

VARIABILIDAD ESPACIO TEMPORAL DE LA BIOMASA VEGETAL Y SU INCIDENCIA EN LA HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO EN LA CUENCA SUR MEDITERRÁNEA

HÉCTOR ÁLVAREZ GARCÍA ([id](#))¹
MARÍA EUGENIA PÉREZ GONZÁLEZ ([id](#))²
JOSÉ DAMIÁN RUIZ SINOGA ([id](#))¹
JOSÉ ANTONIO SILLERO MEDINA ([id](#))¹

¹*Instituto de Hábitat, Territorio y Digitalización. Universidad de Málaga Avda. Arquitecto Peñalosa. Edificio de Investigación Ada Byron, 29010, Málaga*

²*Departamento de Geografía, Universidad Complutense de Madrid, c/ Profesor Aranguren s/n, 28040, Madrid*

Autor de correspondencia: meperez@ucm.es

Resumen. El trabajo que aquí se presenta forma parte del proyecto MOISES (PDC2021-120768-I00), que tiene como objetivo hacer accesible a la ciudadanía el estado hidrológico del suelo en tiempo real. Entre las variables condicionantes de dicho estado debe considerarse el uso del suelo. Sin embargo, en ese cálculo cada clase de suelo suele ponderarse con un valor único, cuando la realidad fenológica de la vegetación debiera asignarles valores diferentes en función del grado de cobertura del suelo, estado de la vegetación y humedad edáfica. Con el objetivo de aproximarnos a la variabilidad espacio temporal de la cobertura real del suelo por parte de la vegetación se analizan estos cambios en la cuenca sur mediterránea peninsular durante el año hidrológico 2021-22. Se realiza a partir de la respuesta espectral de imágenes del satélite Sentinel 2 en diferentes clases informacionales, con verificación por otras fuentes. Se determinan así los principales contrastes en el grado de cobertura de la vegetación y la humedad superficial del suelo en los diferentes espacios naturales y en los agrícola-ganaderos o urbanos, en los que el regadío acelera los ciclos fenológicos naturales. Cabe esperar diferencias apreciables en los rangos de coberturas de la vegetación desde la región más occidental, mediterránea húmeda, a la oriental, árida, por lo que en un contexto de necesidad de adaptación a un recurso hídrico limitado y deficitario parece conveniente ajustar los cálculos del estado hidrológico a la realidad de algunos usos del suelo variables en el año, al menos determinando las fechas con máxima y mínima cobertura de cada tipología.

Palabras clave: usos del suelo, fenología, humedad edáfica, Sentinel 2, NDVI, MSI.

SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF PLANT BIOMASS AND ITS IMPACT ON SOIL SURFACE MOISTURE IN THE SOUTHERN MEDITERRANEAN BASIN

Abstract. The manuscript presented here is part of the MOISES project (PDC2021-120768-I00), which aims to make the hydrological state of the soil accessible to the public in real time. The actual use of the land should be considered as a conditioning variable of the hydrological state of the soil. However, in this calculation, each soil class is usually weighted with a single value, when the phenological reality of the vegetation should assign different values depending on the degree of soil cover, state of the vegetation, and soil moisture. To approximate the spatio-temporal variability of the actual land cover by vegetation, these changes in the southern peninsular Mediterranean basin are analysed during the hydrological year 2021-22. It is made from the spectral response of images from the Sentinel 2 satellite in different informational classes, with verification by other sources. The main contrasts in the degree of vegetation cover and the surface moisture of the soil in the different natural spaces and in the agricultural-livestock or urban spaces are determined, in which irrigation accelerates the natural phenological cycles. Appreciable differences can be expected in the ranges of vegetation cover from the most western, humid Mediterranean region, to the

eastern, arid one. In a context of the need to adapt to a limited and deficient water resource, it seems convenient to adjust the calculations of the hydrological state to the reality of some variable land uses in the year, at least determining the dates with maximum and minimum coverage of each type.

Keywords: land use, phenology, soil moisture, Sentinel 2, NDVI, MSI.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto MOISES, tiene como objetivo hacer accesible a la ciudadanía el estado hidrológico del suelo en tiempo real. Para ello es necesario calcular el umbral de escorrentía, que tiene entre sus variables dependientes el uso del suelo. No obstante, éste suele considerarse un valor invariable en el tiempo, cuando algunas clases agrícolas o forestales presentan cambios destacados en la cobertura del suelo. Para conocer esta variabilidad espaciotemporal se han analizado los cambios en la respuesta espectral de la superficie foliar y de humedad superficial en algunos tipos de biomasa vegetal a lo largo del ciclo hidrológico 2021-22.

2. METODOLOGÍA

El umbral de escorrentía (P_o) representa la precipitación mínima que debe caer sobre la cuenca para que se inicie la generación de escorrentía (Ministerio de Fomento, 2019): $P_o = P_o^i \cdot \beta$; donde P_o (mm) es el umbral de escorrentía, P_o^i (mm) es el valor inicial de escorrentía y β es el coeficiente corrector del umbral de escorrentía. Para obtener del valor inicial de escorrentía se recurrió a unos valores tabulados fijos que ofrece el Ministerio de Fomento (2019), conforme a 4 factores: uso de suelo, práctica de cultivo en ciertos usos, pendiente y grupo hidrológico del suelo.

