

TENDENCIAS DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN LA ZONA RADICULAR BAJO DIFERENTES USOS DE SUELO EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

Á. González-Zamora*, L. Almendra-Martín, J. Martínez-Fernández, P. Benito-Verdugo y C.M. Herrero-Jiménez

Instituto Hispano Luso de Investigaciones Agrarias, CIALE, Universidad de Salamanca, Villamayor, 37185, Salamanca, España.
e-mail: aglezzamora@usal.es, web: <http://campus.usal.es/~hidrus/>

RESUMEN. En este estudio se analizan las tendencias de las anomalías de la humedad del suelo en la zona radicular sobre los cuatro usos de suelo mayoritarios sobre la Península Ibérica, utilizando la base de datos obtenida del modelo Lisflood. Para ello se aplicó el test de Mann-Kendall y el método de Sen a varias escalas temporales. Los resultados obtenidos para el periodo completo (1991-2020), a escala diaria, muestran tendencia negativa en los cuatro usos de suelo. Esto se corrobora a escala estacional en verano, otoño e invierno. No así en primavera, donde las zonas agrícolas y de praderas muestran tendencia positiva, mientras que los bosques y las zonas de matorral no reflejaron una tendencia clara.

El análisis del diferente comportamiento de los usos del suelo o cubiertas vegetales en relación con la disponibilidad de agua, puede ser útil para el diseño de estrategias territoriales de adaptación al cambio climático.

ABSTRACT. In this study, trends in root zone soil moisture anomalies were analyzed on the four major land uses over the Iberian Peninsula, using the database obtained from the Lisflood model. For that, the Mann-Kendall test and the Sen's methodology were applied in various time scales. The results obtained for the entire period (1991-2020), on a daily scale, show a clear negative trend in the four different land uses. This was corroborated in the summer, autumn and winter, when the study was carried out on a seasonal scale. This is not the case of spring, where agricultural areas and grasslands show a positive trend, while forests and shrubland areas do not show a clear trend.

The analysis of the different behavior of different land uses or land covers in relation to the water availability, can be useful for the design of territorial strategies for climate change adaptation.

de su tendencia y variabilidad temporal es fundamental para comprender el efecto del cambio climático en los procesos hidrológicos (GCOS, 2010).

En los últimos años, los cambios sufridos por los factores climáticos, como la temperatura y la evapotranspiración, asociados al calentamiento global, han afectado el contenido global de agua del suelo (Albergel et al., 2013). La medida en que ha cambiado esta variable de forma global es una cuestión primordial, relacionada con el cambio climático y su variabilidad (Gaur y Mohanty, 2016). Por esa razón, se trata de un aspecto que despierta gran interés. Dorigo et al. (2012) evaluaron las distribuciones de tendencias para el período 1988-2010 a escala global. Feng y Zhang (2015) en su estudio de tendencias de humedad del suelo a escala global encontraron que aquellas regiones secas se vuelven más secas, mientras que las regiones húmedas se vuelven más húmedas. De igual modo, se han realizado análisis de tendencias similares a escalas regionales (An et al., 2016; Rahmani et al., 2016; Zhan et al., 2017).

Además de que la humedad del suelo tiene una distribución espacial heterogénea, en diferentes estudios también se ha demostrado que el contenido de agua en el suelo no es homogéneo a diferentes escalas temporales (Nie et al., 2008; Yan et al., 2014; Zhang et al., 2018). La distribución espacial de la humedad del suelo promedio a escala estacional, es significativamente diferente a la de la escala anual, debido al predominio de las variaciones estacionales dependientes del clima, que están relacionadas, a su vez, con la fenología y el crecimiento de la vegetación (Yan et al., 2014). Dorigo et al. (2012) obtuvieron patrones de tendencia global a las escalas de tiempo anual y estacional. Los patrones de tendencia global en las escalas de tiempo anual y estacional en ese estudio fueron diferentes, de tal manera que, en algunas áreas, los cambios interanuales que ocurren durante un periodo determinado no fueron consistentes con los cambios que ocurren durante otras estaciones. Este fenómeno también se observó en algunos estudios sobre la dinámica regional de la humedad del suelo en China (Qiu et al., 2016; Chen et al., 2016).

