar la eficiencia y la transparencia en el uso del agua en agricultura (European Environment Agency, 2021). En este sentido, el uso de modelos basados en la metodología FAO56 y el coeficiente dual constituye un marco teórico robusto que integra los procesos de evapotranspiración de los cultivos (ETc), contenido de agua en el suelo y estrés hídrico (Pereira *et al.*, 2020), siempre que se alimente con datos espacialmente distribuidos y coherentes con la dinámica

real del cultivo con el objetivo de monitorizar extensas superficies. Es aquí donde la teledetección ha transformado la manera de monitorizar y gestionar las demandas de agua.

El acceso a series temporales densas de sensores como Sentinel-2 (S2), junto con parámetros biofísicos derivados de índices de vegetación como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), ha permitido mejorar la estimación de coeficientes basales de cultivo (Kcb), ETc ajustada y necesidades netas de riego (Garrido-Rubio *et al.*, 2024). Además, la integración de estos datos en modelos FAO56 a través del enfoque RS-IWA (Remote Sensing-based Irrigation Water Accounting) ha demostrado su capacidad para proporcionar estimaciones diarias, espacialmente distribuidas y con precisión comparable a los datos de manejo en campo. En paralelo, implementaciones operativas del modelo RS-IWA como HidroMORE/HIDROMOREweb han acreditado su validez frente a redes in situ y su capacidad para mapear las necesidades netas de agua de riego basadas en teledetección (NIR_{RSb}) en distintos sistemas agrícolas (Garrido-Rubio *et al.*, 2020; Molina-Medina *et al.*, 2024). En conjunto, estas evidencias sustentan la integración de teledetección y FAO56 como vía fiable, transparente y escalable para la contabilidad del agua y la optimización del riego a escala de parcela. El objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de RS-IWA para estimar la demanda de riego en cultivos extensivos y validar los resultados mediante datos de riego y observaciones de campo a escala de parcela.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La Oficina Comarcal Agraria (OCA) es una unidad administrativa, que acerca la gestión agraria, ganadera y medioambiental a los ciudadanos en el territorio. Este estudio se realizó sobre las OCA La Roda (28.670 ha regadas), que se sitúa en la masa de agua subterránea Mancha Oriental.

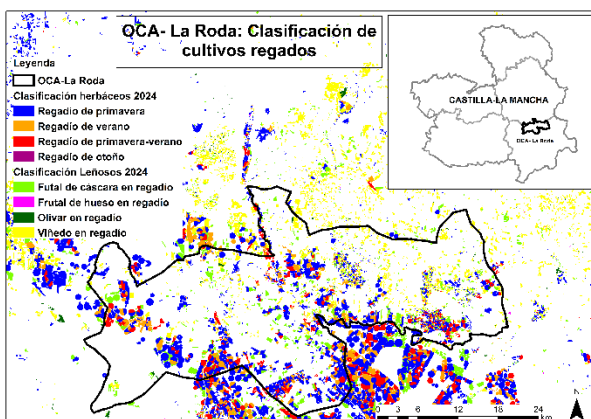


Figura 1. Localización de la OCA la Roda con la clasificación de cultivos por parcela en el año 2024, entrenado con trabajo de campo propio.

Dicha masa está localizada mayoritariamente en la provincia de Albacete (España) y pertenece a la

Demarcación Hidrográfica del Júcar. Se han empleado los años 2022, 2023 y 2024 que cuentan con diferentes condiciones pluviométricas, para poder abarcar diferentes condiciones climáticas y de manejo. El clima en el área de estudio es el mediterráneo continental, caracterizado por una acusada variación estacional con inviernos fríos y veranos calurosos. La precipitación (P) es baja y se distribuye irregularmente a lo largo del año, con mayores cantidades durante el otoño y la primavera, siendo la media de 340 mm durante los últimos 30 años.