En este trabajo se tomaron los datos de uso de suelo del proyecto CORINE Land Cover más recientes (2018), a través del centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional (MITMA, 2022).

Mediante el software ArcGIS Pro (Esri, v. 3.0.3.) y extensiones de lenguaje Python se creó una capa de usos de suelo formato shapefile de la zona de estudio, y se ajustaron las categorías de uso de suelo obtenidas a la tabla de referencia del Ministerio de Fomento (2019), valorando las características del entorno y métodos agrícolas utilizados (regimientos de secano o regadío). Respecto a la práctica de cultivo, se generalizó como tipo R (Denota cultivo según la línea de máxima pendiente, tipo N denota cultivos según curvas de nivel). A continuación, se calculó la pendiente del terreno a partir de MDT25, LIDAR (MITMA, 2022). Estos datos son el factor limitante de la resolución espacial del ráster final de umbral de escorrentía, pudiendo aumentar la resolución en estudios futuros que se trabaje a escala grande. Una vez obtenido el mosaico de secciones del área de estudio, mediante el software ArcGIS Pro se obtuvo la imagen ráster final de la pendiente en porcentaje, realizando a continuación una evaluación condicional de pendiente máxima de un 3%, obteniendo así dos tipos de terreno que corresponden con los datos tabulados que se van a implementar.

El último factor por implementar han sido los grupos hidrológicos de suelo (Ruiz Sinoga *et al.*, 2022). Su categorización se basa en un conjunto de características que se pueden encontrar resumidas en la Norma 5.2-IC, página 24 (Ministerio de Fomento, 2014). Se obtuvieron 2 categorías, siendo el grupo C el más extenso con un 75% de ocupación del terreno aproximadamente.

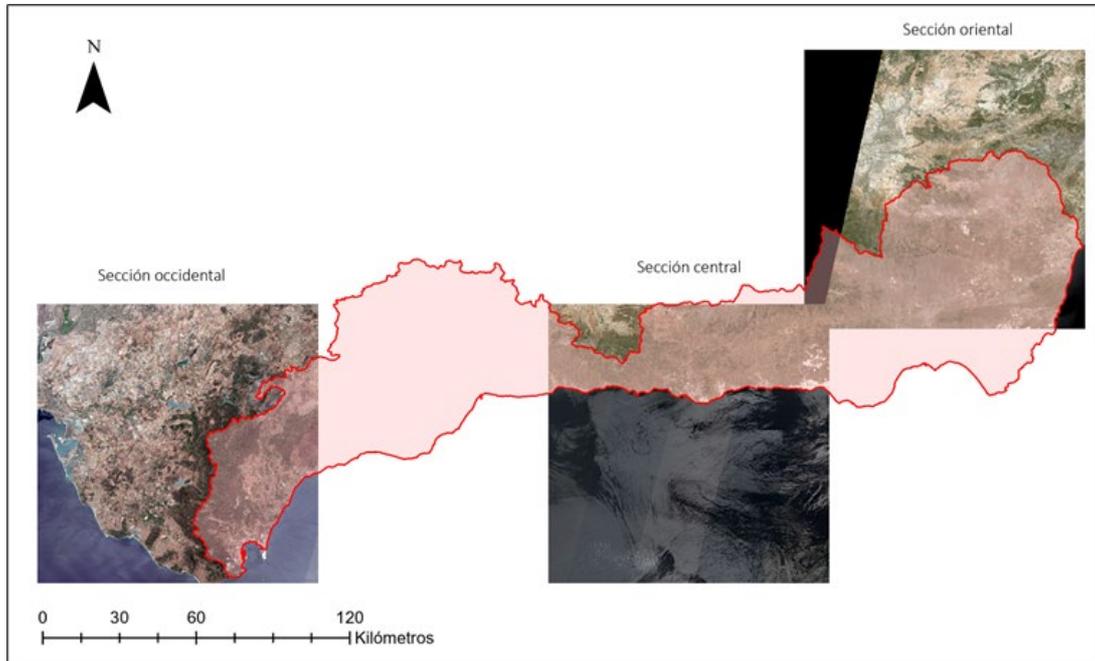
Definidos los 4 factores se generó el campo umbral de escorrentía, obteniendo diferentes mapas acordes a la pendiente y grupos hidrológicos que posteriormente fueron fusionados, conformando el ráster de umbral de escorrentía inicial.

