

EXPLORACIÓN DEL IMPACTO DEL CLIMA, USO Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO EN LA PROPAGACIÓN DE LA SEQUÍA EN EL SISTEMA SUELO-ATMÓSFERA

J. Gaona^{1,2*}, P. Quintana-Seguí¹, J. Martínez-Fernández, P. Benito Verdugo², L. Almendra-Martín²,
Á. González-Zamora², C.M. Herrero-Jiménez², M.J. Escorihuela³

¹Observatori de l'Ebre (OE), Universidad Ramón Llull - CSIC, C/Horta alta 38, 43520. Roquetes, Tarragona. e-mail: jgaona@obsebre.es / jaimegaona@usal.es, web: <http://www.obsebre.url.edu/es/proyectos-hidrologia-y-cambio-climatico/930-humid>

²Grupo de Investigación en Recursos Hídricos (HIDRUS), Centro Hispano-Luso de Investigaciones Agrarias (CIALE) - Universidad de Salamanca-Parque científico, Campus de Villamayor, C/ Del Duero, 12. 37185 Villamayor, Salamanca. e-mail: jaimegaona@usal.es, web: <http://campus.usal.es/~hidrus>

³isardSAT, Parc Tecnològic - Barcelona Activa, Barcelona. <https://www.isardsat.cat/ca>

RESUMEN. El estudio analiza la influencia de las propiedades del suelo de la base de datos ECOCLIMAP en la propagación de sequías que determinan los desfases temporales entre anomalías de lluvia, evapotranspiración y humedad del suelo. Los índices de sequía *Standardized Precipitation Index* (SPI), *Evapotranspiration Deficit Index* (ETDI), y *Soil Moisture Deficit Index* (SMDI) estimados con el modelo físico SURFEX-ISBA y con los productos de teledetección MOD16A2ET y SMOS1km identifican tales anomalías. Las diferencias en la correlación temporal entre los índices de sequía de áreas con distintas propiedades y/o cobertura del suelo revelan el efecto individual de varias propiedades de suelo en los desfases entre índices y se interpretan en clave de la propagación de la sequía desde la atmósfera hasta la zona no saturada. Los resultados además resaltan la capacidad de la teledetección y los modelos físicos para simular procesos sin observaciones directas o de difícil estimación.

ABSTRACT. This study evaluates the influence of soil properties and cover from the database ECOCLIMAP in the propagation of drought determined by temporal lags of rainfall, evapotranspiration and soil moisture anomalies. The *Standardized Standardized Precipitation Index* (SPI), the *Evapotranspiration Deficit Index* (ETDI), and the *Soil Moisture Deficit Index* (SMDI) as indicators of the anomalies are estimated with the land-surface model SURFEX-ISBA and the remote sensing products MOD16A2ET and SMOS1km. The differences in the temporal correlation between the drought indices in areas of unequal soil properties and land cover reveal the main effect of some of the soil characteristics on the lags between indices, which is useful for the interpretation of drought propagation from the atmospheric to the vadose zone level.

1.- Introducción

El análisis de las sequías en la Península Ibérica ha dedicado tradicionalmente atención a los procesos de sequía en niveles concretos del sistema suelo-atmósfera como el atmosférico (lluvia, temperatura-olas de calor) y el de la zona no saturada (p.ej. humedad del suelo).

Sin embargo, la interacción entre las anomalías causantes de sequía en los diferentes niveles apenas ha sido explorada, pese a ser de gran relevancia para comprender los mecanismos de propagación de la sequía. Más allá de la identificación de los periodos de sequía y sus características, el análisis de los periodos de interacción y la magnitud entre las anomalías a diferentes niveles, atmosférico (lluvia), superficial (evapotranspiración) y de la zona no saturada (humedad del suelo), puede revelar secuencias de interacción entre anomalías que determinan la evolución de la sequía.

Las características físicas del suelo constituyen factores de impacto en las interacciones que han sido poco explorados. El paulatino incremento y mejora de las bases de datos de características físicas del suelo permite, junto con las crecientes capacidades de los modelos físicos y los productos de teledetección, explorar la influencia de la textura, profundidad de suelo y de cubierta vegetal (o uso de suelo) en las interacciones.

Este trabajo busca analizar las diferencias en las interacciones temporales entre anomalías de lluvia, evapotranspiración y humedad de suelo en el periodo 2010-2017 que experimentan regiones de la Cuenca del Ebro con distintas propiedades del suelo, como la textura, profundidad y uso del suelo, según las bases de datos ECOCLIMAP (Faroux et al., 2013). El estudio compara zonas con todas las variables comunes (clima, características y uso del suelo) con zonas que comparten todas menos una de las variables físicas, lo que permite observar el impacto individual de cada variable en las interacciones temporales entre anomalías. Un ejemplo sería el cambio en el desfase entre la anomalía de lluvia y la de humedad del suelo.

Las anomalías se identifican por medio de índices de sequía específicos para las variables representativas de cada nivel del sistema suelo-atmósfera como el *Standardized Precipitation Index* (SPI) (McKee et al., 1993) para la lluvia, el *Evapotranspiration Deficit Index* (ETDI) (Narasimhan and Srinivasan, 2005) para la evapotranspiración, y el *Soil Moisture Deficit Index* (SMDI) (Narasimhan and Srinivasan, 2005) para la humedad del suelo. El uso del índice ETDI en España es inédito, mientras que el SMDI ya ha sido aplicado en

monitorización de sequías (Martínez-Fernández et al., 2016). Las series de lluvia, utilizadas para calcular el índice SPI de sequía se toman de las simulaciones de SURFEX-ISBA (Masson et al., 2013; Noilhan and Platon, 1989; Noilhan and Mahfouf, 1996) validadas para la Península Ibérica (Quintana-Seguí et al., 2016, 2017).

