

EVALUACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO SIMPA MEDIANTE DIFERENTES PRODUCTOS DE SATÉLITE Y MODELACIÓN

José Martínez-Fernández*, Ángel González-Zamora, Laura Almendra-Martín, Carlos M. Herrero-Jiménez, Nilda Sánchez

Instituto Hispano Luso de Investigaciones Agrarias (CIALE), Universidad de Salamanca. Duero, 12, 37185 Villamayor. jmf@usal.es, <http://campus.usal.es/~hidrus>

RESUMEN. Se ha evaluado la base de datos de humedad del suelo generada por el modelo SIMPA (Sistema Integrado para la Modelación de la Precipitación-Aportación), única base de datos de humedad del suelo disponible en nuestro país. Las series de SIMPA se han comparado con las de la base de datos de satélite CCI (*Climate Change Initiative, European Space Agency*) y con las del modelo Lisflood, LF (*European Flood Awareness System*), durante los periodos coincidentes (SIMPA-CCI 1979-2010, SIMPA-LF 1990-2010) y para las principales cuencas españolas. Los resultados muestran un buen grado de similitud. El máximo acuerdo se da al expresar los datos en términos de grado de saturación y con las anomalías, y los resultados son algo mejores en el caso de la comparación con LF. Respecto a las anomalías, el porcentaje de acuerdo en la identificación de periodos de sequía oscila entre 76.0-95.7% (SIMPA-CCI) y 90.9-98.3% (SIMPA-LF).

ABSTRACT. The soil moisture database generated by the SIMPA (Integrated System for Rainfall-Runoff Modelling) model has been assessed. It is the unique available soil moisture database in Spain. SIMPA series have been compared with the CCI (Climate Change Initiative, European Space Agency) satellite database and the Lisflood, LF (European Flood Awareness System) model series, during the coincident periods (SIMPA-CCI 1979-2010, SIMPA-LF 1990-2010), and for the main Spanish basins. The maximum agreement was obtained when data were expressed in terms of degree of saturation and with anomalies, and the results are slightly better for the comparison with LF. Regarding the anomalies, the agreement on the identification of drought periods varies between the 76.0-95.7% (SIMPA-CCI) and 90.9-98.3% (SIMPA-LF).

1.- Introducción

La humedad del suelo es una variable clave que interviene y, a la vez, controla multitud de procesos de gran relevancia en la interfase entre la Atmósfera, la Hidrosfera y la Biosfera. Se trata, además, de una variable que se utiliza en múltiples aplicaciones en Agricultura, Hidrología, Meteorología o Ecología. Todo ello hace que sea cada vez más demandada por investigadores y técnicos en esos campos. Sin embargo, se trata de una variable de la que,

hasta hace poco, se disponía de información escasa y dispersa debido a la dificultad de su obtención y al coste de los sensores para su medición. Como consecuencia de esas particularidades, las mediciones *in situ* han generado, casi siempre, series de corta duración y, dada su elevada variabilidad, se han caracterizado por una reducida representatividad espacial.

Como alternativa, y con el objeto de evitar dichas dificultades, se ha recurrido a otras aproximaciones. Se trata, fundamentalmente, de la modelación y la teledetección. En el primer caso, o bien se han desarrollado modelos específicos para la estimación de la humedad del suelo (Brocca et al. 2008), o bien se ha recurrido a modelos hidrológicos que, aunque fueron diseñados con otra finalidad (de Roo et al. 2000), generan como salida adicional la variable humedad del suelo. En relación con la segunda aproximación, en los últimos años ha habido un gran interés por la recuperación de la humedad del suelo mediante sensores remotos y eso ha posibilitado un enorme desarrollo científico y técnico (Mohanty et al. 2017; Rodríguez-Fernández et al. 2019).

