

Estimación del balance hídrico del suelo a partir de datos de satélite de 2010-2021 en el Parque Nacional de Doñana (España)

Estimation of soil water balance using satellite data from 2010-2021 in the Doñana National Park (Spain)

Alejandro Ruiz^{1,*}, Zulimar Hernández^{1,2} & Tomás de Figueiredo^{2,3}

¹ Grupo de Riesgos Ambientales, Dpto. Geografía. Universidad Autónoma de Madrid (UAM), Madrid, España

² SusTec-Laboratório Associado para a Sustentabilidade e Tecnologia em Regiões de Montanha, Portugal

³ CIMO-Centro de Investigação de Montanha, Instituto Politécnico de Bragança (IPB), Bragança, Portugal

(*E-mail: alejandra.ruizd@estudiante.uam.es)

<https://doi.org/10.19084/rca.33884>

Recibido/received: 2023.07.31

Aceptado/accepted: 2023.11.20

RESUMEN

El balance hídrico (BH) es una de las metodologías más eficaces para conocer la disponibilidad de recursos hídricos del suelo. Si bien existen varios métodos para calcular el BH del suelo, en la actualidad, la aparición de herramientas de observación de la Tierra, como los sensores remotos, permiten la obtención de datos de agua en el suelo de manera muy eficaz, llegando a mejorar la precisión de las medidas meteorológicas. Este estudio supone una comparación de 2 metodologías diferentes para el cálculo del BH en el Parque Nacional de Doñana (Huelva, España), en el periodo comprendido entre los años 2010 y 2021. Se compara el BH obtenido con los datos meteorológicos, tras aplicar el método de Thornthwaite, con el producto CCI-SM (Soil Moisture) de la ESA (European Space Agency) obtenido con datos de radar de varios satélites para el mismo periodo y la misma área de estudio. Resultados preliminares permiten observar una fuerte correlación entre los datos de capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (Amax) para datos meteorológicos y satelitales. En los últimos 11 años, el BH del suelo en el Parque nacional de Doñana se ha reducido, lo que indica periodos de sequía más severos y prolongados.

Palabras-clave: Balance hídrico, sensores remotos, evapotranspiración, ESA CCI-SM, sequía.

ABSTRACT

The soil water balance is one of the most effective methodologies to know the availability of soil water resources. Although there are several methods for calculating soil water balance, nowadays, the emergence of Earth observation tools, such as remote sensing, allows the collection of soil water data in a very effective way, improving the accuracy of meteorological measurements. This study involves a comparison of two different methodologies for the calculation of soil water balance in the Doñana National Park (Huelva, Spain), for period between 2010 and 2021. The soil water balance obtained with meteorological data, after applying the Thornthwaite method, is compared with the CCI-SM (Climate Change Initiative - Soil Moisture) product of the ESA (European Space Agency) obtained with radar data from several satellites for the same period and the same study area. Preliminary results show a strong correlation between the maximum soil water storage capacity (Amax) data for meteorological and satellite data. Over the last 11 years, soil water balance in Doñana National Park has decreased, indicating more severe and prolonged periods of drought.

Keywords: Soil Water Balance, remote sensing, Evapotranspiration, ESA CCI-SM, drought.

INTRODUCCIÓN

El balance hídrico del suelo

El balance hídrico del suelo (BH) hace referencia a la cantidad de agua que almacena el suelo durante un período de tiempo determinado (Rittner, 2007), lo que facilita los mecanismos de gestión de este recurso. El BH es fundamental para comprender el ciclo hidrológico y la relación entre el agua y el resto de los factores bióticos de los ecosistemas (Milly, 1994). La diferencia entre la cantidad de agua que entra en el compartimento suelo y la cantidad que sale determina si un suelo tiene un BH positivo (ganancia neta de agua) o negativo (pérdida neta de agua). De esta forma, un BH positivo puede indicar una mayor disponibilidad de agua para las plantas y recursos agrícolas, mientras que un BH negativo puede indicar sequía o condiciones de estrés hídrico (Dorigo *et al.*, 2017).

Teledetección y ESA CCI-Soil Moisture Product

La teledetección se ha convertido en una herramienta fundamental para el monitoreo de la Tierra, ya que proporciona una visión global de los procesos naturales y humanos que afectan a nuestro planeta. La información recopilada por los sensores remotos también puede ser utilizada en la predicción y mitigación de desastres naturales como inundaciones, terremotos y erupciones volcánicas, así como en la evaluación del impacto ambiental de la actividad humana en la Tierra (Chuvieco, 1991; Rosenqvist *et al.*, 2003).