El estudio busca (a) identificar características de la cuenca influyentes en la sincronía entre anomalías que determina la propagación de la sequía desde el medio atmosférico hacia el terrestre y viceversa, y (b) mostrar la utilidad de los datos de teledetección para generar series temporales de variables relevantes para la zona no saturada, como evapotranspiración y humedad del suelo, raramente disponibles.

2.- Caso de estudio, datos y metodología

La zona de estudio es la Cuenca del Ebro, cuenca hidrológica de interesantes contrastes en altitud, geología y usos del suelo, así como diversas influencias climáticas. Gracias al amplio rango de características físicas de la cuenca es posible encontrar múltiples zonas con características físicas comunes, y con todas ellas menos una comunes, donde evaluar el impacto del factor no común en la propagación de las sequías.

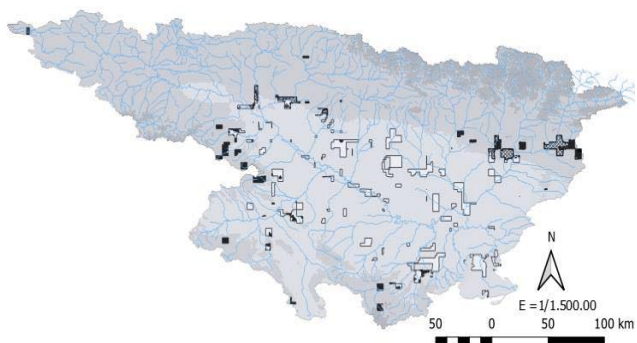


Fig. 1. Ejemplo de áreas seleccionadas en la Cuenca del Ebro para la evaluación del impacto de una característica física en la propagación de la sequía. Los polígonos seleccionados son áreas que teniendo distinto clima Cfb (negro), Cfa (rayado) y BSk (blanco) comparten todas menos una de las variables físicas evaluadas: misma textura (L) y uso del suelo (7MS). El fondo de colores de la cuenca ilustra de claro a oscuro el gradiente climático de la cuenca desde el centro hacia su borde montañoso.

Las tres variables evaluadas (tipo climático, textura de suelo y uso del suelo) provienen de distintas bases de datos. Los tipos climáticos (según clasificación de Köppen-Geiger a escala 1x1 km) provienen de la base de datos global a escala 1x1 km (Beck et al., 2018). El estudio se centra en los tres tipos climáticos dominantes de la región que son BSk en la parte esteparia de la cuenca, Cfb en el noroeste subhúmedo y Cfa en el noreste continental de la cuenca. La B de BSk define clima seco, las C de Cfb y Cfa, clima templado. Se considera el tipo de clima BSk como de tipo oceánico al estar mayormente definido por las advecciones oceánicas en contraste con el Cfa, más influidos por la recirculación de humedad continental. La base de datos

ECOCLIMAP (Faroux et al., 2013) que alimenta el modelo físico SURFEX provee datos de la textura, profundidad y uso del suelo a escala global con resolución 1x1 km (Tabla 1). En este estudio se adopta los datos de textura de suelo de ECOCLIMAP (expresados en ternas: %arena, %limo, % arcilla) en suelo tipo según la clasificación del U.S. Department of Agriculture (USDA). Los tipos USDA contemplados son el de arcilla (C), arcilla-limo (CL) y limo (L).

Tabla 1. Tabla de bases de datos y características físicas analizadas.

GloH2O	ECOCLIMAP		
Clima (Köppen-Geiger)	Uso del suelo (tipo)	Profundidad del suelo (m)	Textura del suelo (USDA)
Bsk	Desarbolado mediterráneo	1.25 (más extendida)	Arcilla
Cfa	Cultivo mediterráneo		Arcilla-Limo
Cfb	Cultivo templado		Limo

Tabla 2. Combinaciones de factores analizadas en el estudio.

	Clima (Köppen)	Textura de suelo (ECOCLIMAP s/ tipos USDA)	Uso de suelo (ECOCLIMAP)
1	BSk	CL	7MS desarbolado mediterráneo
2	BSk	CL	8TC cultivos templados
3	BSk	CL	9MC cultivos mediterráneos
4	BSk	L	7MS desarbolado mediterráneo
5	BSk	L	8TC cultivos templados
6	BSk	L	9MC cultivos mediterráneos
7	BSk	C	7MS desarbolado mediterráneo
8	BSk	C	8TC cultivos templados
9	BSk	C	9MC cultivos mediterráneos
10	Cfb	CL	7MS desarbolado mediterráneo
11	Cfb	CL	8TC cultivos templados
12	Cfb	CL	9MC cultivos mediterráneos
13	Cfb	L	7MS desarbolado mediterráneo
14	Cfb	L	8TC cultivos templados
15	Cfb	L	9MC cultivos mediterráneos
16	Cfb	C	7MS desarbolado mediterráneo
17	Cfb	C	8TC cultivos templados
18	Cfb	C	9MC cultivos mediterráneos
19	Cfa	CL	7MS desarbolado mediterráneo
20	Cfa	CL	8TC cultivos templados
21	Cfa	CL	9MC cultivos mediterráneos
22	Cfa	L	7MS desarbolado mediterráneo
23	Cfa	L	8TC cultivos templados
24	Cfa	L	9MC cultivos mediterráneos
25	Cfa	C	7MS desarbolado mediterráneo
26	Cfa	C	8TC cultivos templados
27	Cfa	C	9MC cultivos mediterráneos