Uno de los aspectos que tienen en común todos los trabajos en los que se estudia la tendencia de la humedad del suelo, ya sea a escala global o escala regional, es la necesidad de utilizar bases de datos con series suficientemente largas. Hoy en día, la humedad del suelo se puede medir o estimar a través de redes de observación *in situ*, teledetección, o utilizando modelos hidrológicos. Sin embargo, debido a la limitada cobertura espacial y temporal de las redes de observación terrestres, para el estudio de tendencias es aconsejable utilizar estimaciones de teledetección o modelización. Sobre la primera opción,

1.- Introducción

La humedad del suelo juega un papel determinante en el intercambio de agua y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera. La información sobre la humedad del suelo es muy importante en muchos campos de estudio, como son, por ejemplo, la agricultura y las ciencias ambientales o la hidrología, en el estudio del crecimiento de la vegetación en ambientes semiáridos (Ahmad et al., 2010), o la estimación del rendimiento del cereal (Green y Erskine, 2004). Teniendo en cuenta su importancia en las Ciencias de la Tierra, la humedad del suelo fue declarada como una de las variables climáticas esenciales en 2010, y el conocimiento

la base de datos de *Climate Change Initiative Soil Moisture* (CCI SM) es la que cuenta con periodo de observaciones más largo, concretamente desde 1978 hasta 2019 (Gruber et al., 2019), pero las lagunas de datos de la serie pueden suponer una limitación para este tipo de aplicaciones (González-Zamora et al., 2019).

En este trabajo se pretende estudiar las tendencias de la humedad del suelo sobre los cuatro usos de suelo o cubierta vegetal mayoritarios de la Península Ibérica: agricultura, bosque, pradera y matorral. Los resultados obtenidos podrán ayudar a comprender de qué manera está afectando el cambio climático a la humedad del suelo en su interacción con la cubierta vegetal, y así poder diseñar diferentes estrategias territoriales en relación con la disponibilidad del agua sobre la Península Ibérica.

2.- Bases de datos y metodología

2.1. Bases de datos

Para este estudio se utilizaron tres bases de datos: una de humedad de suelo, otra de usos de suelo, y una última de precipitación. La primera de ellas corresponde a las estimaciones de la humedad del suelo del modelo Lisflood (de Roo et al., 2000). Este es un modelo hidrológico, de los denominados *rainfall-runoff*, espacialmente distribuido, desarrollado por el *Flood Group of Natural Hazards Project* del *Joint Research Centre* (JRC) de la Comisión Europea. Lisflood proporciona datos diarios desde 1991 hasta nuestros días, para tres capas de suelo, con una resolución espacial de 5x5 km (Thielen et al., 2009). En este trabajo solo se utilizaron las estimaciones de las dos primeras capas, ya que son las que corresponden a los primeros 100 cm de profundidad y, por tanto, con la zona de raíces. Esta base de datos ha sido ampliamente usada y validada en toda Europa, obteniendo buenos resultados en la Península Ibérica (González-Zamora et al., 2021; Martínez-Fernández et al., 2019; Thielen et al., 2009).

En este trabajo se han analizado las tendencias del valor de la anomalía de la humedad del suelo. La anomalía ha sido calculada restando a la serie de cada pixel su climatología anual, calculada a partir del promedio de cada día, utilizando para ello todo el periodo disponible.

Los datos de precipitación fueron obtenidos de la base de datos *Climatic Research Unit gridded Time Series* (CRU TS) v4.04 (Harris et al., 2020). Ésta proporciona datos de precipitación mundial a escala mensual, con una resolución espacial de 0.5° x 0.5°, desde 1901 hasta 2019. La base de datos CRU ha sido ampliamente usada y validada (Dikshit et al., 2020; Haile et al., 2020; Mubialiwo et al., 2020). Para esta base de datos también se analizaron los valores de anomalías, obtenidos de la misma forma que para la humedad del suelo.

La base de datos de usos de suelo corresponde a la generada por la *Climate Change Initiative* (CCI) *Land Cover* de la ESA (*European Space Agency*). Ésta proporciona un mapa mundial de cobertura vegetal con una

resolución espacial de 300 x 300 m. Para crear este mapa, la ESA utilizó una estrategia plurianual y varios sensores satelitales (Bontemps et al., 2015). El mapa describe todas las áreas terrestres clasificadas en 36 categorías de cobertura vegetal diferentes siguiendo la *United Nations Land Cover Classification Scheme*, UNLCCS (Di Gregorio, 2005). Para este estudio, dichos tipos de cobertura vegetal fueron agrupados en cuatro clases diferentes: agricultura, bosques, pradera y matorrales. Dentro de la clasificación de agricultura, se excluyeron las zonas de regadío. Para ello se construyó una máscara usando el *Digital Global Map of Irrigation Areas*, de la *Food and Agriculture Organization* (FAO), con una resolución espacial de 5 minutos de arco (Siebert et al., 2005), de tal forma que la clasificación realizada en el estudio queda como se muestra en la Fig. 1, donde las zonas de agricultura ocupan un 39,1% de la Península Ibérica, las zonas de bosque el 33,1%, de pradera un 5,5% y de matorral un 3,9%.