Cada vez resulta más necesario disponer de bases de datos de humedad del suelo con la resolución espacial y a la escala temporal más adecuadas. Estas bases de datos son imprescindibles para campos como la modelación y la predicción meteorológica (Dirmeyer y Halder, 2016), el análisis de la sequía agrícola (Martínez-Fernández et al. 2015), de la dinámica de la cubierta vegetal (Mathys et al. 2014) o de los riesgos naturales (Petropoulos y Islam, 2018). En España la única base de datos puesta a disposición pública, hasta el momento, ha sido la generada por el modelo SIMPA (Sistema Integrado para la Modelación de la Precipitación-Aportación), incorporada al Sistema Integrado de Información del Agua (SIA) y gestionada por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). Este modelo fue propuesto por Ruiz García (1999) y se utiliza como herramienta para la gestión de los recursos hídricos por parte de los organismos de cuenca, y una de sus salidas es la humedad del suelo.

Como quiera que la humedad del suelo del modelo SIMPA no ha sido validada hasta la actualidad, el presente trabajo ha planteado como objetivo llevar a cabo su evaluación. Para ello se han utilizado dos bases de datos de referencia, una proveniente de la modelación y otra de la teledetección, y el análisis se ha realizado para las principales cuencas españolas.

2.- Material y métodos

2.1. Humedad del suelo SIMPA

SIMPA es un modelo de balance distribuido que reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en cada una de las celdas de la cuenca (Ruiz García, 1999). Se trata de un modelo que simula una serie de variables, y entre ellas la humedad de suelo, a escala mensual y con una resolución espacial de 1 km. Para este trabajo se ha utilizado la base de datos con la humedad del suelo media mensual correspondiente a las principales cuencas de España, que está disponible en la web del SIA (<https://servicio.mapama.gob.es/sia/visualizacion/descargas/series.jsp>). El periodo de análisis de dicha base comprende desde 1979 hasta 2010. En la comparación con los otros dos productos se han utilizado los periodos coincidentes.

2.2. Humedad del suelo CCI

Se ha empleado el producto CCI (*Climate Change Initiative, European Space Agency*) combinado de humedad del suelo diaria con una resolución espacial de 25 km. Se ha utilizado la versión 4.2, que fusiona todos los productos de los diferentes sensores activos y pasivos que directamente recuperan humedad del suelo (Dorigo et al., 2017). La base de datos de CCI ha sido validada en numerosos trabajos en diferentes países y, recientemente, en España (González-Zamora et al. 2019). A partir de la humedad del suelo superficial de CCI, y siguiendo la metodología de González-Zamora et al. (2016), se ha obtenido la humedad en la zona radicular. A partir de los datos diarios se han calculado los promedios mensuales y espaciales a escala de cuenca, entre enero de 1979 y diciembre de 2010. Como quiera que la serie de CCI tiene más lagunas de datos en los primeros años, como consecuencia del mayor tiempo de revisita de los satélites que operaban en esa primera fase, se ha hecho un análisis adicional referido al periodo 2002-2010, en el que dichas lagunas se reducen notablemente. Para este último periodo la disponibilidad de datos es del 96%, frente al 56% de la serie completa.

2.3. Humedad del suelo Lisflood

Lisflood (LF) es un modelo distribuido lluvia-escurrentía que forma parte del *European Flood Awareness System*, EFAS (Thielen et al. 2009) y proporciona información en tiempo casi-real de diferentes variables, incluida la humedad del suelo (de Roo et al. 2000). Entre otras aplicaciones, las anomalías calculadas a partir de la humedad del suelo de LF son las que utiliza el *European Drought Observatory*, EDO (*Joint Research Centre*), que es la principal iniciativa de monitorización de la sequía en el continente europeo.

Para este trabajo se han utilizado datos de humedad del suelo diaria con una resolución espacial de 5 km desde el año 1990 hasta 2010. Esta información ha sido promediada a escala mensual y para cada una de las cuencas.

2.4. Metodología de evaluación

Puesto que SIMPA genera la humedad del suelo en mm y, tanto LF como CCI estiman dicha variable de forma

volumétrica, se han convertido a mm las bases de datos de estos dos productos. Al mismo tiempo, se ha considerado como profundidad de referencia para los tres productos 1 m. Esto es relevante porque, mientras que en el caso de CCI esa es la profundidad para la estimación de la humedad del suelo en la zona radicular, en los otros dos casos no está claramente identificada. SIMPA utiliza una profundidad que varía con el uso del suelo, con el objeto de calcular el parámetro denominado capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo. LF, por su parte, simula a partir de un esquema de dos capas (*topsoil* y *subsoil*), haciendo corresponder la primera con la profundidad de la zona de raíces, pero sin especificar a qué profundidad se refiere. Con el objeto de relativizar el efecto derivado de esa indefinición, el análisis se ha realizado también convirtiendo la humedad del suelo en grado de saturación.