El producto ESA CCI-Soil Moisture (ESA CCI-SM) es un producto desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) que utiliza datos recopilados por diferentes misiones satelitales para estimar la humedad del suelo a nivel global desde el año 1978. Este producto se enfoca en almacenar y procesar datos de la humedad del suelo, utilizando datos radar obtenidos por satélites, siendo este un parámetro importante en la comprensión de los ciclos del agua y el clima, y como estos pueden afectar a un recurso tan importante como es el suelo. Los datos obtenidos se combinan y procesan para crear mapas que representan la distribución espacial de la humedad del suelo en diferentes momentos y áreas geográficas,

y pueden ser utilizados en una variedad de aplicaciones ambientales (Dorigo *et al.*, 2015, 2017).

Objetivos

El objetivo de esta investigación consiste en evaluar la disponibilidad de recursos hídricos en una zona concreta mediante la utilización de sensores remotos, como es el producto ESA CCI-SM, comparándolo con el balance hídrico del suelo (BH) calculado mediante el método de Thornthwaite-Mather para comparar los resultados obtenidos y la validez de los datos satelitales, con el objetivo de ayudar a su gestión y a entender de una manera más eficiente cómo evolucionan a medio-largo plazo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Fue elegida como área de estudio el Parque Nacional de Doñana, ubicado en el suroeste de España. El Parque Nacional de Doñana, es un importante humedal y ecosistema único que alberga una gran diversidad de flora y fauna. Su situación hidrológica está estrechamente relacionada con los cambios en los niveles de agua del acuífero de Doñana, de hasta 300 m de espesor en su parte costera central, de los ríos Guadalquivir y Guadiamar, y con el régimen de precipitaciones y el clima general de la región (Manzano & Custodio, 2007). El clima del Parque Nacional de Doñana es del tipo mediterráneo subtropical o subhúmedo (Csa), con veranos calurosos y secos, e inviernos suaves y húmedos. La precipitación media anual es de 575 mm, siendo la temperatura media diaria del mes más frío (enero) de 4,6 °C, y la del mes más caluroso (julio) de 32,6 °C (IGME). Según la clasificación de suelos de la Soil Taxonomy, el Parque Nacional de Doñana presenta varios tipos de suelos, como Entisoles, Inceptisoles, Aridisoles, Vertisoles, e Histosoles (Siljeström *et al.*, 1994; Clemente *et al.*, 1998). Estos dos últimos tipos de suelo, Vertisoles e Histosoles, son los que tienen mayor capacidad de retención de agua debido a su alto contenido en arcilla (Clemente *et al.*, 1998). Además, la materia orgánica mejora la capacidad de retención de agua, formando agregados estables y aumentando la porosidad, lo

que evita la erosión y mejora la fertilidad del suelo (Rawls *et al.*, 2003; Lal, 2020).

OBTENCIÓN DE DATOS IN SITU

Los datos diarios de precipitación y temperatura se obtuvieron de la estación meteorológica del Palacio de Doñana (36°59'25.30626 " N, 6°26'38.28066 " O) para el periodo de estudio 2010-2021. Se calculó el balance hídrico (BH), obtenido con datos meteorológicos diarios, método de Thornthwaite-Mather. A partir de los valores mensuales de ET_0 (evapotranspiración potencial corregida o de referencia) y P (precipitación), el método produce estimaciones del almacenamiento mensual de agua en el suelo (A) y sus variaciones (DA) a lo largo del año, junto con la evapotranspiración real (ET_r), el déficit (D) y el excedente (S) de agua en el suelo. También se define un almacenamiento máximo de agua en el suelo (A_{max}), que a efectos de clasificación climática es de 100 mm (Thornthwaite & Mather, 1955).

Obtención de datos del producto ESA CCI Soil Moisture

Para los objetivos de este trabajo, se decide analizar una secuencia temporal de 12 años, entre los años 2010 y 2021, adquiriendo un total de 4.384 observaciones. Se decide este periodo de estudio por la mayor disponibilidad de datos debido a la incorporación de 7 nuevos sensores activos y pasivos durante el final de la primera década (Hirschi *et al.*, 2021). La utilización de todos los datos diarios disponibles es fundamental para el desarrollo de este estudio, pues una elevada resolución temporal puede contrarrestar las limitaciones de una baja resolución espacial (Chuvienco *et al.*, 1998), como es el caso de este producto, donde el tamaño de píxel es de aproximadamente 0,25 grados de latitud y longitud, lo que equivale alrededor de 25 km² en la latitud ecuatorial.