2.2. Análisis de tendencias

Para evaluar las tendencias se usó el test estadístico no paramétrico de Mann-Kendall (MK), una herramienta muy común en el análisis de tendencias lineales (Mann, 1945; Kendall, 1948). Este test es capaz de detectar el signo de la tendencia de una serie temporal, y establecer su significación estadística. Para ello, se calculan dos parámetros, que son S, el cual expresa el balance total de cambios de la serie temporal, y Z. Este último parámetro se calcula a partir del parámetro S, y determina el signo de la tendencia y su significación para un nivel umbral dado (Yue et al., 2002). En este trabajo se situó el nivel de significación en 0,05, que corresponde con un valor umbral de Z igual a 1,96. Esto quiere decir que, para todos los valores de Z, que en valor absoluto superan ese umbral, su tendencia es significativa. Los valores Z se calcularon para la serie de anomalías de cada píxel.

El test de MK se aplicó a las series diarias de anomalías, primero considerando el periodo completo de estudio, de 1991 hasta 2020, y posteriormente de forma estacional. Además, se realizó un análisis de la evolución del balance anual entre valores de anomalías positivos y negativos. Es decir, se restó el número de días al año con valores de anomalía positivos al número de días al año con valores de anomalía negativos, y se calculó la tendencia de la serie resultante, pixel a pixel. A su vez, para completar al test de MK, se halló la pendiente de las series temporales de anomalías con el método de Sen (2014).

Los resultados obtenidos con cada enfoque se evaluaron para cada uno de los cuatro usos de suelo analizados.

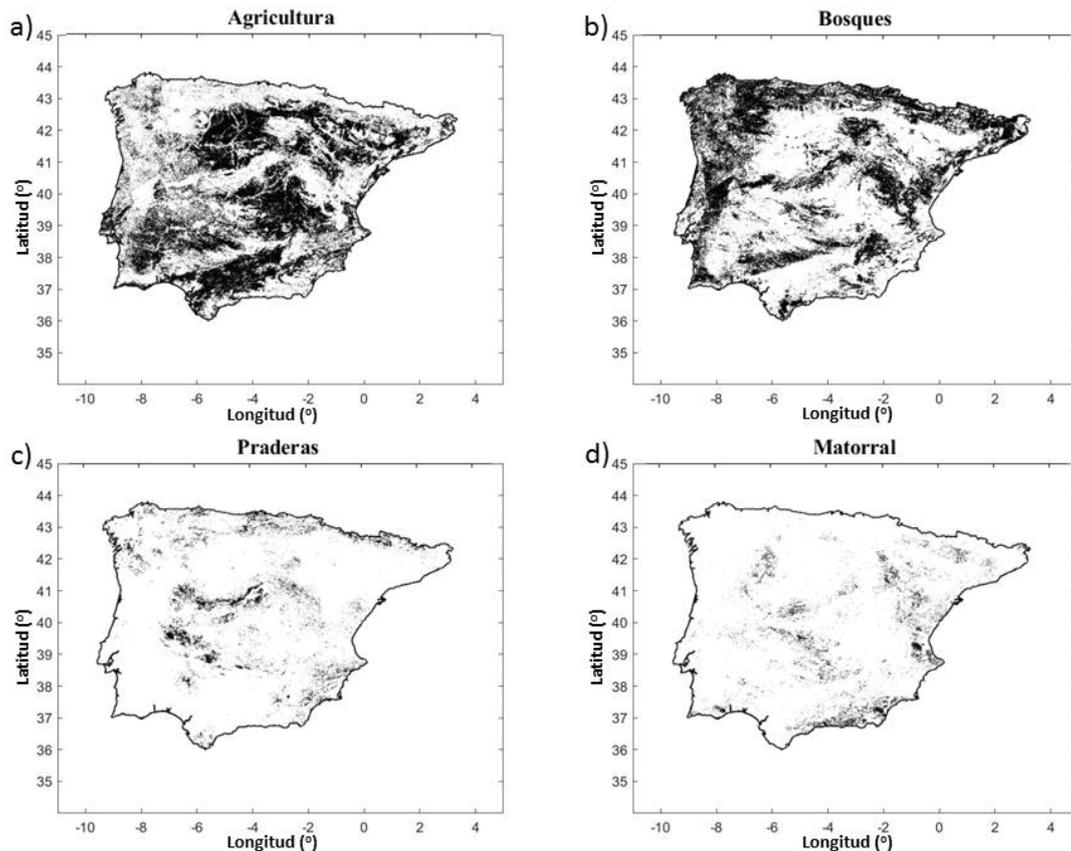


Fig. 1. En negro, la cobertura espacial de los cuatro usos de suelo mayoritarios existentes en la Península Ibérica: a) agricultura, b) bosque, c) pradera y d) matorral.