El estudio se ha llevado a cabo de forma individualizada para cada una de las ocho grandes cuencas españolas: Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Ebro, Júcar y Segura.

Para la comparación entre las diferentes bases de datos y con el objeto de evaluar la idoneidad de SIMPA, se ha empleado el análisis de correlación (Pearson), como es común en los trabajos de validación de productos de humedad del suelo (Entekhabi et al 2010).

Por último, en el análisis se han utilizado también las anomalías de humedad del suelo, siguiendo la metodología del EDO:

$$Anomalia_t = \frac{X_t - \bar{X}}{\delta}$$

donde X_t es la humedad del mes t , y \bar{X} y δ son la media y la desviación tipo de la serie, respectivamente. Para evaluar la aptitud de SIMPA para la monitorización de la sequía, se calculó el porcentaje de coincidencia de meses con valores negativos con CCI y LF. Se considera una situación de sequía cuando se produce una desviación, indicada por los valores negativos, con respecto a las condiciones normales (Cammalleri et al. 2017).

3.- Resultados y discusión

A partir de los resultados del análisis de comparación realizado (Tabla 1), se observa que existe una muy buena correlación entre las series de humedad del suelo de la base de datos de SIMPA y las de los otros dos productos. En el caso de CCI para el periodo completo, el coeficiente de correlación (R) oscila entre 0.66 en la cuenca del Miño-Sil y 0.83 en la del Tajo. Cuando se circunscribe el análisis al periodo 2002-2010 que, como se mencionó anteriormente, es el periodo en el que la serie de satélite es más completa, los valores de R suben en todas las cuencas, oscilando entre 0.75 en la del Segura y 0.88 en la del Miño-Sil. El promedio de R en los dos periodos analizados es bastante aceptable, 0.74 y 0.86, respectivamente. En la figura 1 se muestra, a modo de

ejemplo, y por limitaciones de espacio, la evolución de la humedad del suelo en términos de grado de saturación en el caso de una cuenca atlántica (Miño-Sil) y otra mediterránea (Ebro). En general, se observa que el paralelismo en la evolución temporal es considerable, a pesar de que, en algún caso, como ocurre en la cuenca del Ebro, pueda haber discrepancias en la comparación con el producto satelital, sobre todo para valores altos.

Tabla 1. Resultados del análisis de correlación (R, Pearson) de SIMPA con CCI y LF.

Cuenca	SIMPA vs CCI		SIMPA vs LF
	1979-2010	2002-2010	1990-2010
MIÑO-SIL	0.66	0.88	0.96
DUERO	0.79	0.82	0.91
TAJO	0.83	0.86	0.91
GUADIANA	0.78	0.79	0.84
GUADALQUIVIR	0.77	0.84	0.87
SEGURA	0.69	0.75	0.81
JUCAR	0.68	0.81	0.87
EBRO	0.74	0.86	0.93
Promedio	0.74	0.83	0.89

Todos los casos son significativos con $p < 0.01$.