Tratamiento de datos. Análisis de varianzas y modelos de regresión lineal

Se ha optado por la utilización del análisis de varianza ANOVA del conjunto de datos diarios obtenidos y se han utilizado modelos de regresión

entre los valores satelitales del producto ESA-CCI-SM y el cálculo del BH (A). Para ello se han obtenido un total de 144 valores para cada variable, de forma que se obtiene un valor mensual de la disponibilidad de agua en el suelo en mm (A o A_{max}), y un valor mensual de concentración de agua en m³ de agua / m³ de suelo (en adelante, sm , de sus siglas en inglés, soil moisture). Se realizó estadística descriptiva del total del conjunto de datos, calculando también la línea de tendencia temporal de cada estadística, y se analizaran el comportamiento de los valores de humedad de suelo (sm) aplicando la prueba estadística de análisis de varianzas ANOVA de un factor, con el objetivo de identificar posibles tendencias en los valores de humedad del suelo entre los distintos años y meses del periodo de estudio 2010-2021. Por último, se calculará la estadística de la duración de la estación seca y de la estación húmeda, con el objetivo de diferenciar cambios significativos entre los distintos meses y años del periodo de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fortaleza de la resolución temporal de los sensores remotos: 288 vs 4.384 observaciones

Como se puede observar en la Figura 1, la variación mensual de la disponibilidad de agua en el suelo para el área de estudio es mucho más regular si se consideran todos los datos disponibles (4.384), en lugar de considerar únicamente 2 datos mensuales (288), proporcionando resultados más fiables a la hora de detectar cambios o tendencias en la concentración de agua en el suelo en un periodo

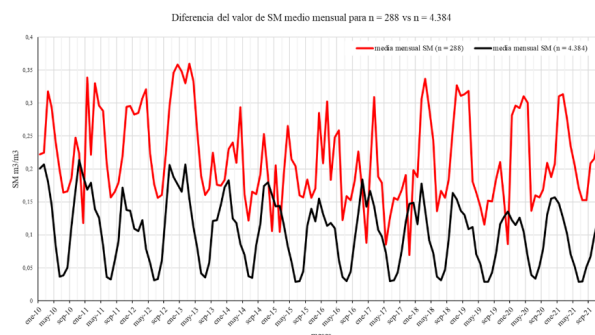


Figura 1 - Comparación de valores medios de sm utilizando dos datos diarios mensuales vs utilizando todos los datos diarios mensuales disponibles.

de tiempo concreto. En la Figura 1b, se observa que la distribución de agua en el suelo sigue una secuencia temporal, donde los meses de menor *sm* corresponden con los meses de abril a septiembre, denominados meses secos, mientras que el periodo de mayor humedad o periodo de lluvias coincide con los meses de octubre a marzo.

Análisis de la variabilidad temporal anual (ESA CCI-Soil Moisture product)

El conjunto de datos analizado se puede considerar asimétrico (Figura 2), pues los datos se encuentran desplazados hacia valores más altos de *sm*. Esto indica que existe una mayor cantidad de datos con valores menores de concentración de agua en el suelo.

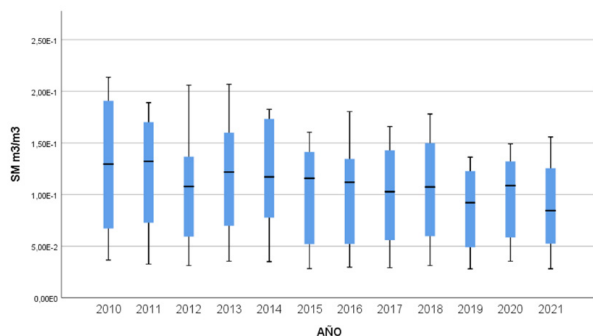


Figura 2 - Gráfico de caja y bigotes de valores de *sm* diarios anuales 2010-2021.

En los últimos años de estudio (2016-2021), esta dispersión es significativamente menor, lo que indica que, en los últimos años de análisis de datos, los valores de *sm* están por debajo de la media y existen menos días con valores altos de concentración de agua en el suelo o en saturación.