2.2. Teledetección y datos meteorológicos

En este estudio, se han seleccionado imágenes NDVI para seguir el crecimiento de los cultivos durante cada la campaña agrícola. La serie temporal de imágenes está formada por imágenes procedentes de la constelación S2 formada por los satélites gemelos S2A y S2B, cuya alta frecuencia temporal de imágenes (alrededor de 1 imagen cada 5 días) permitió describir el ciclo de crecimiento del cultivo y estimar con precisión los parámetros utilizados en este estudio. Además, los efectos de distorsión atmosférica en los valores de las imágenes son compensados mediante un procedimiento de normalización para el NDVI (Chen *et al.*, 2005). Para ello, los valores máximos y mínimos de NDVI obtenidos para cada imagen en superficies consideradas invariantes (vegetación densa como alfalfa y suelo desnudo) son reescalados linealmente a los valores correspondientes de NDVI para estas superficies en función de los valores comunes observados en el área de estudio (0.91 y 0.15, respectivamente). Las fechas de adquisición de las imágenes utilizadas pertenecen al gránulo T30SWJ y T30SXJ, van desde 01/12/2021) hasta 31/12/2024) contando con 175 imágenes para los tres años de estudio, y que con una resolución espacial de 10 m es suficiente para monitorear áreas homogéneas. La evolución temporal del NDVI se ha interpolado en una escala diaria, empleando las imágenes satelitales elegidas en cada campaña, el sistema requiere utilizar una herramienta de estadísticas zonales de SIG, que asocia a cada parcela su valor NDVI promedio para cada día del año. Para ello se calcula el valor promedio del NDVI de la parcela en las fechas de las que se dispone de imagen y posteriormente se interpola linealmente entre fechas. Asimismo, se asigna a cada parcela el valor diario de P y evapotranspiración de referencia (ET_o). Los datos meteorológicos se obtuvieron de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). Los datos utilizados en este estudio fueron la ET_o calculada utilizando la ecuación FAO56 Penman-Monteith (Allen 1998) y la P diaria acumulada. De esta manera HIDROMOREweb utiliza información de las capas ráster de 5x5 km de ET_o y P proporcionadas por AEMET para toda la Península (Campoy *et al.*, 2025; Molina-Medina *et al.*, 2025).

2.3. Balances de agua asistido por satélite

La herramienta HIDROMOREweb opera vía web para estimar las componentes del balance de agua en la capa del suelo explorada por las raíces, de un cultivo o cubierta general, a lo largo de un intervalo de temporal determinado o bien definido en su ciclo de crecimiento completo. HIDROMOREweb opera a alta resolución espacial, limitado según la resolución espacial del satélite empleado, en este caso 10 m, y proporciona las

componentes a escala diaria y tiene alcance global. Es importante destacar que la herramienta estima, entre otros parámetros como (ETc ajustada, ETc potencial, P, Transpiración potencial, Transpiración ajustada, ETo, Evaporación y percolación), las NIR_{RSb}, bien para mantener condiciones de confort hídrico en la vegetación, o bien para aplicar condiciones de riego deficitario controlado a lo largo del ciclo de crecimiento. La metodología para determinar las NIR_{RSb} es la de un balance de agua diario, en la capa de suelo explorada por las raíces. En este trabajo se sigue el procedimiento descrito de coeficiente dual por FAO56 (Pereira *et al.*, 2024). En él, la evapotranspiración del cultivo (ETc) se calcula mediante el producto del denominado coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), por la demanda evaporativa de la atmósfera, esto es la ETo, que se calcula desde datos meteorológicos. En el coeficiente de cultivo se separan la parte de la transpiración, K_{cb}, y la parte de la evaporación. Cuando el contenido de agua en suelo cae por debajo de un cierto valor umbral, que depende del cultivo, éste entra en estrés hídrico. La modelización del contenido de agua en suelo permite activar el momento de aplicar el riego en función del estrés tolerado (FAO56). La cuantía de agua total aplicada se obtiene por agregación de los riegos individuales. La serie temporal de imágenes de satélite se integra en este modelo de balance al proporcionar el valor del K_{cb} (con valores que oscilan entre 0.15 y 1.15), y por tanto determinar, junto con la ETo, el potencial de transpiración de la cubierta. En este trabajo se utiliza la relación $K_{cb} = 1,44 \text{ NDVI} - 0,1$ propuesta por (Campos *et al.*, 2010) se aplica a todos los cultivos. Esta metodología ha sido validada en diferentes cultivos (Garrido-Rubio *et al.*, 2020). El software HIDROMOREweb utiliza como entradas: las series temporales de NDVI y variables meteorológicas descritas en el apartado 2.2. Además, se identifica el cultivo que se encuentra en cada parcela de la capa vectorial, definiendo su ciclo de crecimiento (mediante una fecha inicial y final o umbrales basados en valores NDVI). Asimismo, los parámetros requeridos en el balance de agua para cada cultivo se encuentran preconfigurados para diversos cultivos basados el manual FAO56. También se puede definir la estrategia de riego y, por último, se define el valor de agua disponible en suelo por unidad de profundidad (mm/m) que denominamos TAW para todas las parcelas y el valor de la fracción de agotamiento de la humedad en el suelo (p), capaz de determinar el valor umbral para definir cuando el cultivo entra en estrés hídrico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este estudio propone una herramienta basada en teledetección capaz de cuantificar NIR_{RSb} a escala de parcela durante tres años consecutivos, obteniendo la contabilidad de agua de forma individual. Los resultados obtenidos a escala de parcela se agregaron por tipo de cultivo obteniendo para cada cultivo mayoritario de la zona de estudio su consumo (m³) y la superficie (ha) y poder obtener así el consumo unitario (m³/ha) para cada cultivo y campaña de riego (Tabla 1). Estos datos se validaron mediante el plan de explotación que publica la JCRMO (<https://www.jcrmo.org>) donde hace una