3.- Resultados y discusión

Los resultados obtenidos con el test de MK para las anomalías de la humedad del suelo en la zona radicular muestran una gran parte del territorio de la Península Ibérica con tendencias significativas (Fig. 2). En ellas se observa un claro predominio de tendencias negativas, aproximadamente el 84%, frente a pequeñas zonas donde la tendencia es positiva, y que suponen el 16%. Las regiones que no muestran ninguna tendencia se localizan en las zonas de transición entre las tendencias positivas y negativas. Estos resultados indican un descenso del contenido de humedad del suelo de forma general en la Península Ibérica en las últimas tres décadas. Este resultado está en línea con los cambios climáticos experimentados en las últimas décadas, debido al aumento de la temperatura provocada por el calentamiento global (Jin y Dickinson, 2002). Además, las zonas en las que se observan las tendencias positivas están en las proximidades de zonas de regadío, como vemos, por ejemplo, en la cuenca del río Guadalquivir o del Ebro (Almendra-Martín et al., 2021).

En los resultados obtenidos dividiendo la zona de estudio por usos de suelo, se observa cómo en las cuatro cubiertas vegetales, el porcentaje de datos significativos supera el 85%, siendo claramente de signo negativo la mayoría de estos datos significativos (Tabla 1). Los usos de suelo con mayor número de píxeles con tendencias negativas son el matorral y pradera, aunque la superficie de estos dos tipos no supera, en total, el 10% de la zona de estudio. Sin embargo, los bosques, localizados mayoritariamente en el

norte y oeste de la península (Fig. 1), suponen el segundo uso de suelo mayoritario, y presenta un porcentaje de tendencias negativas similar a los dos primeros. La mayoría de las tendencias positivas se localizan en zonas de agricultura, aunque la tendencia mayoritaria en este uso de suelo también es negativa (Tabla 1). Estos resultados están en línea con aquellos estudios donde se ha observado que las zonas más afectadas por las sequías son aquellas en las que hay más vegetación (Kogan, 1997).

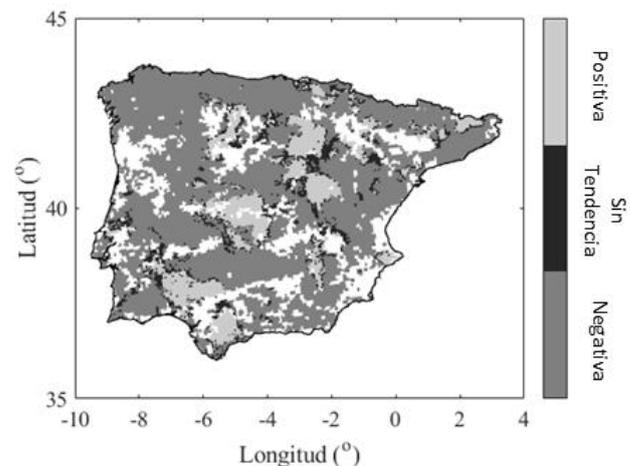


Fig. 2. Resultados obtenidos del análisis de tendencias con el test de MK para las anomalías de la humedad del suelo de la zona radicular para todo el periodo de estudio. Las zonas en blanco corresponden a la máscara de regadío.

Tabla 1. Porcentaje de datos significativos en cada uso de suelo obtenidos con el test de MK.

	Agricultura	Bosque	Pradera	Matorral
Significativos (%)	85,47	93,93	90,92	95,01
Significativos + (%)	20,21	15,87	12,32	11,92
Significativos - (%)	79,79	84,13	87,68	88,08

Tabla 2. Valor del cálculo de la mediana, en ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$)/año, para las pendientes positivas o negativas, y valor de la mediana de Z para todo el periodo de estudio en cada uso de suelo.

	Agricultura	Bosque	Pradera	Matorral
Mediana Pend. Pos.	0,23	0,36	0,34	0,27
Mediana Z Positivos	6,61	10,33	9,54	7,42
Mediana Pend. Neg.	-0,35	-0,62	-0,51	-0,59
Mediana Z Negativos	-10,28	-17,58	-14,41	-17,79

Calculando la mediana de los píxeles con pendientes positivas y negativas por cada uso de suelo, se observa como los resultados son, en valor absoluto, mayores para las tendencias negativas que para las positivas (Tabla 2). Las zonas de bosque son las que obtienen los valores más altos, tanto positivos como negativos, y las zonas agrícolas son las que obtienen valores más bajos. Del análisis de la mediana de los valores de Z (Tabla 2), se observa cómo, en valor absoluto, las tendencias negativas no solo son mayoritarias, como se observa en la figura 2, sino que también son más significativas, siendo en las zonas de bosque y matorral donde este hecho se aprecia de forma más clara.