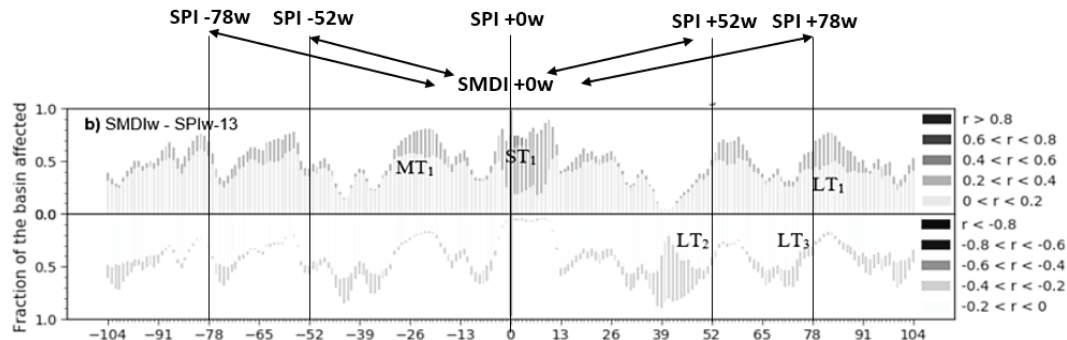


Fig. 2. Ejemplo de análisis de la correlación temporal de ventana móvil (24 meses) entre índices de sequía. El ejemplo ilustra las correlaciones positivas y negativas entre el índice SPI y el SMDI para un rango de desfases temporales desde -52 a +52 semanas. Las correlaciones de los desfases entre índices se obtienen desfasando el SMDI i semanas en relación al SPI. La escala de grises representa el nivel de correlación desde menos correlación (más claro) hasta más correlación (más oscuro). Las correlaciones son positivas en la mitad superior del eje de abscisas (correlación r Pearson) y negativas para la mitad inferior. Correlaciones positivas indican sincronismo entre índices. ST_1 , MT_1 y LT_1 identifican periodos de alta correlación positiva entre los índices a corto plazo, medio y largo plazo respectivamente, mientras MT_2 y LT_3 identifican los correspondientes periodos de largo plazo para las correlaciones negativas.

Entre las texturas de suelo, arcilla-limo y limo son las clases más extendidas en el área de estudio. La clase arcilla es la menos común y tanto limo-arena y arena apenas ocupan superficie en la cuenca. Se adopta para el estudio la profundidad de suelo más extendida, que es de 1.25 m, y se asume invariante para el resto de análisis comparativos.

Las coberturas de suelo forestales limitan mucho las áreas disponibles para la comparación de factores por lo que se han seleccionado las correspondientes a vegetación dispersa en ambiente mediterráneo (7MS) y cultivos de secano templados (9MC) y mediterráneos (8TC), como usos de suelo mayoritarios en la cuenca.

Para analizar el impacto de los cambios de los factores expresados en la Tabla 2 se analizan los cambios en las correlaciones temporales entre las series de índices de sequía mencionados. Los productos de teledetección MOD16A2ET (Mu et al., 2013, Running et al., 2017) y SMOS1km (Merlin et al., 2013) proporcionan, respectivamente, las series de evapotranspiración y humedad del suelo necesarias para calcular las series de los índices ETDI y SMDI. Las correlaciones entre índices han sido calculadas a escala semanal, para el periodo 2010-2017, para el rango temporal de entre -52 (precedencia) y 52 semanas (o desfases en la influencia de un índice sobre otro). El coeficiente de correlación de Pearson define la magnitud de la correlación y el signo. Correlación positiva (negativa) indica sincronía (asincronía) de los signos de las anomalías de lluvia, evapotranspiración y humedad de suelo.

3.- Resultados

Los resultados se describen en torno a las dos principales interacciones entre índices de sequía: SPI-ETDI, SPI-SMDI. Estas dos interacciones cubren el rango completo de interacciones entre el nivel atmosférico y el de la zona no saturada. En todas las interacciones en que interviene el SPI se usa el SPI-3 como referencia (indicado en semanas como SPIw13).

Los resultados de las correlaciones SPIw13-ETDI para el conjunto de la cuenca muestran la esperable respuesta de la evapotranspiración retrasada respecto a las lluvias a corto y muy corto plazo (primeras semanas hasta varios meses tras las anomalías de lluvia). Estas correlaciones positivas entre SPIw13 y ETDI en el corto plazo ocurren en todos los tipos de uso y textura de suelo, si bien más concentrados en el muy corto plazo (0-9 semanas) para los climas continentales (Cfa) que para los oceánicos (Cfb, BSk).

Los resultados de las ventanas de correlación de la Fig. 3 muestran un segundo pico de correlaciones que define una precedencia de las anomalías de evapotranspiración sobre las de lluvia en los seis meses anteriores a las anomalías de lluvia. Esta precedencia muestra diferencias entre el tipo de clima. Los climas oceánicos (BSk y Cfb) muestran un doble pico de correlaciones positivas: el, de retraso (0 a +13 semanas) y el de precedencia (-26 a 0 semanas), mientras el más continental (Cfa) muestra un solo pico de correlación centrado en el pico de retraso, invariable a los cambios en el uso y textura del suelo (Fig. 3, series de correlación de climas BSk y Cfb frente a los de Cfa).

La comparación de las series de correlaciones de distintos usos de suelo (7 Mediterráneo desarbolado, 8 Cultivos templados, 9 Cultivos mediterráneos) muestra que tipos de uso de suelo similares (desarbolado frente a cultivos) registran sólo ligeras diferencias en la distribución de las correlaciones. Los resultados de las ventanas de correlación de la Fig. 3 indican que los usos de suelo no tienen tanta influencia en la distribución de correlaciones positivas SPIw13-ETDI como en las negativas. La distribución de las correlaciones negativas cambia más de rango temporal y en magnitud de la correlación entre los tipos de textura de suelo (especialmente cuanto más gruesa es la textura) y tipo climático (más cuanto más templado es el clima) que en relación con cambios de uso de suelo.