El segundo proceso realizado fue determinar la variabilidad temporal de la vegetación a lo largo de un ciclo hidrológico anual. Proceso que se ha realizado a partir de índices de vegetación y humedad de una selección de imágenes Sentinel-2, con resolución espacial de 10 metros, 13 bandas espectrales y una temporalidad de 5 días, obtenidas del centro descargas del proyecto europeo Copernicus (ESA – Sentinel2, 2022, Open Access HUB, 2022). El criterio de selección fue el porcentaje de nubosidad relativo a la cuenca de estudio, descartando imágenes con una cobertura nubosa superior al 15% en la escena, así como casos específicos de nubosidad localizadas en zonas de alta importancia, presencia de calima, etc.

Debido a la gran extensión longitudinal de la zona de estudio (unos 350 kilómetros), la misión Sentinel-2 cubre con imágenes el terreno mediante tres barridos, con una distancia temporal de 1 día, obteniendo de esta manera tres secciones en las cuales se basará el estudio; zona occidental, zona central y zona

oriental (Fig. 1). El año hidrológico se inició en octubre del 2021, finalizando la captura de datos en septiembre de 2022 con un total de 38 imágenes de la zona occidental, 45 de la zona central y 38 de la zona oriental.

Figura 1. Secciones de toma de datos y cálculo de índices de vegetación y humedad en la zona de estudio



Leyenda: Imágenes Sentinel-2. Secciones: occidental (15/06/22), central (17/06/22) y oriental (19/06/22).

Fuente: [Elaboración propia].

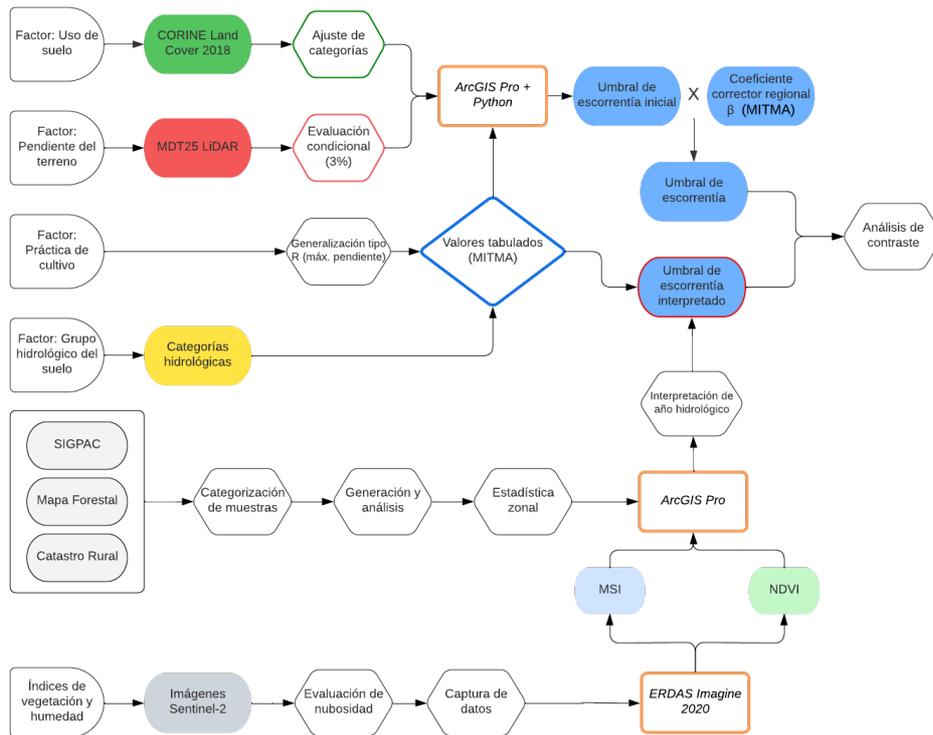
Con las imágenes de satélite se seleccionan y calculan los índices de humedad y vegetación más relevantes que ayudarán en la interpretación de las respuestas espectrales de las categorías de uso de suelo y cubiertas vegetales analizados. Estos fueron; Índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index); Índice de estrés hídrico o MSI (Moisture Stress Index). Para ello se utilizó el software ERDAS Imagine 2020 (Hexagon V16).

Una vez obtenidos los datos, se exploraron las tres secciones para generar muestras de terrenos con diferentes cubiertas y cultivos, utilizando para ello las imágenes almacenadas con composiciones de color natural e infrarrojo. También se contrastó la información temática del visor SIGPAC V 4.10 (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2022), del Mapa Forestal de España y del Catastro Rural. Por último, para unificar criterios se seleccionaron parcelas con la misma orientación del terreno ($67,5^{\circ}$ - $292,5^{\circ}$, evitando la proyección norte de menor reflectividad).

Con todo el material citado se seleccionaron finalmente las siguientes muestras: cultivos de árboles frutales (aguacate, naranjos, chirimoyo, limoneros y mangos), cultivos herbáceos (alfalfa y cultivos mixtos), pastizales, vegetación forestal perenne y caducifolia. Teniendo en cuenta la resolución espacial de 10 m, para el cálculo del índice medio en cada muestra, con una superficie aproximada de 20 ha, se realizó una estadística zonal de la superficie abarcada. Los resultados se contrastaron tomando criterios de proximidad (misma sección de estudio) y cualidad (mismo uso de suelo o cubierta vegetal, distinta sección).