Analizando los valores medios (+/- desviación estándar) de concentración de agua en el suelo diarios obtenidos de *sm* durante los 12 años estudiados (Figura 3), se puede observar cómo esta tiende a descender de valores superiores a $0,1 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ hasta valores inferiores a $0,1 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ durante todo el periodo en estudio (2010-2021).

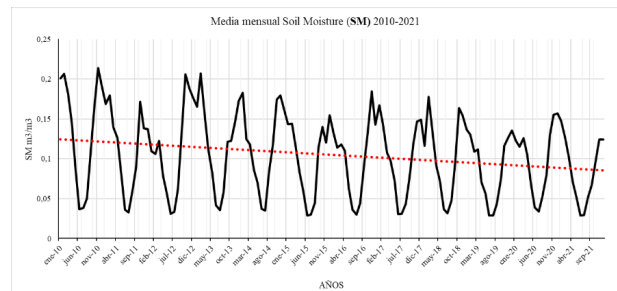


Figura 3 - Tendencia temporal de la concentración diaria de agua en el suelo (2010-2021).

Análisis de la variabilidad temporal mensual (ESA CCI-Soil Moisture product)

Se observa una alta variabilidad de *sm* a lo largo de los 12 meses, poniendo de manifiesto el periodo estival típico del clima mediterráneo (Figura 4). Los valores de mayor *sm* corresponden con los meses de noviembre-marzo, lo que indica que la recarga de agua de suelo (periodo de lluvias) tiene lugar en estos meses.

ESA CCI-Soil product vs Balance hídrico del Suelo (Thornthwaite-Mather)

En la Figura 5a se presentan los valores medios mensuales de BH (A), donde se puede observar una reducción del A más extrema en los meses de abril a julio, comparados con la variable *sm* (5b).

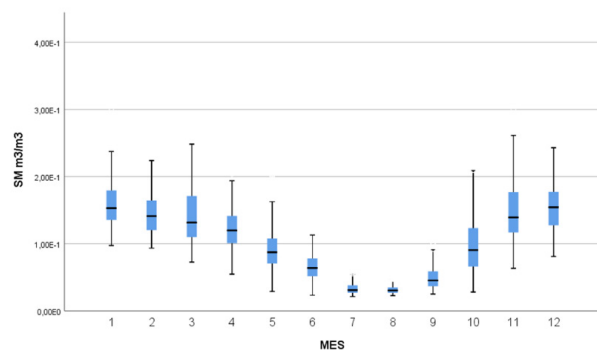


Figura 4 - Gráfico de caja y bigotes de los datos diarios mensuales de *sm* 2010-2021.

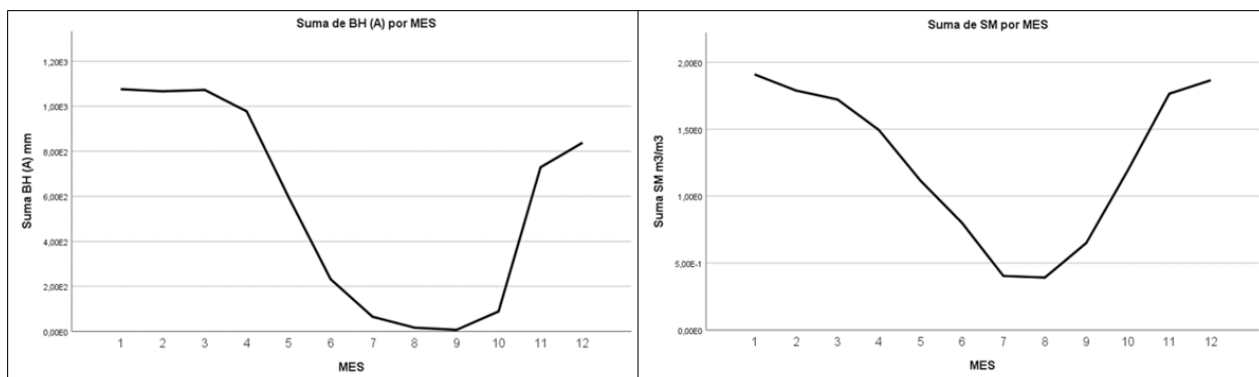


Figura 5 - Acumulación mensual agua disponible BH (A) VS sm (2010-2021).