Los resultados del análisis de correlaciones entre los índices SPIw13-SMDI muestran predominantemente un

sólo pico de correlación relevante, el de retraso de las anomalías de humedad del suelo respecto a las de lluvia en el corto plazo, en vez de mostrar el pico doble de correlaciones positivas visible en la Fig. 3 para los climas BSk y Cfb del caso del análisis SPIw13-ETDI. Los resultados del análisis de correlaciones SPIw13-SMDI muestran mayor grado de variabilidad que en el caso del de SPIw13-ETDI debido a la interacción entre los factores de influencia uso de suelo y textura de suelo. Este resultado es coherente con el hecho de que tanto el uso del suelo como la textura del mismo tienen una relación más estrecha con los procesos que ocurren en el nivel de la zona no saturada (como la interacción SPIw13-SMDI) que con el nivel atmosférico (interacción SPIw13-ETDI).

El tipo de clima muestra de nuevo gran influencia en la distribución de las correlaciones positivas a lo largo de la

ventana de análisis de los desfases (de -104 a +104 semanas, equivalentemente a de -24 a 24 meses). De entre los tres tipos de climas, Cfb es el que muestra la distribución más dispersa de correlaciones positivas SPIw13-SMDI a lo largo de la ventana de análisis. Los climas BSk y Cfb muestran una distribución de correlaciones positivas menos concentradas que en el caso del análisis SPIw13-ETDI, tanto en el rango del desfase con corto plazo (+0 a +13 semanas) como en el rango de precedencia (0 a -26 semanas). El clima continental Cfa muestra, por contra, la distribución de correlaciones más concentrada en el muy corto plazo (0 a 9 semanas), pero esta vez bastante influenciado por la textura del suelo, en contraste con lo mostrado por los resultados del análisis SPIw13-ETDI.

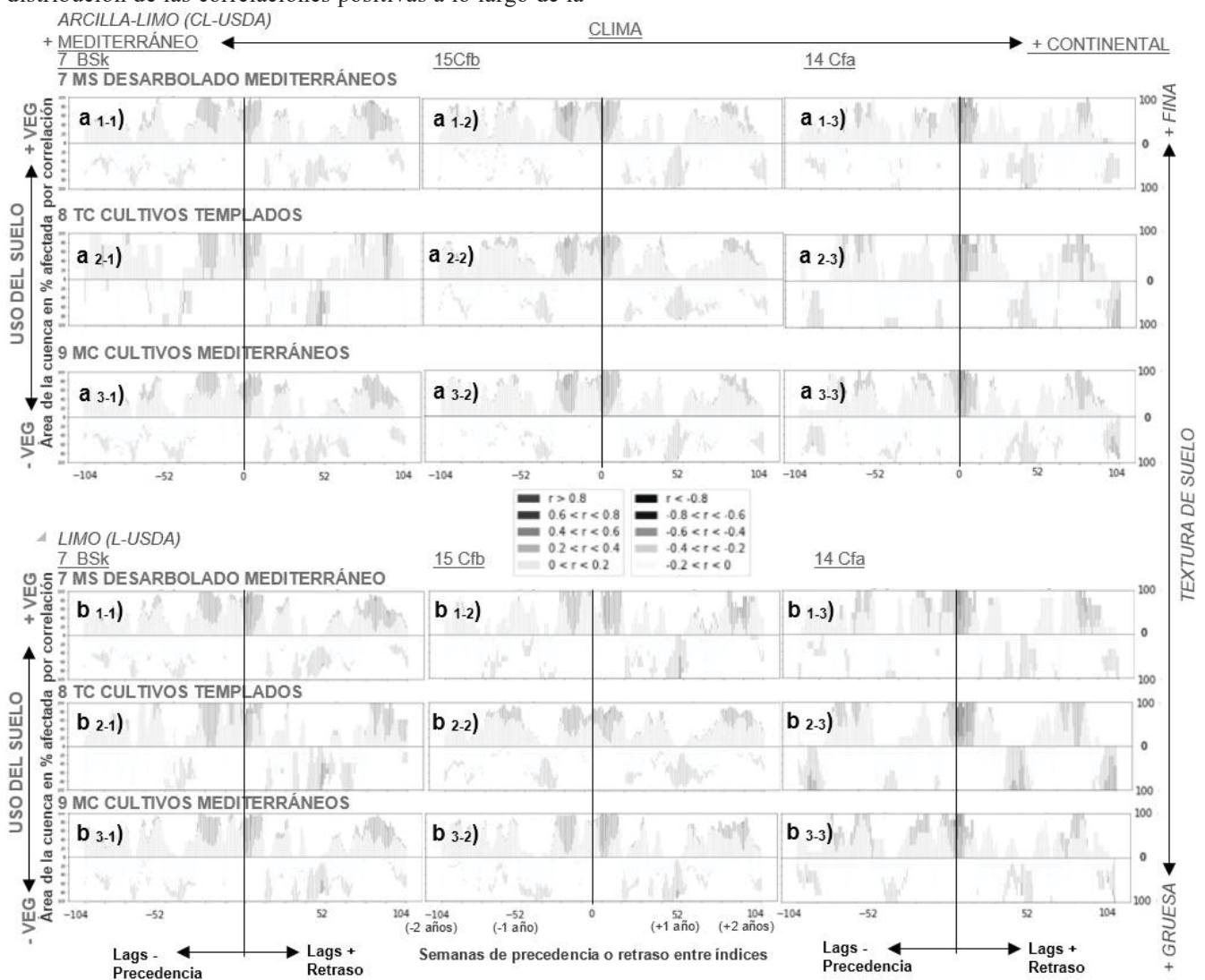


Fig. 3. Matriz de series de correlación entre el índice de anomalía de lluvia SPI y el índice de anomalía de evapotranspiración ETDI en función de los siguientes factores físicos influyentes: 3 grupos de climas (BSk, Cfb y Cfa, en estilo subrayado) y 3 grupos de uso de suelo (7MS Desarbolado mediterráneo, 8 Cultivos templados, 9MC Cultivos mediterráneos, en estilo negrita) en dos tipos distintos de texturas de la clasificación USDA (Arcilloso-limosa (CL) y limosa (L), en estilo cursiva). El rango de correlaciones para cada combinación cubre entre -104 y +104 semanas de desfase (-2 a +2 años).