A continuación, se adjunta un diagrama de flujo de las fases del proyecto (Fig. 2):

Figura 2. Diagrama de flujo de trabajo. Fases del proyecto



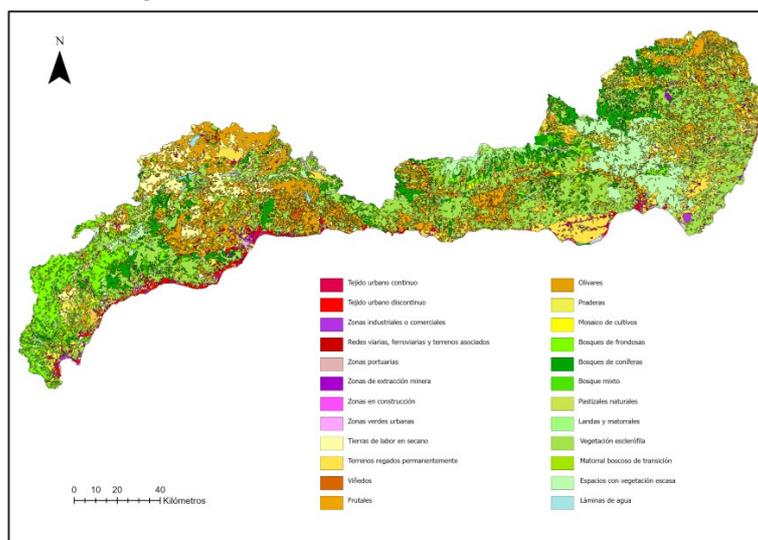
Fuente: Elaboración propia.

3. RESULTADOS

3.1 Umbral de escorrentía en la cuenca sur mediterránea andaluza

A continuación, se muestran los productos intermedios utilizados en el cálculo del umbral de escorrentía inicial y el resultado final.

Figura 3. Usos del suelo Corine Land Cover, 2018

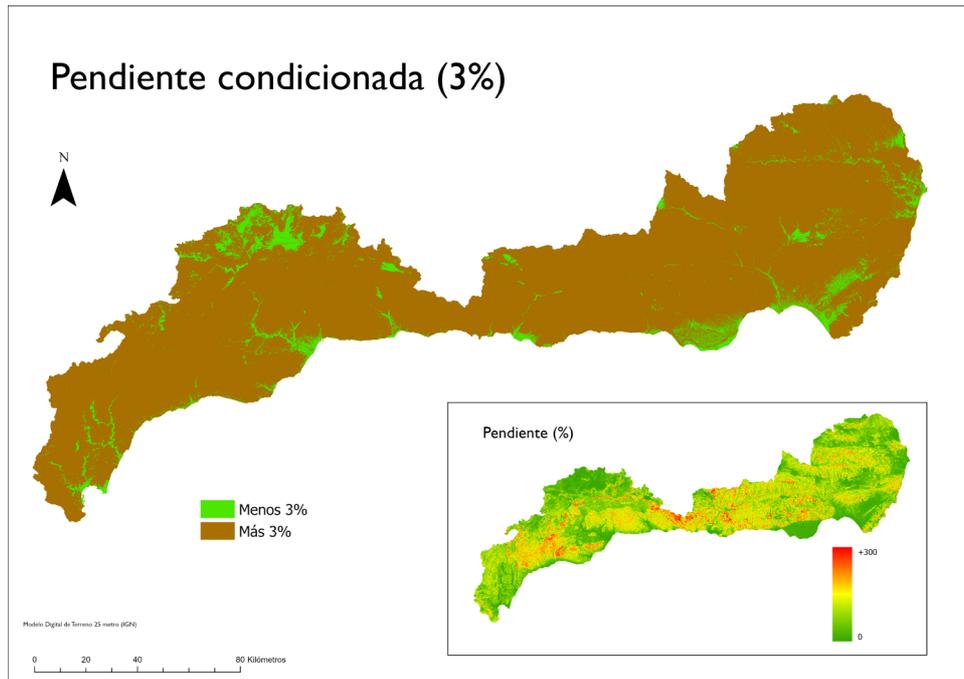


Leyenda: Capa de usos de suelo (CORINE 2018) modificado. Fuente: [Agencia Europea del Medio Ambiente, 2019 y Elaboración propia].

La Figura 3 muestra los polígonos vectoriales superficiales sobre los cuales se basa el criterio de Uso de suelo una vez ajustados a los valores tabulados de escorrentía. Actualizando el uso del terreno se puede mejorar la precisión del umbral de escorrentía del terreno.

El número de categorías que representa CORINE Land Cover en el área de estudio es de 38, no obstante, la figura 3 muestra tan sólo las 24 categorías con mayor extensión y representatividad en el terreno. De todas ellas destacan los olivares, con una ocupación del 35 % del terreno, seguido de la vegetación esclerófila con un 17 %. Entre estos dos usos de suelo se abarca más de la mitad de la superficie de estudio (52%), son usos de gran relevancia en esta zona. A partir de estas dos, destacan un grupo con valores de ocupación de terreno del 5% aproximadamente, estos son frutales, bosques, tierras de labor y pastizales.