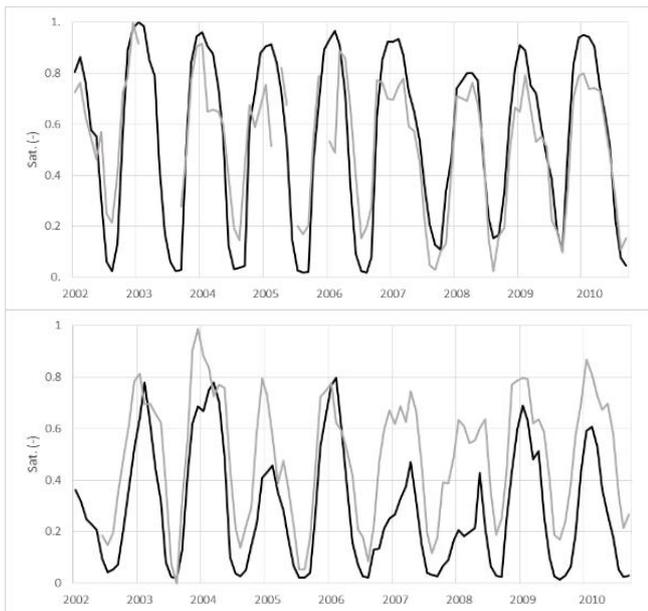


Figura 1. Comparación de las series temporales de humedad del suelo (grado de saturación) de SIMPA (negro) y CCI (gris), de las cuencas del Miño-Sil (arriba) y Ebro (abajo). Periodo 2002-2010.

Con el objeto de analizar las razones que puedan estar detrás de las diferencias encontradas entre las diferentes cuencas, se ha correlacionado el valor de R entre SIMPA y CCI con el porcentaje de usos del suelo (Tabla 2) y se ha visto que existe una relación positiva (0.76) y significativa ($p < 0.05$) con la cantidad de superficie dedicada a agricultura. En el caso de la superficie de bosque la correlación también es alta y, en este caso, negativa, pero

sin significación estadística (-0.69). Por lo tanto, se podría decir que la coincidencia entre SIMPA y CCI es mayor cuanto más superficie agrícola y menos forestal hay en la cuenca. En cualquier caso, resulta complicado establecer una relación causa-efecto concluyente. De hecho, para el periodo 2002-2010 (Fig. 1), el valor más alto de R se da en la del Miño-Sil (Tabla 1). En la estimación de humedad del suelo con sensores de microondas se considera, a priori, que la presencia de cubierta vegetal densa, por encima de un contenido de agua en la vegetación de 4-5 kg/m², dificulta la estimación (Kerr et al. 2016). Esto estaría en consonancia con el hecho de que, para la serie completa, la comparación haya salido peor en las cuencas más forestales que en las más agrícolas, atribuyendo la responsabilidad de las discrepancias al producto satelital más que al modelizado. Sin embargo, en algunos trabajos se ha visto que CCI obtiene muy buenos resultados al validarla en zonas forestales (González-Zamora et al. 2019).

Tabla 2. Porcentaje promedio (1979-2010) de usos del suelo en cada una de las cuencas.

Cuenca	Agrícola	Bosque	Pastizal	Otros
MIÑO-SIL	29.08	62.97	6.37	1.58
DUERO	65.94	22.56	7.83	3.67
TAJO	52.92	27.66	12.09	7.33
GUADIANA	73.86	15.13	4.94	6.07
GUADALQUIVIR	64.46	24.26	2.36	8.91
SEGURA	44.05	25.14	11.11	19.71
JUCAR	45.48	37.53	4.26	12.72
EBRO	54.46	32.01	4.90	8.63

Fuente: ESA CCI Land Cover (v2.07)

En el caso de la comparación entre SIMPA y LF, los resultados son aún mejores (Tabla 1). El valor de R oscila entre 0.81 (Segura) y 0.96 (Miño-Sil). El promedio de todas las cuencas españolas es de 0.93. Parece claro que, aun partiendo de dos enfoques de modelación diferentes, la similitud entre ambas bases de datos es muy alta. La evolución temporal de las series (Fig. 2) pone en evidencia la enorme semejanza entre los dos productos de humedad del suelo. En el ejemplo que se muestra, relativo al grado de saturación, nuevamente se observa que en el caso del Miño-Sil el ajuste es casi perfecto y en el Ebro, aun existiendo un gran paralelismo, hay algunas discrepancias, sobre todo en los valores elevados. Detrás de este peor encaje podría estar también la dificultad y la complejidad que es inherente al funcionamiento de los sistemas hidrológicos mediterráneos (Thornes et al. 2009).

En este caso, no se ha encontrado ninguna correlación significativa entre el ajuste entre SIMPA y LF con el porcentaje de usos del suelo. Por lo tanto, además de encontrar una mayor semejanza entre ambos que la observada con la base de datos satelital, parece que no hay influencia del tipo de uso del suelo predominante en los resultados.