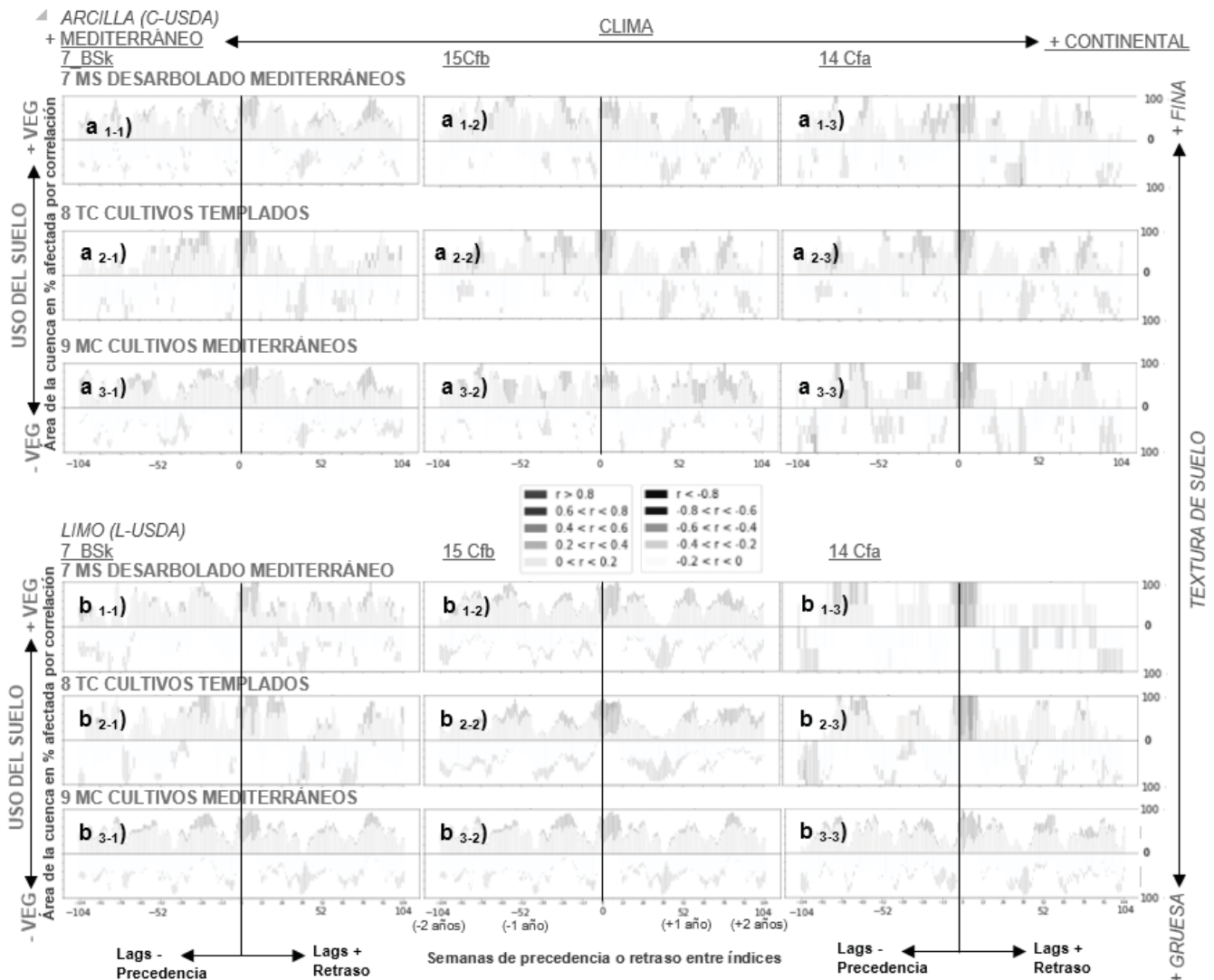


Fig. 4. Matriz de series de correlación entre el índice de anomalía de lluvia SPI y el índice de anomalía de humedad del suelo SMDI en función de los siguientes factores físicos influyentes: 3 grupos de climas (BSk, Cfb y Cfa, en estilo subrayado) y 3 grupos de uso de suelo (7MS Desarbolado mediterráneo, 8TC Cultivos templados, 9MC Cultivos mediterráneos, en estilo negrita) en dos tipos distintos de texturas de la clasificación USDA (Arcillosa (C) y limosa (L), en estilo cursiva). El rango de correlaciones para cada combinación cubre entre -104 y +104 semanas de desfase (-2 a +2 años) entre los índices SPI13 y SMDI.

A diferencia de lo ocurrido en el análisis del SPIw13-ETDI, en que era el clima lo que gobernaba las variaciones en la concentración de las correlaciones positivas en el corto plazo (el de retraso de las anomalías de humedad de suelo), en este análisis SPIw13-SMDI, la textura de suelo es un segundo factor muy influyente. La diferencia en la concentración de las correlaciones positivas en el corto plazo es notable entre los suelos de clase textural arcilla (C) y los de clase limosa (L) más gruesa (Fig. 4, a2 vs b2), especialmente en el caso del clima Cfa, más que en los climas Cfb o BSk. La textura de suelo más fina parece amortiguar los efectos climáticos y de uso del suelo, y/o sus interacciones, en comparación con la textura de suelo más gruesa.

Se aprecia interacción entre el clima y la textura del suelo al comparar las series de correlación entre SPI13w y SMDI ilustradas en la Fig. 4. La textura de suelo no

introduce cambios notables en la distribución de las correlaciones para la interacción SPI13w-ETDI.