Figura 4. Pendiente del terreno condicionada



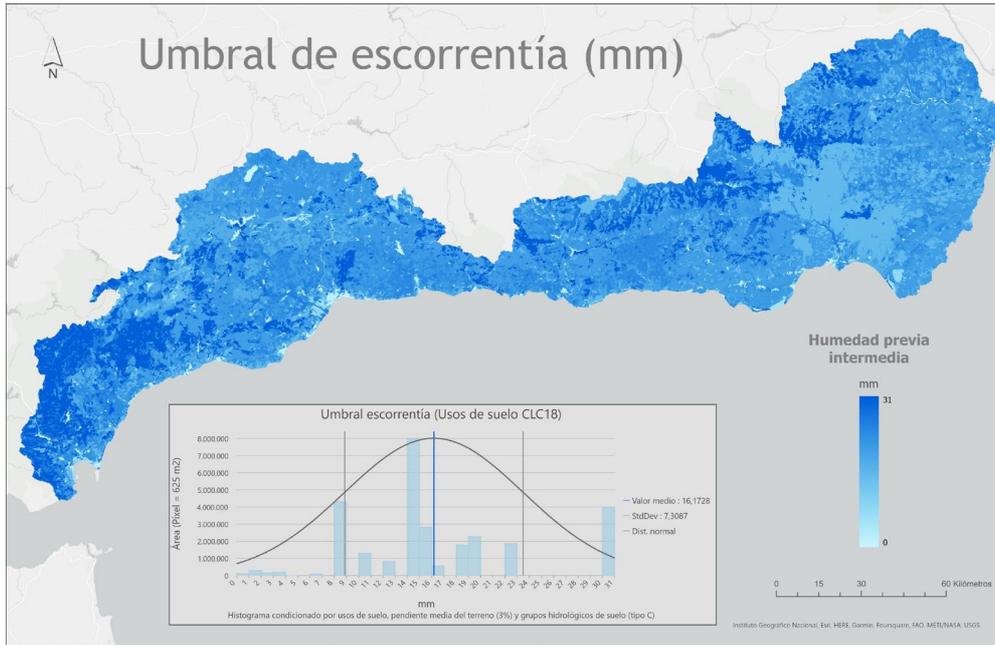
Leyenda: Pendiente del terreno condicionada (3%) al valor tabulado en la fuente de elaboración del umbral de escorrentía (Ministerio de fomento, 2019) junto a pendiente del terreno en porcentaje continuo. Fuente: [Central Nacional de Información Geográfica, 2019 y Elaboración propia].

La Figura 4 muestra como mapa principal la imagen ráster empleada para la discriminación de pendiente (umbral del 3%) en los valores tabulados de escorrentía inicial, como normal general, los terrenos con pendientes menores del 3% presentan un menor grado de escorrentía inicial. El mapa secundario muestra la pendiente continua, obtenida a partir de un modelo digital de terreno con resolución espacial de 25 m. Respecto al factor tipología hidrológica de terrenos, debido a la extrañeza de algunos resultados en zonas de terreno tipo B y el predominio de tipo C se decidió tomar todo el terreno con esa misma categoría.

Finalmente, con los factores variables recopilados se obtuvo un archivo ráster con los valores de umbral de escorrentía. En la Figura 5 se puede observar como la parte occidental de la cuenca muestra un umbral mayor en general en comparación a la parte oriental, esto es debido principalmente a la mayor extensión e intensidad de cobertura vegetal del terreno en la zona occidental, siendo ésta una zona con mayor índice de precipitación. Por otra parte, también se distinguen las zonas forestales por su mayor capacidad de amortiguación en comparación a su entorno, sobre todo en la parte central-oriental (Sierra Nevada), las láminas de agua con un umbral de escorrentía nulo y zonas con un mosaico de umbral de escorrentía, sobre todo en la zona oriental debido a terrenos con cultivos.

El histograma de frecuencias muestra una distribución normal, con un umbral medio de 16,17 mm de precipitación, desviación estándar de 7,3 mm. El umbral de escorrentía más común es de 15 mm de precipitación.

Figura 5. Umbral de escorrentía inicial



Leyenda: Umbral de escorrentía inicial. Histograma del conjunto de valores, media y desviación típica.
Fuente: [Elaboración propia].