Realizando el mismo análisis a escala estacional (Fig. 3), se puede ver cómo para el verano, otoño e invierno, se repiten los mismos resultados que se han obtenido para el periodo completo, con porcentajes de resultados significativos muy altos, y predominando más las tendencias negativas que las positivas. Particularmente, en el otoño se observa un predominio de tendencias significativas, por encima del 92% en todos los usos de suelo, y de éstas, las negativas alcanzan en todos los casos el 95%. Esto puede deberse a la modificación temporal que están sufriendo algunas estaciones, como el verano, cuya duración se está incrementando en los últimos años, haciendo que los otoños sean más secos y cortos (Nogueira et al., 2017). Sin embargo, en primavera los resultados obtenidos son muy diferentes. En las zonas agrícolas, con un porcentaje de datos significativos cercano al 80%, se obtuvo una clara tendencia positiva (77,5% positivas frente a 22,5% negativas). En las zonas de pradera, también se observa este cambio en la tendencia, aunque no de forma tan clara (57,4% positivas frente a 42,6% negativas), mientras que, en las zonas de bosque, se obtuvieron porcentajes similares tanto para las tendencias positivas como para las negativas (51% y 49%, respectivamente). En las zonas de matorral se sigue observando que las tendencias negativas son las predominantes en esta estación, con un 53,6%, frente a las tendencias positivas, con un 46,4%. El predominio de las tendencias positivas en primavera puede estar relacionado tanto con el enfriamiento de las zonas agrícolas en Europa en los meses de primavera (Huang et al., 2020), así como la reducción que está sufriendo la evapotranspiración en esta época del año (Ojeda et al., 2020).

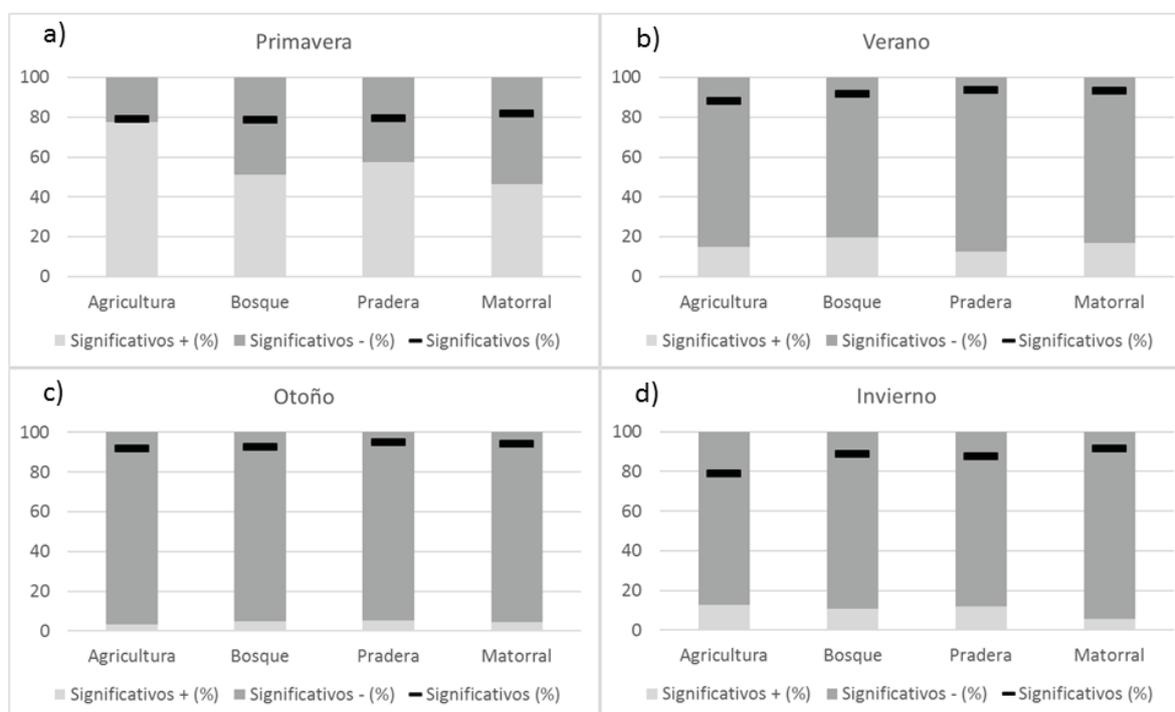
**Fig. 3.** Porcentaje de datos significativos totales, positivos significativos y negativos significativos en cada uso de suelo obtenidos con el test de MK realizado a escala estacional.

Tabla 3. Valor del cálculo de la mediana, en ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$)/año, para las pendientes positivas o negativas, a escala estacional, sobre los cuatro usos de suelo estudiados.