Ambos métodos identifican claramente la duración de las estaciones seca (max. julio) y húmeda (max. enero), así como los periodos de recarga y agotamiento de agua en el suelo. Sin embargo, en el producto CCI-ESA SM se observa cómo, para los meses más húmedos, se siguen produciendo cambios en la concentración de agua en el suelo, mientras que para los datos de BH, calculados mediante el método de Thornthwaite-Mather, no se producen variaciones al considerar 100 mm (A_{max}) como la capacidad máxima del suelo de retención de agua, aunque siguen una tendencia similar. Esto también parece ocurrir con los valores mínimos. Mientras que los datos de BH (A) son prácticamente cero, los datos satelitales detectan alguna humedad (Figura 6).

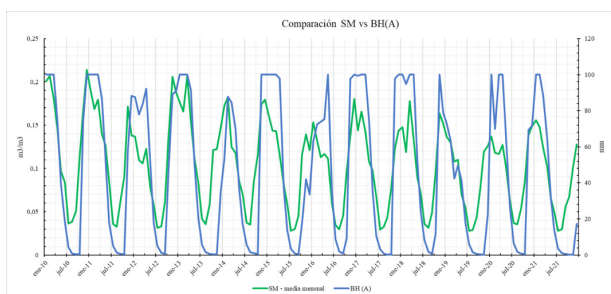


Figura 6 - Comparación mensual de la humedad del suelo obtenida con el producto ESA CCI-Soil moisture (sm) y de balance hídrico del suelo BH (A).

El producto ESA CCI SM muestra un alto potencial para la evaluación de los recursos hídricos en el Parque Nacional de Doñana Andalucía (2010- 2021),

como demuestra la validación del método a través del análisis de correlación efectuado (Figura 7). Además, el uso de *sm* también permite detectar periodos de meses secos y húmedos, así como fenómenos extremos de sequía o precipitaciones abundantes McNally *et al.* (2016). Es interesante realizar análisis con otras variables, como los tipos de uso del suelo o los tipos de suelo para comprender mejor las variaciones espaciales y temporales de los recursos hídricos (Dorigo *et al.*, 2015).

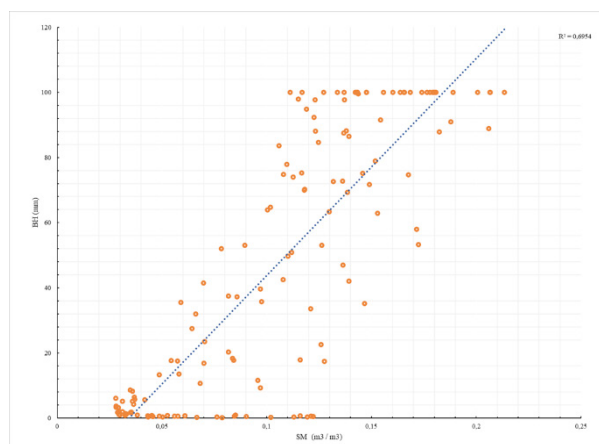


Figura 7 - Análisis de correlación entre variables (sm) vs (A) de valores medios mensuales de precipitación y humedad de suelo.

En base a todos los datos analizados, podemos afirmar que existe una mayor tendencia a la prolongación de la estación seca, pero esto no requiere necesariamente una menor duración de la estación lluviosa, sino una disminución general de la

cantidad total de precipitación con una reducción de más de 200 mm en la precipitación anual acumulada. Resultados similares fueron presentados por Rodríguez *et al.* (2021), Green *et al.* (2023), y Rodríguez & De Stefano (2012) que lo atribuyen a una mayor evapotranspiración como consecuencia del aumento de la temperatura media global.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que, **(i)** los datos de sensores remotos, en este caso, del ESA CCI-SM, son una alternativa viable para el estudio de los recursos hídricos y la disponibilidad de agua en el suelo. Además, **(ii)** los datos adquiridos parecen mostrar

la influencia del suelo y como afectan sus condiciones físicas y químicas (composición y cantidad de materia orgánica) en la retención y el intercambio de agua. Como indican los datos de *sm*, podemos decir que **(iii)** existe una tendencia general a una menor disponibilidad de agua en el suelo y, por tanto, a una menor concentración de agua en el suelo, observando periodos secos más intensos y prolongados.