Los climas con mayor sincronía entre las anomalías de lluvia y de humedad del suelo (correlación más concentrada en el corto plazo), como el Cfa, experimentan mayores cambios en la distribución de las correlaciones al cambiar la textura de más fina a más gruesa.

Al igual que en el caso del análisis SPIw13-ETDI, existen clústeres de correlaciones positivas entre SPIw13 y SMDI hasta el rango interanual (+39 a +104 semanas), especialmente en la textura de suelo más fina, que son coherentes con la gran variabilidad climática interanual de la zona de estudio. De manera similar, las correlaciones negativas abundan en el rango supra-estacional (+39 semanas), indicando un umbral de cambio de las correlaciones entre índices en torno a los nueve meses.

Por otra parte, los resultados muestran una influencia del tipo de uso del suelo en las correlaciones SPIw13-SMDI, que a vista de la Fig.4 (y otras no mostradas), es menor de la esperada para la relevancia de este factor. Su impacto se concentra en la distribución de las correlaciones negativas más que en el de las positivas. La similitud de resultados entre los usos de suelo es particularmente notoria entre el uso de suelo desarbolados y el de cultivos, entre los que cabría esperar más diferencia.

4.- Discusión

4.1. Clima

Los resultados indican un notable papel del clima en la modulación de las correlaciones entre SPIw13 y ETDI. Se evidencia la existencia de interacciones que van más allá del esperable retraso de la respuesta de las anomalías de evapotranspiración respecto a las de lluvia. En concreto, la mayor parte de la Cuenca del Ebro, representada por los climas en ella mayoritarios BSk y Cfb, muestra un notable clúster de influencia de las anomalías de evapotranspiración precedente en las anomalías de lluvia. Este resultado permite discutir dos aspectos relevantes en las correlaciones de doble clúster observadas.

El primero es que la propagación de la sequía no sólo se transmite de la atmósfera a la superficie, sino que existe retroalimentación de las anomalías entre la superficie y la atmósfera con magnitud variable que puede llegar a tener escala temporal estacional (Tuttle y Salvucci, 2016). La limitada persistencia de anomalías positivas de evapotranspiración en el clima semiárido de la Península Ibérica dificulta que este aspecto genere una respuesta tan duradera como la estacional, al menos a escala regional. Ni siquiera áreas de la cuenca donde el reciclaje de la precipitación es más importante como las del Pirineo Oriental (Bisselink et al., 2008; Keune y Miralles, 2019), donde se localiza precisamente el clima Cfa, podrían experimentar una retroalimentación tan duradera.

El segundo aspecto está relacionado con las anomalías oceánicas. Éstas sí son capaces de generar anomalías estacionales en variables con impacto en la interacción lluvia-evapotranspiración a escala de la Península Ibérica, mucho más teniendo en cuenta que es bien conocida su influencia en las sequías de la Península Ibérica (Vicente-Serrano et al., 2011). El hecho de que la distinción entre los climas con influencia estacional precedente de la evapotranspiración sobre la lluvia (BSk y Cfa) frente a los que no la sufren (Cfb) se corresponda con climas afectados por las anomalías atlánticas frente a los de influencia mediterránea menos sensibles a ellas (Martin-Vide y López-Bustins, 2006) da credibilidad al segundo aspecto basado en teleconexiones climáticas. El clima Cfa está más expuesto a la dinámica del mar Mediterráneo, donde las anomalías tienden a ser de mayor escala temporal que las del Atlántico (Martin-Vide y López-Bustins, 2006).

Todo ello explica por qué los resultados muestran un impacto dominante del clima sobre los otros dos factores

analizados (uso y textura del suelo) en la interacción SPIw13-ETDI, cuya naturaleza es eminentemente atmosférica. La existencia de clústeres de correlación positiva moderada entre el SPIw13 y el ETDI más allá de la escala temporal estacional puede atribuirse a las anomalías oceánicas mencionadas anteriormente cuando su influencia alcanza la escala temporal interanual, lo que está reportado por múltiples estudios en la Península Ibérica (Gimeno et al., 2002; Sánchez-Gómez et al., 2016).

La influencia dominante del clima permanece en el caso de la interacción entre anomalías de lluvia y de humedad de suelo (SPIw13-SMDI), pero con más participación de los otros factores, uso y textura del suelo, en los cambios en las correlaciones observadas en los resultados.

4.2. Textura del suelo

La textura de suelo se erige como el segundo factor más influyente en la interacción entre índices de sequía, pero restringida a la interacción del SPIw13 con el SMDI, pues, como se ha visto anteriormente, en la interacción SPIw13-ETDI apenas intervienen los factores de suelo.

Los resultados muestran que las texturas más gruesas favorecen la sincronía de las anomalías de lluvia y humedad del suelo, especialmente en climas como el Cfa tendentes a experimentar lluvias concentradas en cortos periodos de tiempo (Casas-Castillo et al., 2007). La influencia de la textura observada en los resultados es por tanto una influencia que se manifiesta acoplada a la del clima. Muestra de ello es que la influencia de la textura se muestra más amortiguada en el caso de los tipos de climas BSk y Cfb en comparación con el tipo de clima Cfa. El mayor reparto de los clústeres de correlación positiva a lo largo de la ventana de análisis (de -104 a 104 semanas) en los climas BSk y Cfb es una causa razonable. Este reparto más distribuido de las correlaciones puede deberse a que suelos predominantemente no muy vegetados bajo esos tipos de clima pueden presentar ciclos de memoria de la capacidad de retención de humedad más largos, incluso a escala interanual (Orth y Seneviratne et al., 2012).