		Agricultura	Bosque	Pradera	Matorral
Primavera	Pend. Pos.	1,84	1,35	1,77	1,47
	Pend. Neg.	-0,97	-1,38	-1,13	-1,79
Verano	Pend. Pos.	0,36	1,24	1,01	0,84
	Pend. Neg.	-0,76	-0,20	-0,13	-0,17
Otoño	Pend. Pos.	0,90	0,90	0,13	0,12
	Pend. Neg.	-0,24	-0,43	-0,34	-0,35
Invierno	Pend. Pos.	0,95	0,12	0,11	0,99
	Pend. Neg.	-0,22	-0,25	-0,26	-0,41

El análisis de la pendiente de las series temporales de anomalías a escala estacional (Tabla 3), muestra cómo en primavera, en las zonas agrícolas y de praderas, además de predominar las tendencias positivas (Fig. 3), la pendiente es de mayor magnitud. Por el contrario, en verano se puede ver cómo las pendientes de signo positivo en bosque, pradera y matorral, son mayores que las negativas, sin embargo, en las zonas agrícolas las pendientes negativas son mayores que las positivas. En otoño y en invierno se puede apreciar cómo, las pocas pendientes positivas que hay, muestran una tasa de cambio mayor para agricultura. No obstante, de los resultados mostrados se desprende que la tasa de cambio media es, en general, moderada. Las magnitudes obtenidas implican un cambio total en los 30 años analizados para este estudio, del orden de $0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Tabla 4. Resultados del cálculo de la mediana de los valores de Z positivos y negativos a escala estacional, sobre los cuatro usos de suelo estudiados.

		Agricultura	Bosque	Pradera	Matorral
Primavera	Positivos	6.34	5.95	6.16	5.66
	Negativos	-4.95	-7.07	-5.70	-7.97
Verano	Positivos	6.22	9.29	7.39	7.24
	Negativos	-11.06	-13.80	-13.41	-15.88
Otoño	Positivos	4.79	4.65	4.96	4.88
	Negativos	-7.70	-12.62	-10.25	-10.44
Invierno	Positivos	4.65	7.45	6.77	5.17
	Negativos	-6.89	-10.78	-8.63	-12.56

Tabla 5. Valores de Z obtenidos usando el test de MK en el análisis de la evolución del balance anual entre valores de anomalías positivos y negativos (* significativos).

	Agricultura	Bosque	Pradera	Matorral
Periodo completo	-1.39	-2.71*	-2.82*	-2.78*
Primavera	0.71	0.11	0.18	-0.07
Verano	-1.25	-1.75	-2.32*	-2.39*
Otoño	-2.18*	-3.10*	-3.07*	-2.96*
Invierno	-0.75	-2.03*	-1.75	-2.11*

El cálculo de la mediana de los valores de Z positivos y negativos hecho por estaciones (Tabla 4), también mostró que las anomalías negativas son más destacadas que las positivas en los periodos de verano, otoño e invierno. En primavera, es en las zonas de bosque y de matorral donde los resultados siguen la misma línea, mientras que en las zonas de agricultura y de pradera, las anomalías son más positivas.

En el análisis de la evolución del balance anual entre valores de anomalías positivos y negativos (Tabla 5), se muestra cómo, con esta metodología, se obtienen similares resultados a los obtenidos con el análisis de los valores diarios de las anomalías de humedad del suelo en la zona radicular. En el estudio del periodo completo, el valor de Z es negativo para los 4 tipos de uso de suelo estudiados, siendo significativo en los casos de bosque, pradera y matorral.

En el análisis a escala estacional (Tabla 5), en verano, otoño e invierno los valores de Z son negativos en todos los casos. En otoño se vuelve a observar cómo las tendencias negativas de la humedad del suelo en la zona radicular son de mayor magnitud, obteniendo resultados significativos para todos los usos de suelo, mientras, en el resto de estaciones no ocurre del mismo modo. En primavera, tanto agricultura como bosque y pradera, obtuvieron un valor de Z positivo, siendo en el primero de los usos de suelo el valor más alto de los tres, aunque sin significación. En las zonas de matorral, el valor de Z es cercano a cero, y sin significación, siendo este el único caso de todos los periodos temporales en los que el resultado no es significativo.

De cara a determinar el comportamiento de una variable con la que la humedad del suelo está muy relacionada, se realizó el análisis de tendencias con el test de MK a la base de datos de precipitación, a escala mensual, para el periodo completo y por estaciones. Los resultados mostraron que para esta variable no se registró ningún cambio significativo en el periodo de estudio. La diferencia entre la escala diaria y la escala mensual de ambas bases de datos puede influir en la detección de tendencias (Pan et al., 2019). Sin embargo, estos resultados ya se han observado en otros trabajos (Pan et al., 2019). Por tanto, si la lluvia no ha experimentado ningún cambio a lo largo de las últimas décadas, pero la temperatura ha registrado un incremento constante, se espera una evolución negativa del balance hídrico del suelo (Paniagua et al., 2019). Los resultados obtenidos en este estudio confirman un notable aumento de la aridez edáfica sobre la Península Ibérica.

4.- Conclusiones

En este trabajo se ha realizado un exhaustivo estudio de las tendencias de las anomalías de la humedad del suelo en la zona radicular sobre la Península Ibérica, desde 1991 hasta 2020.