Por último, se puede afirmar que, **(iv)** futuros estudios que incluyan otras variables muy importantes, como la vegetación (NDVI) el tipo de usos del suelo o los tipos de suelo, podrán ayudar a explicar mejor cómo varían las reservas de agua en este ecosistema único del Parque Nacional de Doñana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chuvieco, E. (1991) - Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos*, vol. 52, n. 203, p. 371.
- Chuvieco, E. (1998) - El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, vol. 10, p. 1-9.
- Clemente Salas, L.; García, L.V. & Siljeström, P. (1998) - *Los suelos del Parque Nacional de Doñana*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales (España).
- Dorigo, W.A.; Gruber, A.; De Jeu, R.A.M.; Wagner, W.; Stacke, T.; Loew, A.; Albergel, C.; Brocca, L.; Chung, D.; Parinussa, R.M. & Kidd, R. (2015) - Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, vol. 162, p. 380-395. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.023>
- Dorigo, W.; Wagner, W.; Albergel, C.; Albrecht, F.; Balsamo, G.; Brocca, L.; Chung, D.; Ertl, M.; Forkel, M.; Gruber, A.; Haas, E.; Hamer, P.D.; Hirschi, M.; Ikonen, J.; de Jeu, R.; Kidd, R.; Lahoz, W.; Liu, Y.Y.; Miralles, D.; Mistelbauer, T.; Nicolai-Shaw, N.; Parinussa, R.; Pratola, C.; Reimer, C.; van der Schaile, R.; Seneviratne, S.I.; Smolander, T. & Lecomte, P. (2017) - ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*, vol. 203, p. 185-215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>
- Green, A.J.; Guardiola-Albert, C.; Bravo-Utrera, M.Á.; Bustamante, J.; Camacho, A.; Camacho, C.; Contreras-Arribas, E.; Gil-Gil, T.; Gomez-Maestre, I.; Heredia-Díaz, J.; Kohfahl, C.; Negro, J.J.; Olías, M.; Rodríguez-Gonzalez, P.M.; Rodríguez-Rodríguez, M.; Ruiz-Bermudo, F.; Santamaría, L.; Schmidt, G.; Serrano-Reina, J.A. & Díaz-Delgado, R. (2023) - *Groundwater abstraction has caused extensive ecological damage to the Doñana World Heritage Site, Spain*. CSIC.
- Hirschi, M.; Stradiotti, P.; Preimesberger, W.; Dorigo, W. & Preimesberger, W. (2021) - *Product Validation and Intercomparison Report (PVIR)*. European Space Agency.
- Lal, R. (2020) - Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, vol. 112, n. 5, p. 3265-3277. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
- Manzano, M. & Custodio, E. (2007) - Las aguas subterráneas en Doñana y su valor ecológico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, vol. 15, n. 3, p. 305-316.
- McNally, A.; Shukla, S.; Arsenault, K.R.; Wang, S.; Peters-Lidard, C.D. & Verdin, J.P. (2016) - Evaluating ESA CCI soil moisture in East Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 48, p. 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.01.001>
- Milly, P.C.D. (1994) - Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resources Research*, vol. 30, n. 7, p. 2143-2156. <https://doi.org/10.1029/94WR00586>
- Rawls, W.J.; Pachepsky, Y.A.; Ritchie, J.C.; Sobecki, T.M. & Bloodworth, H. (2003) - Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, vol. 116, n. 1-2, p. 61-76. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)
- Rittner, M.E. (2007) - *The physical environment*. University of Wisconsin-Stevens Point. Wisconsin.
- Rodríguez, J. & De Stefano, L. (2012) - Intensively irrigated agriculture in the north-west of Doñana. In: de Stefano, L. & Ramon Llanas, M. (Eds.) - *Water, agriculture and the environment in Spain: can we square the circle*. CRC press, p. 269-280.
- Rodríguez-Rodríguez, M.; Aguilera, H.; Guardiola-Albert, C. & Fernández-Ayuso, A. (2021) - Climate influence vs. local drivers in surface water-groundwater interactions in eight ponds of Doñana National Park (southern Spain). *Wetlands*, vol. 41, art. 25. <https://doi.org/10.1007/s13157-021-01425-6>
- Rosenqvist, Å.; Milne, A.; Lucas, R.; Imhoff, M. & Dobson, C. (2003) - A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. *Environmental Science & Policy*, vol. 6, n. 5, p. 441-455. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(03\)00070-4](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(03)00070-4)
- Siljeström, P.A.; Moreno, A.; García, L.V. & Clemente, L.E. (1994) - Doñana National Park (south-west Spain): geomorphological characterization through a soil-vegetation study. *Journal of Arid Environments*, vol. 26, n. 4, p. 315-323. <https://doi.org/10.1006/jare.1994.1034>
- Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R. (1955) - *The Water Balance*. Publications of Climatology, vol. 8.