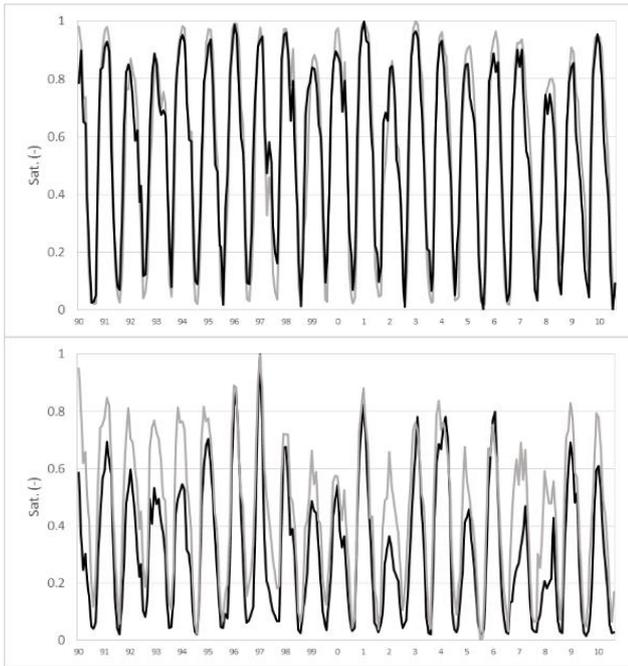


Figura 2. Comparación de las series temporales de humedad del suelo (grado de saturación) de SIMPA (negro) y LF (gris), de las cuencas del Miño-Sil (arriba) y Ebro (abajo). Periodo 1990-2010.

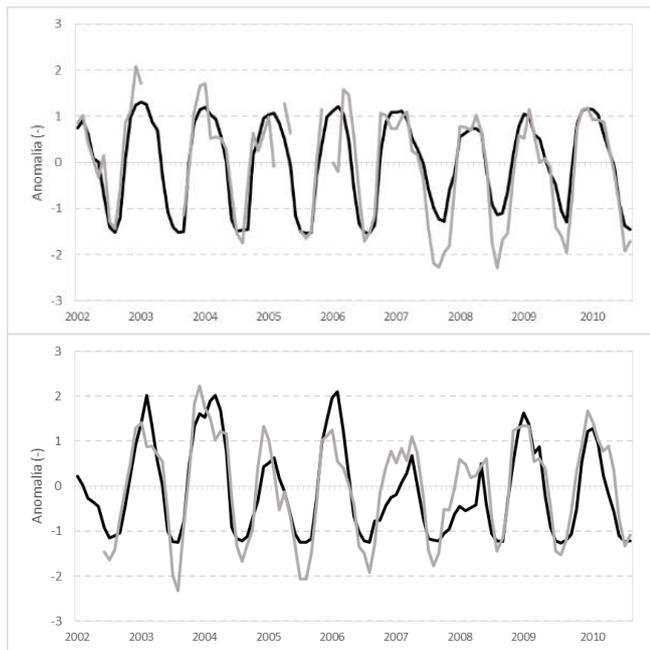


Figura 3. Comparación de las series temporales de anomalías de humedad del suelo de SIMPA (negro) y CCI (gris), de las cuencas del Miño-Sil (arriba) y Ebro (abajo). Periodo 2002-2010.

Otra razón que podría estar detrás de las diferencias encontradas, sería la relacionada con la incertidumbre, ya mencionada, a la hora de precisar la profundidad a la que hace referencia la humedad del suelo de esas bases de datos. De ahí, quizá también, el hecho de que haya una mayor similitud entre los dos productos derivados de la modelación, que entre el del modelo español y la base de datos satelital. En esta última, se considera la zona radicular como el primer metro de profundidad, pues ha sido obtenido

a partir de una metodología (Pablos et al. 2018) que se apoya en una optimización realizada con un producto del satélite SMAP (SMAP L4 *Global 3-hourly 9 km Surface and Root-Zone Soil Moisture*) cuya profundidad es esa misma (Reichle et al. 2017).