De los resultados obtenidos para el periodo completo, no se observaron diferencias destacables entre ninguno de los usos de suelo estudiados, y sí un claro predominio de

tendencias negativas sobre toda la península. Al hacer el análisis a escala estacional, se obtuvo un patrón en la línea de estos resultados, salvo para las zonas agrícolas en los meses de primavera, donde se observó una clara tendencia positiva de las anomalías de la humedad del suelo. El enfriamiento de las temperaturas en las zonas agrícolas unido a la disminución de la evapotranspiración en esta estación, podrían estar relacionados con este comportamiento.

En el análisis de tendencias realizado sobre la precipitación, no se observó ninguna tendencia ni positiva ni negativa, tanto en el periodo completo como a escala estacional. Lo que da a entender que la humedad del suelo tiene una tendencia negativa debido a otras variables afectadas por el cambio climático relacionadas con el balance energético y, por ello, con la evaporación.

Los resultados expuestos en este trabajo pueden ayudar a entender algo más los efectos que está teniendo, y puede llegar a tener el cambio climático sobre la Península Ibérica, de tal modo que se puedan implementar medidas de adaptación frente a ese preocupante escenario ambiental.

Agradecimientos. Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España (Proyecto ESP2017-89463-C3-3-R), la Junta de Castilla y León (Proyecto SA112P20), el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y el proyecto Unidad de Excelencia CLU-2018-04, cofinanciado por FEDER y la Junta de Castilla y León.

5.- Bibliografía

- Ahmad, S., A. Kalra, y H. Stephen, 2010. Estimating soil moisture using remote sensing data: a machine learning approach. *Adv. Water Resour.* 33(1), 69–80.
- Albergel, C., W. Dorigo, R. Reichle, G. Balsamo, P. de Rosnay, J. Muñoz-Sabater, L. Isaksen, R. de Jeu, y W. Wagner, 2013. Skill and global trend analysis of soil moisture from reanalyses and microwave remote sensing. *J. Hydrometeorol.* 14, 1259–1277.
- Almendra-Martín, L., J. Martínez-Fernández, A. González-Zamora, P. Benito-Verdugo, y C.M. Herrero-Jiménez, 2021. Agricultural Drought Trends on the Iberian Peninsula: an analysis using modeled and reanalysis soil moisture products. *Atmosphere* 12, 236.
- An, R., L. Zhang, Z. Wang, J.A. Quaye-Ballard, J. You, X. Shen, W. Gao, L. Huang, Y. Zhao, y Z. Ke, 2016. Validation of the ESA CCI soil moisture product in China. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 8, 28–36.
- Bontemps, S., M. Boettcher, C. Brockmann, G. Kirches, C. Lamarche, J. Radoux, M. Santoro, E. Van Bogaert, U. Wegmüller, y M. Herold, 2015. Multi-year global land cover mapping at 300 m and characterization for climate modelling: achievements of the land cover component of the ESA Climate Change Initiative. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XL-7/W3, 323–328.
- Chen, X., Y. Su, J. Liao, J. Shang, T. Dong, C. Wang, W. Liu, G. Zhou, y L. Liu, 2016. Detecting significant decreasing trends of land surface soil moisture in eastern China during the past three decades (1979–2010). *J. Geophys. Res. Atmos.* 121, 5177–5192.
- de Roo, A., C.G. Wesseling, y W.P.A. van Deursen, 2000. Physically based river basin modelling within a GIS: The LISFLOOD model. *Hydrol. Process* 14, 1981–1992.
- Di Gregorio, A. 2005. Land cover classification system: classification concepts and user manual: LCCS Food Agric. Organ, 2.
- Dikshit, A., B. Pradhan, y A.M. Alamri, 2020. Short-Term Spatio-Temporal Drought Forecasting Using Random Forests Model at New South Wales, Australia. *Appl. Sci.* 10(12), 4254.
- Dorigo, W., R. De Jeu, D. Chung, R. Parinussa, Y. Liu, W. Wagner, y D. Fernández-Prieto, 2012. Evaluating global trends (1988–2010) in homogenized remotely sensed surface soil moisture. *Geophys. Res. Lett.* 39, L18405.
- Feng, H., y M. Zhang, 2015. Global land moisture trends: drier in dry and wetter in wet overland. *Sci. Rep.* 5, 18018.
- Gaur, N., y B.P. Mohanty, 2016. Land-surface controls on near-surface soil moisture dynamics: Traversing remote sensing footprints. *Water Resour. Res.* 52, 6365–6385.
- GCOS Secretariat, Implementation plan for the Global Observing System for Climate in support of the UNFCCC, 2010. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- 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 Sens. Environ.* 225, 469–482.
- González-Zamora, A., L. Almendra-Martín, M. de Luis, y J. Martínez-Fernández 2021. Influence of Soil Moisture vs. Climatic Factors in Pinus halepensis Growth Variability in Spain: A Study with Remote Sensing and Modeled Data. *Remote Sens.* 13, 757.
- Green, T., y R. Erskine, 2004. Measurement, scaling, and topographic analyses of spatial crop yield and soil water content. *Hydrol. Process.* 18(8), 1447–1465.
- Gruber, A., T. Scanlon, R. van der Schalie, W. Wagner, y W. Dorigo, 2019. Evolution of the ESA CCI Soil Moisture climate data records and their underlying merging methodology. *Earth Syst. Sci. Data* 11, 717–73.
- Haile, G.G., Q. Tang, S.M. Hosseini-Moghari, X. Liu, T.G. Gebremicael, G. Leng, A. Kebede, X. Xu, y X. Yun, 2020. Projected impacts of climate change on drought patterns over East Africa. *Earths Future* 8(7), e2020EF001502.
- Harris, I., T.J. Osborn, P. Jones, y D.H. Lister, 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. Data* 7, 109.
- Huang, B., X. Hu, G.A., Fuglstad, X. Zhou, W. Zhao, y F. Cherubini 2020. Predominant regional biophysical cooling from recent land cover changes in Europe. *Nature communications*, 11(1), 1–13.
- Jin, M., y R.E. Dickinson, 2002. New observational evidence for global warming from satellite. *Geophys. Res. Lett.* 29(10), 39–1.
- Kendall, M.G., 1948. Rank Correlation Methods; Griffin: London, UK.
- Kogan, F.N., 1997. Global drought watch from space. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78(4), 621–636.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, 245–259.
- Martínez-Fernández, J., L. Almendra-Martín, M. de Luis, A. González-Zamora, y C.M. Herrero-Jiménez 2019. Tracking tree growth through satellite soil moisture monitoring: A case study of Pinus halepensis in Spain. *Remote Sens. Environ.* 235, 111422.
- Mubialiwo, A., C. Onyutha, y A. Abebe, 2020. Historical Rainfall and Evapotranspiration Changes over Mpologoma Catchment in Uganda. *Adv. Meteorol.* 2020, 8870935.
- Nie, S., Y. Luo, y J. Zhu, 2008. Trends and scales of observed soil moisture variations in China. *Adv. Atmos. Sci.* 25, 43–58.
- Nogueira, C., M.N. Bugalho, J.S. Pereira, y M.C. Caldeira, 2017. Extended autumn drought, but not nitrogen deposition, affects the diversity and productivity of a Mediterranean grassland. *Environ. Exp. Bot.*, 138, 99–108.
- Pan, N., S. Wang, Y. Liu, W. Zhao, y B. Fu, 2019. Global surface soil moisture dynamics in 1979–2016 observed from ESA CCI SM dataset. *Water*, 11(5), 883.
- Paniagua, L.L., A. García-Martín, F.J. Moral, y F.J. Rebollo, 2019. Aridity in the Iberian Peninsula (1960–2017): Distribution, tendencies, and changes. *Theor. Appl. Climatol.* 138, 811–830.
- Qiu, J., Q. Gao, S. Wang, y Z. Su, 2016. Comparison of temporal trends from multiple soil moisture data sets and precipitation: The implication of irrigation on regional soil moisture trend. *Int. J. Appl. Earth Obs.* 48, 17–27.
- Ojeda, M.G.V., J.J. Rosa-Cánovas, E. Romero-Jiménez, P. Yeste, S.R. Gámiz-Fortis, Y. Castro-Diez, y M.J. Esteban-Parra, 2020. The role of the surface evapotranspiration in regional climate modelling: Evaluation and near-term future changes. *Atmos. Res.* 237, 104867.
- Rahmani, A., S. Golian, y L. Brocca, 2016. Multiyear monitoring of soil moisture over Iran through satellite and reanalysis soil moisture