Dentro de cada tipo de clima (Fig. 4), la concentración de las correlaciones entre SPIw13 y SMDI para limos evidencia el importante impacto de la textura en los aspectos de sincronía de la propagación de las anomalías. La textura de suelo más fina muestra más capacidad de amortiguación de las anomalías debido a su ciclo de humectación y desecado más prolongado (Martínez-Fernández et al. 2021). Las texturas más gruesas pueden seguir con más fidelidad las anomalías de lluvia, tal y como ha sido ya reportado en otras áreas de la Península Ibérica (Martínez-Fernández et al., 2021).

Desafortunadamente la escasez de áreas con texturas más gruesas dificulta comprobar este aspecto fuera del rango arcilla-limo y complican la generalización de esta apreciación. Se hace necesario formular futuros estudios para determinar con precisión la contribución real de las texturas más gruesas de suelo en las diferencias en las

correlaciones temporales entre índices. Más allá de estas incertidumbres, y de que la respuesta puede distar de ser lineal, la textura del suelo tiene un papel relevante, pero aún por explorar en la transmisión más o menos amortiguada de las anomalías atmosféricas a la zona no saturada.

4.3. Uso del suelo

Los tipos de uso de suelo investigados resultan bastante similares entre sí debido a la dificultad de encontrar áreas con uso de suelo contrastado en las zonas de transición donde se superponen clima, usos y texturas de suelo. Teniendo en cuenta estas limitaciones, es coherente que los resultados muestren más similitudes entre los usos de suelo dedicados a cultivos que entre éstos y los de terrenos desarbolados. Sin embargo, el terreno desarbolado muestra en realidad sólo ligeras diferencias con los anteriores dada su similitud con uso del tipo cultivos de secano tal y como se observa en otros estudios en la zona (Dari et al., 2021). Este resultado es coherente con la naturaleza de este tipo de suelos en ambiente mediterráneo, que se caracterizan por vegetación de escaso desarrollo y de ciclo fenológico muy similar al de cultivos de secano, donde la interacción entre humedad de suelo y evapotranspiración para cereales y pastos muestran respuestas ligeramente diferentes en el tiempo, pero análogos (Sánchez et al., 2012).

Sería interesante extender el análisis a otros tipos de usos de suelo más vegetados (no tan comunes en la Depresión del Ebro) que los desarbolados y de cultivos, para discutir si experimentan diferencias más marcadas que las observadas en éstos. Este aspecto es de interés para identificar si las diferencias de vegetación determinan cambios relevantes en la modulación de las anomalías de humedad de suelo y su interacción con las atmosféricas en la cuenca.

No obstante, las diferencias en la distribución de las correlaciones negativas para la interacción SPIw13-SMDI (Fig.4) en comparación con la SPIw13-ETDI (Fig. 3) sí sugieren una cierta influencia del tipo de uso de suelo durante los periodos de transición de las anomalías de humedad del suelo. Es necesario comprobar su efecto sobre tipos de suelo más contrastados, como las analizadas por Orth y Seneviratne (2012), para poder formular apreciaciones más esclarecedoras sobre el rol de este factor en la propagación de las anomalías climáticas a las de suelo, especialmente cuando se toman datos de teledetección con incertidumbres en la medida de humedad de suelo asociadas, precisamente, al uso del suelo (Escorihuela y Quintana-Seguí, 2016).

Además, pese a no mostrar claros indicios de experimentar interacción con la textura de suelo, cabe suponer que la evolución del uso del suelo en zonas no cultivadas se ve influenciado en cierta medida por su textura que determina la vegetación potencial (Dodd et al., 2002). Esta interacción puede ser un aspecto relevante a tratar en el caso de cuencas con cambio de uso de suelo reciente como la del Ebro.

5.- Conclusiones

Diversos factores físicos del sistema suelo-atmósfera condicionan las características de la propagación de la sequía desde el nivel atmosférico al nivel de la zona no saturada. Entre ellos, las múltiples variables climáticas y sus anomalías se muestran dominantes en la determinación del modo de interacción de las anomalías de lluvia con las de evapotranspiración. Los tipos de climas representativos de la fachada oceánica y el interior peninsular (Cfb y BSk) inducen una distintiva señal de dependencia de las anomalías de lluvia en función de las precedentes de evaporación que no se observa en climas continentales (Cfa). El clima continental Cfa, por el contrario, muestra una concentración de la dependencia de la anomalía de humedad del suelo en la de lluvia que no es tan marcada en los climas BSk y Cfb. El tipo de clima define así marcadas diferencias en las interacciones entre las anomalías atmosféricas y entre éstas y las de suelo, de notable repercusión en la propagación de la sequía.

De entre los factores físicos del suelo, las texturas del suelo más gruesas concentran la dependencia de la humedad de suelo en los momentos posteriores a la aparición de las de la lluvia, mientras las más finas tienen a amortiguar y retrasar los cambios en la interacción entre las anomalías. El impacto de la textura de suelo afecta eminentemente a la interacción entre anomalías de lluvia y las de humedad de suelo y no a las de evapotranspiración con las de lluvia.

El uso de suelo o cobertura del suelo, dentro del rango entre cultivos y terrenos escasamente vegetados, se muestra de limitada influencia en las interacciones entre la anomalía de lluvia y la de humedad del suelo. No se observa la esperable influencia del tipo de uso de suelo en la interacción entre las anomalías de lluvia y las de evapotranspiración a causa del restringido grupo de tipos de uso analizados.

El estudio muestra el interés en la investigación del papel de las características físicas del territorio en la evolución de la sequía, muy relacionadas con los procesos de la zona no saturada. Este análisis tiene relevancia para mejorar la monitorización de sequías en regiones, como la Península Ibérica, abocadas a sufrir el recurrente impacto de este riesgo natural.

Agradecimientos. Este estudio es parte del proyecto HUMID [CGL2017-85687-R] financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI), en el marco de las ayudas AEI/FEDER-EU. 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.