Para el análisis comparativo se utilizaron también las series temporales de anomalías de humedad del suelo. Se trata de analizar la aptitud de la base de datos SIMPA para un tipo de aplicación que cada vez tiene más demanda, como es la monitorización de la sequía (Petropoulos y Islam, 2018). Por lo general, este fenómeno natural se ha analizado mediante enfoques basados, fundamentalmente, en variables climáticas (Vicente-Serrano et al. 2010). Sin embargo, gracias a la creciente disponibilidad de bases de datos, la humedad del suelo se está utilizando cada vez con más frecuencia como variable indicadora de la sequía y desde múltiples perspectivas (Martínez-Fernández et al. 2015; Sánchez et al. 2016). Prueba de este interés creciente es su utilización en sistemas de monitorización de la sequía como el europeo (EDO) o el de Estados Unidos (*US Drought Monitor*).

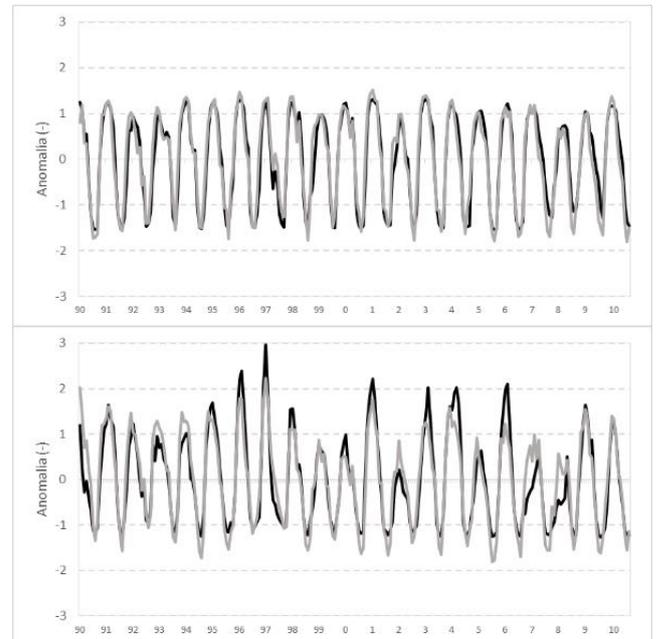


Figura 4. Comparación de las series temporales de anomalías de humedad del suelo de SIMPA (negro) y LF (gris), de las cuencas del Miño-Sil (arriba) y Ebro (abajo). Periodo 1990-2010.

Tanto en el caso de la comparación de las anomalías de SIMPA con las de CCI (Fig. 3), como con las de LF (Fig. 4), el resultado es sumamente satisfactorio. Nuevamente se observa que el ajuste de las series es mejor con LF que con CCI y habría que relacionar ese comportamiento con las razones ya apuntadas. Es de destacar, de igual modo, la gran similitud de la evolución de las series temporales de anomalías entre las dos bases de datos modelizadas, extensible no solo a las dos cuencas elegidas como ejemplo, sino a todas las cuencas analizadas.

Para completar este análisis, se comparó el grado de coincidencia en la determinación de los periodos de

sequía, identificados, en este caso, por los meses en los que el valor de la anomalía es negativo. Por lo que se refiere a la comparación entre SIMPA y CCI, el valor medio de coincidencia entre todas las cuencas es del 87.7% (Tabla 3), y oscila entre el 76% de la del Miño-Sil y el 95.7% de la del Tajo. En el caso de la comparación entre SIMPA y LF los resultados son aún mejores. El promedio de coincidencia para todas las cuencas es del 94.3%, y oscila en cada una de ellas entre el 90.9% de la del Miño-Sil y el 98.3% que comparten las del Duero, Tajo, Guadiana y Guadalquivir.

Tabla 3. Porcentaje de coincidencia en la detección de sequía (anomalías negativas) de SIMPA con CCI y LF.