3.2 Variabilidad anual de cobertura vegetal y humedad superficial del suelo

Figura 6. Evolución índice NDVI en muestras de cultivos herbáceos mixtos. Zona occidental

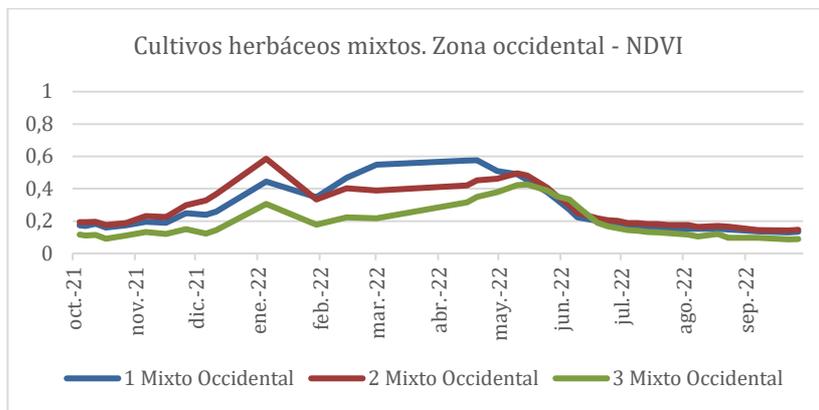
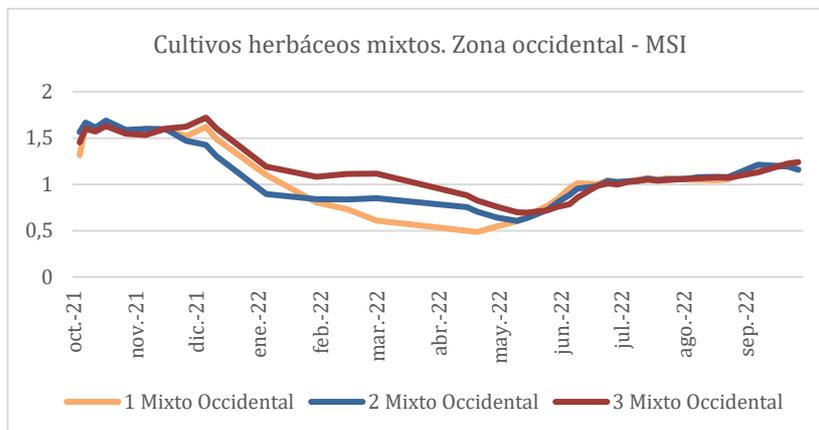


Figura 7. Evolución índice MSI en muestras de cultivos herbáceos mixtos. Zona occidental



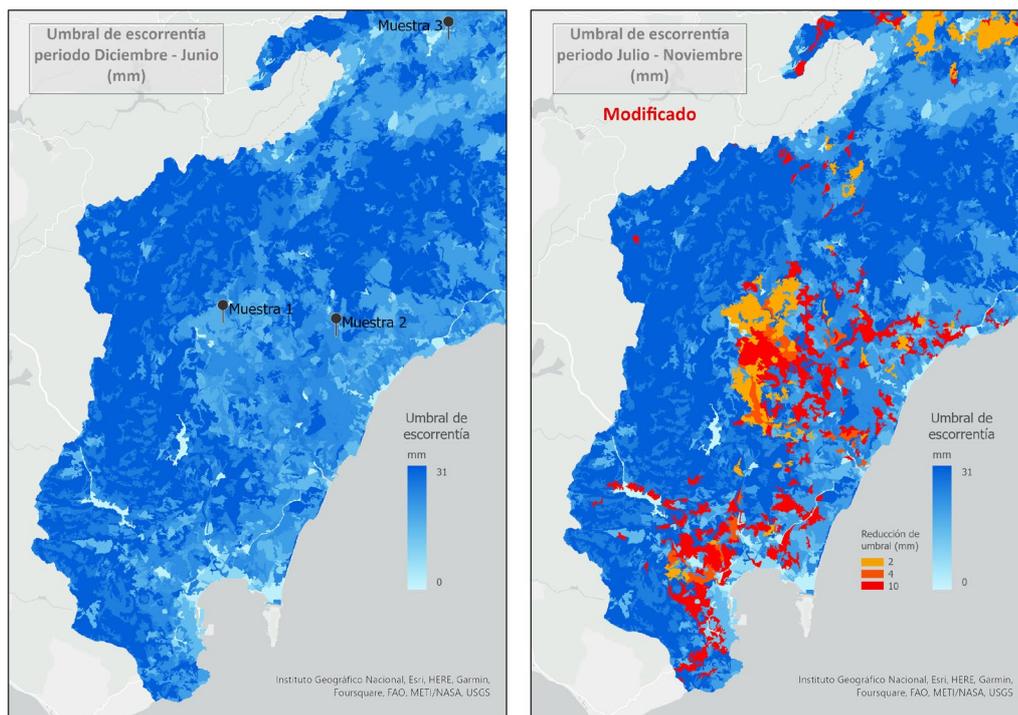
Los índices de vegetación (NDVI) y de estrés de humedad del suelo (MSI) permiten conocer el diferente grado de cobertura y estado de la vegetación a lo largo del ciclo fenológico. Aunque la respuesta espectral es específica para cada tipo de cultivo y especies forestales fase de desarrollo, en general valores de NDVI < a 0,2 son característicos de escasa cobertura vegetal, por lo que se estima mayor vulnerabilidad a la escorrentía superficial.