diferenciación de cultivos y asigna un consumo teórico (m³/ha) para cada cultivo y campaña de riego.

Tabla 1. Evaluación de los consumos unitarios por cultivo y campaña de riego.

Cultivos	JCRMO Consumo (m ³ /ha)	RS-IWA 2024 Consumo (m ³ /ha)	RS-IWA 2023 Consumo (m ³ /ha)	RS-IWA 2022 Consumo (m ³ /ha)
Alfalfa	8.000	8.250	8.250	7.500
Trigo	3.100	2.950	3000	2.450
Cebolla	5.800	5.100	5.200	5.400
Almendro	2.300	2.250	2.300	2.700
Viña	1.500	1.450	1.200	1.830
Cebada	2.600	2.450	2.850	1.800
Maíz	6.000	5.500	5.100	6.000
Ajo	2.800	2.700	2.850	2.350

Como podemos observar en la Tabla 1, la JCRMO estima para cada cultivo un consumo unitario igual en las tres campañas de riego, mientras que mediante la RS-IWA somos capaces de evaluar en cada una de las campañas de riego el consumo estimado de cada uno de los cultivos en un escenario meteorológico diferente cada año y ver su respuesta sujeta al manejo de los agricultores, evidenciando que el consumo depende en gran medida de cómo se distribuyen las P a lo largo de la campaña de riego y el manejo. Por ello, presentamos la figura 2 para discutir el consumo estimado (RS-IWA) frente al consumo teórico (JCRMO). Los años evaluados muestra un ajuste lineal consistente, sin tendencia sistemática a la sobreestimación o infraestimación. La excepción se observa en 2022, año caracterizado por una prolongada ausencia de P, donde la respuesta diferencial entre cultivos herbáceos, leñosos y hortícolas refleja adecuadamente su sensibilidad y estrategias de manejo bajo estrés hídrico.

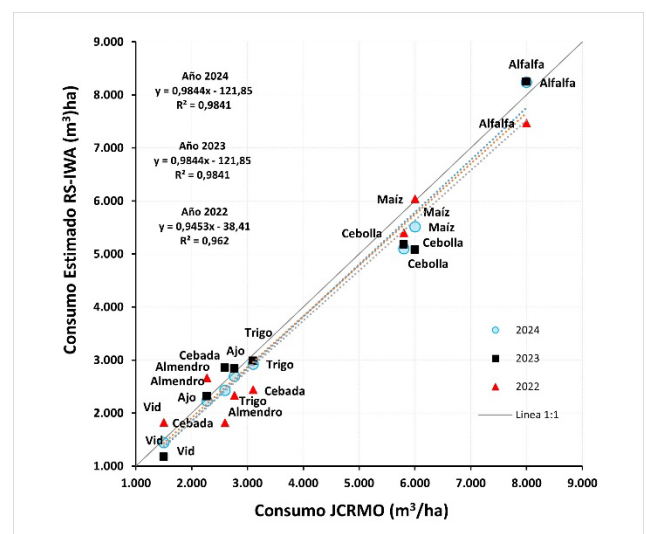


Figura 2. Evaluación anual (2022-2024) del consumo unitario (JCRMO) y consumo estimado RS-IWA en la OCA La Roda perteneciente a la masa de agua Mancha Oriental.