6.- Bibliografía

- Beck, H.E., N.E. Zimmermann, T.R. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, y E.F. Wood, 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci. Data* 5:180214.
- Bisselink, B., y A. J. Dolman, 2008. Precipitation Recycling: Moisture

- Sources over Europe using ERA-40 Data. *J Hydrometeorol*, 9(5), 1073–1083.
- Casas-Castillo, M., M. Herrero, M. Ninyerola, X. Pons, R. Rodríguez, A. Rius, y A. Redaño, 2007. Analysis and objective mapping of extreme daily rainfall in Catalonia. *Int J Climatol*, 27(3), 399–409.
- Dari, J., P. Quintana-Seguí, M.J. Escorihuela, V. Stefan, L. Brocca, y R. Morbidelli, 2021. Detecting and mapping irrigated areas in a Mediterranean environment by using remote sensing soil moisture and a land surface model. *J. Hydrol.*, 596, 126129.
- Dodd, M.B., W.K. Lauenroth, I.C. Burke, y P.L. Chapman, 2002. Associations between vegetation patterns and soil texture in the shortgrass steppe. *Plant Ecol*, 158(2), 127-137.
- Escorihuela, M.J., y P. Quintana-Seguí, 2016. Comparison of remote sensing and simulated soil moisture datasets in Mediterranean landscapes. *Remote Sens Environ*, 180, 99–114.
- Faroux, S., A.T. Kaptué Tchuenté, J.L. Roujean, V. Masson, E. Martin, y P.L. Moigne, 2013. ECOCLIMAP-II/Europe: A twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models. *Geosci Model Dev*, 6(2), 563-582.
- Gimeno, L., P. Ribera, R. Iglesias, L. de la Torre, R. García, y E. Hernández, 2002. Identification of empirical relationships between indices of ENSO and NAO and agricultural yields in Spain. *Clim. Res.*, 21(2), 165-172.
- Keune, J., y D.G. Miralles, 2019. A precipitation recycling network to assess freshwater vulnerability: Challenging the watershed convention. *Water Resour. Res.*, 55(11), 9947-9961.
- Martin-Vide, J., y J.A. Lopez-Bustins, 2006. The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *Int J Climatol*, 26(11), 1455–1475.
- Martínez-Fernández, J., A. González-Zamora, N. Sánchez, A. Gumuzzio y C.M. Herrero-Jiménez, 2016. Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index. *Remote Sens Environ*, 177, 277-286.
- Martínez-Fernández, J., A. González-Zamora, y L. Almendra-Martín, 2021. Soil moisture memory and soil properties: An analysis with the stored precipitation fraction. *J. Hydrol.*, 593, 125622.
- Masson, V., P. L. Moigne, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, y A. Voldoire, 2013. The SURFEXv7. 2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geosci Model Dev*, 6(4), 929-960.
- McKee, T.B., N.J. Doesken, y J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183)*.
- Merlin, O., C. Rudiger, A. Al Bitar, P. Richaume, J.P Walker, y Y. Kerr, 2012. Disaggregation of SMOS soil moisture 907 in Southeastern Australia. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 50(5), 1556-1571.
- Mu, Q., M. Zhao, y S.W. Running, 2013. MODIS global terrestrial evapotranspiration (ET) product (NASA 931 MOD16A2/A3). *Algorithm Theoretical Basis Document, Collection*, 5.
- Narasimhan, B., y R. Srinivasan, 2005. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agric For Meteorol*, 133(1-4), 69-88.
- Noilhan, J., y S. Planton, 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly 942 weather review*, 117(3), 536-549.
- Noilhan, J., y J.F. Mahfouf, 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Glob Planet Change*, 13(1-4), 945 145-159.
- Orth, R., y Seneviratne, S. I., 2012. Analysis of soil moisture memory from observations in Europe. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117(D15).
- Sánchez-López, G., A. Hernández, S. Pla-Rabès, R. Trigo, M. Toro, M.I. Granados, y S. Giralt, 2016. Climate reconstruction for the last two millennia in central Iberia: The role of East Atlantic (EA), North Atlantic Oscillation (NAO) and their interplay over the Iberian Peninsula. *Quat Sci Rev*, 149, 135-150.
- Quintana-Seguí, P., M.C. Peral, M. Turco, M.C. Llasat, y E. Martin, 2016. Meteorological Analysis Systems in North-995 East Spain: Validation of SAFRAN and SPAN. *J. Environ. Inform.* 27(2):116–130, 996.
- Quintana-Seguí, P., M. Turco, S. Herrera., y G. Miguez-Macho, 2017. Validation of a new SAFRAN-based gridded 999 precipitation product for Spain 25 and comparisons to Spain02 and ERA-Interim. *Hydrol Earth Syst Sci*, 1000 21(4):2187–2201.
- Running, S. W., Q. Mu, M. Zhao, y A. Moreno, 2017. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA 1023 MOD16A2/A3) *NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm*. NASA: Washington, DC, USA.
- Sánchez, N., J. Martínez-Fernández, J. González-Piqueras, M.P. González-Dugo, G. Baroncini-Turrichia, E. Torres, A. Calera y C. Pérez-Gutiérrez, 2012. Water balance at plot scale for soil moisture estimation using vegetation parameters. *Agric For Meteorol*, 166, 1-9.
- Tuttle, S., y G. Salvucci, 2016. Empirical evidence of contrasting soil moisture–precipitation feedbacks across the United States. *Science*, 352(6287), 825-828.
- Vicente-Serrano, S. M., J.I. López-Moreno, J. Lorenzo-Lacruz, A. El Kenawy, C. Azorín-Molina, E. Morán-Tejeda, y M. Angulo-Martínez, 2011. The NAO impact on droughts in the Mediterranean region. In *Hydrological, socioeconomic and ecological impacts of the north Atlantic oscillation in the mediterranean region* (pp. 23-40). Springer, Dordrecht.