Los resultados más significativos se encontraron en 2 de las zonas climáticamente más contrastadas de las secciones de estudio, la sección occidental y oriental (Fig. 1).

A continuación, se muestran los gráficos de distribución anual del índice de vegetación NDVI y MSI que han servido como referencia para la modificación del umbral de escorrentía intra anual, tanto en la zona occidental como oriental.

En la zona occidental, las zonas agrícolas compuestas por plantaciones herbáceas mixtas resultaron muy parecidas, teniendo las mismas tendencias a lo largo del año, independientemente de la localización de las parcelas. Corresponden a los municipios de Jimena de la Frontera (muestra 1, altitud de 0-200 metros), Casares (muestra 2, altitud de 0-200 metros) y Ronda (muestra 3, altitud de 200-600 metros). Los valores < a 0,2 se extienden de julio a noviembre, por lo que parte de las precipitaciones otoñales afectan a estos cultivos sin apenas desarrollo foliar. De este modo el valor umbral de escorrentía de uso de suelo correspondiente a cultivos en secano (mixto en regadío) solo corresponderá al mes de enero y toda la primavera, cuando alcanzan los valores de NDVI más altos. El estrés hídrico en las muestras (índice MSI) del sector occidental es muy contrastado y refleja una variabilidad de humedad superficial acorde con el desarrollo y estado de la vegetación, esto es valores de MSI mínimos de enero a junio y máximos en otoño-diciembre, como consecuencia de la intensa sequía de 2022.

Figura 8. Ráster de umbral de escorrentía modificado intra-anualmente en la zona occidental



Leyenda: Izquierda, umbral de escorrentía estándar, correspondiente a cubiertas vegetales herbáceas desarrolladas. Derecha, umbral de escorrentía ajustado, para periodos con poco desarrollo vegetal en zonas herbáceas (verano-otoño). Fuente: [Elaboración propia].

En base a la variabilidad real de la cobertura de vegetación y estrés hídrico del suelo del año 2021-22 analizado se modificó de manera experimental el umbral de escorrentía para los meses de julio a noviembre en algunas parcelas agrícolas. Las categorías modificadas han sido: los terrenos de laboreo en secano, terrenos regados permanentemente y las praderas, que pasan a estar clasificados como espacios con vegetación escasa y a ofrecer unos umbrales de escorrentía más bajos (10,12,18 a 8 mm respectivamente en pendientes menores del 3% o 14,16,22 a 12 mm en pendientes mayores del 3%). La localización de los

principales cambios del umbral de escorrentía durante el verano y mitad del otoño se puede observar en la figura 8. Se destaca en colores cálidos las parcelas con reducción del umbral, localizándose principalmente en el centro (cuencas de río Guadiaro y Hozgarganta) y sur (cuencas del río Guadarranque y Palmones) de este sector, coincidente sobre todo con terrenos de producción vegetal herbácea extensiva (ciclos cortos).

Figura 9. Evolución índice NDVI en muestras de cultivos herbáceos mixtos. Zona oriental

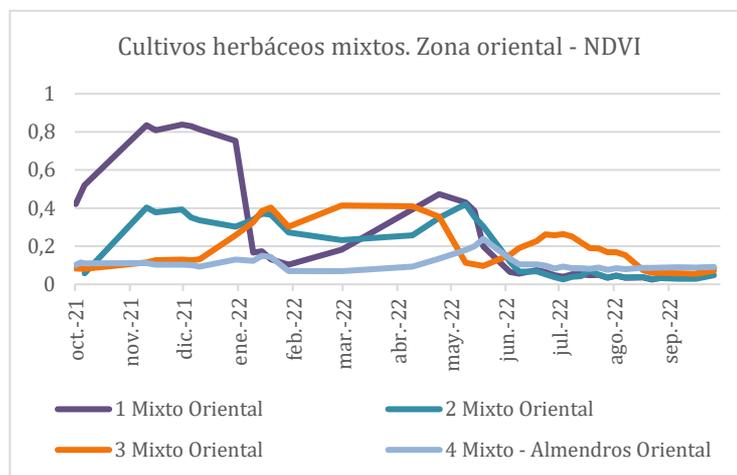
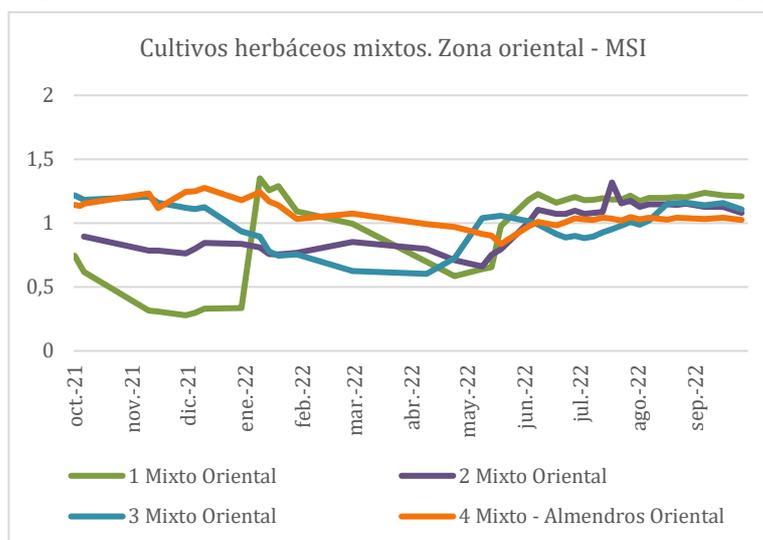