Cuenca	SIMPA vs CCI	SIMPA vs LF
MIÑO-SIL	76.0	90.9
DUERO	91.2	98.3
TAJO	95.7	98.3
GUADIANA	94.6	98.3
GUADALQUIVIR	95.4	98.3
SEGURA	92.9	97.6
JUCAR	91.7	96.4
EBRO	87.7	94.3
Promedio	90.6	96.5

De nuevo se observa que los dos productos modelizados presentan una mayor similitud. En ambas comparativas, la cuenca atlántica registra valores más bajos que todas las demás. A diferencia de lo que se observaba en relación con las series de humedad del suelo, con las anomalías parece haber un comportamiento distintivo en el caso de la cuenca más húmeda con respecto a las demás, que son eminentemente mediterráneas. De cualquier modo, SIMPA parece mostrar una muy buena efectividad en relación con la monitorización de la sequía.

4.- Conclusiones

En este trabajo ha sido validada la base de datos de humedad del suelo del modelo SIMPA con otras dos bases de datos, una de ellas generada también mediante modelación (LF) y la otra de carácter satelital (CCI). Las series de contenido de agua del suelo SIMPA han mostrado un elevado grado de afinidad con ambas. En el caso de la comparación con CCI la correlación ha sido buena, aunque algo menor que con LF, con la que el coeficiente de correlación ha estado en torno a 0.9 de promedio. El ajuste de las series ha sido, por tanto, muy satisfactorio, sobre todo cuando la humedad se expresa en términos de grado de saturación. Las discrepancias observadas pueden obedecer, por un lado, a la incertidumbre planteada a la hora de establecer la profundidad de referencia de los tres productos y, por otro, a la incidencia que pudiera tener el tipo de uso del suelo y cubierta vegetal, sobre todo en lo que se refiere al producto satelital

El análisis de las series de anomalías ha puesto de manifiesto el buen comportamiento de SIMPA, y su idoneidad para ser utilizada en una aplicación de tanto interés y demanda como es la monitorización de la sequía.

Es, por tanto, una base de datos fiable, tal y como ha quedado demostrado en el análisis realizado en este trabajo. Por consiguiente, tratándose de una base de datos pública, la humedad del suelo de SIMPA podría utilizarse para múltiples aplicaciones, tanto desde el punto de vista científico como técnico, sobre todo si su accesibilidad pudiera ser completa, estuviera disponible con resoluciones espaciales más versátiles y se generara de forma operacional.

Agradecimientos. Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (proyecto ESP2017-89463-C3-3-R) y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) por financiar este estudio. Del mismo modo, agradecen a la *European Space Agency* por el suministro de la base de datos de CCI, al *European Flood Awareness System* por la de Lisflood y al CEDEX por la de SIMPA.

5.- Bibliografía

- Brocca, L., F. Melone, y T. Moramarco, 2008. On the estimation of antecedent wetness conditions in rainfall-runoff modelling. *Hydrological Processes*. 22, 629-642.
- Cammalleri, C., J.V. Vogt, B. Bisselink, y A. de Roo, 2017. Comparing soil moisture anomalies from multiple independent sources over different regions across the globe. *Hydrology and Earth System Sciences*. 21, 6329-6343.
- de Roo, A.P.J., C. Wesseling, y W. van Deussen, 2000. Physically based river basin modelling within a GIS: The LISFLOOD model. *Hydrological Processes*. 14, 1981-1992.
- Dirmeyer, P.A., y S. Halder, 2016. Sensitivity of Numerical Weather Forecasts to Initial Soil Moisture Variations in CFSv2. *Weather and Forecasting*. 31, 1973-1983.
- Dorigo, W., W. Wagner, C. Albergel, F. Albrecht, G. Balsamo, L. Brocca, D. Chung, M. Ertl, M. Forkel, A. Gruber, E. Haas, P.D. Hamer, M. Hirschi, J. Ikonen, R. de Jeu, R. Kidd, W. Lahoz, Y.Y. Liu, D. Miralles, T. Mistelbauer, N. Nicolai-Shaw, R.M. Parinussa, C. Pratola, C. Reimer, R. van der Schalie, S. Seneviratne, T. Smolander, y P. Lecomte, 2017. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*. 203, 185-215.
- Entekhabi, D., R. Reichle, R. Koster, y W.T. Crow, 2010. Performance metrics for soil moisture retrievals and application requirements. *Journal of Hydrometeorology*. 11, 832-840.
- González-Zamora, A., N., Sánchez, J. Martínez-Fernández, y W. Wagner, 2016. Root-zone plant available water estimation using the SMOS-derived Soil Water Index. *Advances in Water Resources*. 96, 339-353.
- González-Zamora, A., N. Sánchez, M. Pablos, y J. Martínez-Fernández, 2019. CCI soil moisture assessment with SMOS soil moisture and in situ data under different environmental conditions and spatial scales in Spain. *Remote Sensing of Environment*. 225, 469-482.
- Kerr, Y. H., J.-P. Wigneron, A. Al Bitar, A. Mialon, y P. K. Srivastava, 2016. Soil moisture from space: techniques and limitations. In Srivastava, P. K., Petropoulos, G. P. & Kerr, Y. H. (Eds.) *Satellite Soil Moisture Retrieval: Techniques and Applications*. Elsevier, pp 3-27.
- Martínez-Fernández, J., A. González-Zamora, N. Sánchez, y A. Gumuzzio, 2015. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. *Journal of Hydrology*. 522, 265-273.
- Mathys, A., N.C. Coops, y R.H. Waring, 2014. Soil water availability effects on the distribution of 20 tree species in western North America.