La agregación de parcelas por tipo de cultivo muestra una convergencia notable con las dotaciones teóricas publicadas por la JCRMO, lo que sugiere que, a nivel agregado, el consumo medio de cada cultivo se aproxima de forma consistente a los valores de referencia establecidos para la campaña. Sin embargo, cuando el análisis se realiza a escala de parcela individual, emerge un patrón mucho más heterogéneo: se observa un amplio rango de consumos entre parcelas clasificadas bajo el mismo tipo de cultivo, con algunas unidades de superficie que presentan consumos sensiblemente inferiores y otras muy elevados. Destacamos las parcelas de trigo regado cuyo consumo unitario es de 2.925 m³/ha y una desviación estándar de 570 m³/ha, donde el consumo estimado para cada parcela varía (1.350 mínimo a 4.050 máximo), con una muestra de 456 parcelas y 2.966 ha en el año 2024, siendo similares los datos de los otros años. Esta variabilidad intra-cultivo pone de manifiesto la importancia de emplear herramientas de estimación parcelaria para capturar adecuadamente la diversidad de respuestas hídricas dentro de un mismo sistema.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que la contabilidad de agua de riego basada en teledetección RS-IWA mediante HIDROMOREweb constituye una herramienta robusta para la estimación parcelaria de las NIR_{RSb}, permitiendo caracterizar con precisión el consumo de agua para cada cultivo y cada campaña bajo condiciones meteorológicas contrastadas. La comparación con las dotaciones teóricas publicadas por la JCRMO revela una coincidencia notable a escala agregada por cultivo, lo que valida el enfoque RS-IWA como metodología fiable para la contabilidad del agua a nivel operativo, esto mismo se confirmó en (Garrido-Rubio *et al.*, 2020), lo que confirma la madurez técnica del sistema para la contabilidad del agua de riego.

Sin embargo, el análisis detallado a escala de parcela evidencia una variabilidad intra-cultivo considerable pues se muestran consumos muy diferentes entre sí. Un trabajo futuro es contrastar los datos frente a los contadores ya instalados en las parcelas de estudio. Esta heterogeneidad confirma la fuerte influencia de factores locales como propiedades del suelo, estado vegetativo, profundidad radicular y manejo individual del riego que no pueden captarse mediante estimaciones teóricas uniformes. En este sentido, la teledetección aporta una capacidad única para capturar la respuesta de cada parcela al agua de riego, mejorando la resolución y la utilidad de la información frente a enfoques tradicionales. En conjunto, este estudio demuestra que la aplicación RS-IWA permite avanzar hacia una contabilidad del agua más precisa, dinámica y adaptada a la realidad productiva, constituyendo un soporte fundamental para la planificación del riego, la gestión de recursos hídricos y la toma de decisiones en territorios con alta presión sobre los acuíferos.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto EUNOMIA (Proyecto referencia PID2024-161881OB-C21 y PID2024-161881OB-C22 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE).

6. BIBLIOGRAFÍA

- Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manag.* 98, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>
- Campoy, J., Beltrán, A., Moreno, R., Molina, A., Calera, A., 2025. Balance de agua asistido por satélite para determinar las demandas de agua de riego de los cultivos. La herramienta HIDROMOREweb.
- Chen, X., Vierling, L., Deering, D., 2005. A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. *Remote Sens. Environ.* 98, 63–79. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.021>
- Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., Calera, A., Osann, A., 2024. Remote sensing-based green and blue agricultural water footprint estimation at the river basin scale. *Ecol. Indic.* 167. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112643>
- Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., Campos, I., Osann, A., González-Gómez, L., Calera, A., 2020. Remote sensing-based soil water balance for irrigation water accounting at plot and water user association management scale. *Agric. Water Manag.* 238. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106236>
- Molina-Medina, A., Campoy, J., Jaime, Cañadas, J., Diego, González, J., Agustín, González-Piqueras, J., José, Calera, J., Alfonso, 2025. XL Congreso Nacional de Riegos ALBACETE 11, 12 y 13 de junio de 2025 Demanda de agua de riego en Maíz, Trigo y Cebada mediante HIDROMOREweb y su comparación con datos de campo. Albacete.
- Molina-Medina, A., Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., Calera, A., 2024. Balance de agua en el suelo asistido por Teledetección sobre el acuífero Los Arenales-Tierra de Pinares para el seguimiento de extracciones de agua de riego.
- Pereira, L.S., López-Urrea, R., Ortega-Farías, S., 2024. Editorial to the special issue on “Contributions to update the FAO56 guidelines for computing crop water requirements.” *Irrig. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s00271-024-00975-x>
- Pereira, L.S., Paredes, P., Jovanovic, N., 2020. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agric. Water Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>