- products. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 48, 85–95.
- Şen, Z. (2014). Trend identification simulation and application. *J. Hydrol. Eng.*, 19(3), 635-642.
- Siebert, S., P. Döll, J. Hoogeveen, J.M. Faures, K. Frenken, y S. Feick, 2005. Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 9, 535–547.
- Thielen, J., J. Bartholmes, M.H. Ramos, y A. de Roo, 2009. The European Flood Alert System-Part 1: Concept and development. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13, 125–140.
- Yin, J., A. Porporato, y J. Albertson, 2014. Interplay of climate seasonality and soil moisture-rainfall feedback. *Water Resour. Res.* 50, 6053–6066.
- Yue, S., P. Pilon, y G. Cavadias 2002. Power of the Mann–Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol.* 259, 254-271.
- Zhan, M., Y. Wang, G. Wang, H. Hartmann, L. Cao, X. Li, y B. Su, 2017. Long-term changes in soil moisture conditions and their relation to atmospheric circulation in the Poyang Lake basin, China. *Quatern. Int.* 440, 23–29.
- Zhang, H., J. Chang, L. Zhang, Y. Wang, Y. Li, y X. Wang, 2018. NDVI dynamic changes and their relationship with meteorological factors and soil moisture. *Environ. Earth Sci.* 77, 582.