- Forest Ecology and Management*. 313, 144-152.
- Mohanty, B.P., M.H. Cosh, V. Lakshmi, y C. Montzka, 2017. Soil moisture remote sensing: State-of-the-science. *Vadose Zone Journal*. 16, DOI: 10.2136/vzj2016.10.0105.
- Pablos, M., A. González-Zamora, J. Martínez-Fernández, y N. Sánchez, 2018. Assessment of root zone soil moisture estimations from SMAP, SMOS and MODIS observations. *Remote Sensing*. 10, 981.
- Petropoulos, G.P., y T. Islam, 2018. *Remote sensing of hydro-meteorological hazards*. CRC Press - Taylor & Francis Group. 525 pp.
- Reichle, R.H., G.J.M. De Lannoy, Q. Liu, J.V. Ardizzone, A. Colliander, A. Conaty, W. Crow, T.J. Jackson, L.A. Jones, J.S. Kimball, R.D. Koster, S.P. Mahanama, E.B. Smith, A. Berg, S. Bircher, D. Bosch, T.G. Caldwell, M. Cosh, A. González-Zamora, C.D. Holifield, K.H. Jensen, S. Livingston, E. Lopez-Baeza, J. Martínez-Fernández, H. McNairn, M. Moghaddam, A. Pacheco, T. Pellarin, J. Prueger, T. Rowlandson, M. Seyfried, P. Starks, Z. Su, M. Thibeault, R. van der Velde, J. Walker, X. Wu, y Y. Zeng, 2017. Assessment of the SMAP level-4 surface and root-zone soil moisture product using in situ measurements. *Journal of Hydrometeorology*. 18, 2621–2645.
- Rodríguez-Fernández, N., A. Al Bitar, A. Colliander, y T. Zhao, 2019. Soil moisture remote sensing across scales. *Remote Sensing*. 11, 190. DOI:10.3390/rs11020190.
- Ruiz García, J.M., 1999. *Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos*. CEDEX. Centro de Publicaciones. Ministerio de Fomento. 245 pp.
- Sánchez, N., A. González-Zamora, M. Piles y J. Martínez-Fernández, 2016. A new Soil Moisture Agricultural Drought Index (SMADI) integrating MODIS and SMOS products: a case of study over the Iberian Peninsula. *Remote Sensin..* 8, 287.
- Thielen, J., J. Bartholmes, M-H. Ramos, y A. de Roo, 2009. The European flood alert system – part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13, 125–140.
- Thornes, J.B., F. López-Bermúdez, y J.C. Woodward, 2009. Hydrology, river regimes, and sediment yield. In: Woodward JC (ed.) *The Physical Geography of the Mediterranean*. Oxford: Oxford University Press, 229-253.
- Vicente-Serrano, S.M., S. Beguería, y J.I. López-Moreno, 2010. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI. *Journal of Climate*. 23, 1696-1718.