Figura 10. Evolución índice MSI en muestras de cultivos herbáceos mixtos. Zona oriental

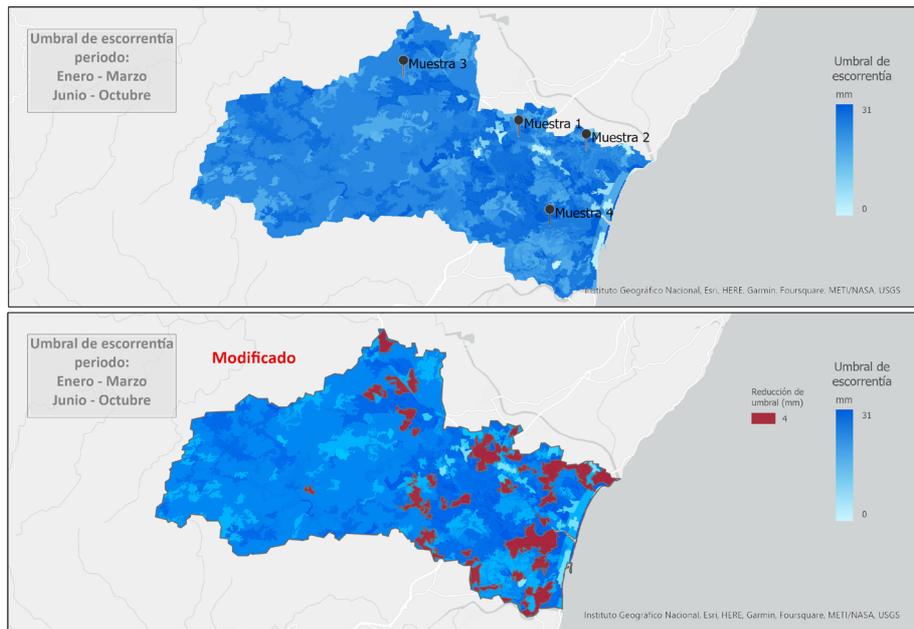


En la zona oriental, los cultivos mixtos mostraron índices NDVI (Fig.9) y MSI (Fig. 10) más variables que en el sector occidental, posiblemente debido a la mayor diferencia altimétrica del terreno. Las muestras corresponden a los municipios de Vera (muestra 1, altitud 0-200 metros), Cuevas del Almanzora (muestra 2, altitud 0-200 metros), Huércal-Overa (muestra 3, altitud 200-600 metros) y Caniles (muestra 4, altitud 600-1.000 metros). Destaca el bajo índice NDVI que refleja durante todo el año la muestra de cultivos mixtos asociados con almendros, también reflejado en un alto índice de estrés hídrico (MSI), superior a la unidad todo el año, con la excepción de la segunda quincena de mayo. Respecto a las tres muestras restantes, cada una refleja momentos de alta actividad fotosintética y cubierta vegetal dependiente del ciclo fenológico de cada cultivo establecido, observándose con claridad la relación indirecta entre el estrés hídrico y la cobertura superficial vegetal. Cabe destacar la cosecha realizada de los cultivos de la muestra 1 a principios de 2022, con un rango de 0,8, característicos de alta cobertura vegetal, a < 0,2, con escasa vegetación. Esto influye enormemente en la humedad superficial, como se refleja en el MSI, que alcanza valores superiores a 1,3 en el momento de la cosecha, reduciéndose progresivamente con el aumento de cobertura

vegetal en primavera hasta alcanzar valores de 0,6. La misma correlación se produce con los valores de mayo, alcanzando valores de 1,2, que se mantienen en verano sin el rebrote de cubierta vegetal en la muestra.

De manera similar al sector occidental, se modificó el valor de uso del suelo para el cálculo del umbral de escorrentía ajustado en la subcuenca hidrológica que contiene el municipio Vera (muestra 1). En este caso se modificó la categoría correspondiente a terrenos regados permanentemente que ocupa el 10,2% de la superficie de la subcuenca, a terrenos con vegetación escasa para los meses de enero a marzo y de junio a octubre. La reducción obtenida en el umbral es de 12 a 8 mm o 16 a 12 mm según la pendiente del terreno, menor al 3% en el primer caso, mayor en el segundo. Las variaciones espaciales se pueden observar en la figura 11:

Figura 11. Ráster de umbral de escorrentía ajustado intra-anualmente en la zona oriental



Leyenda: Superior, umbral de escorrentía sin modificar, periodo con cubiertas vegetales herbáceas desarrolladas. Inferior, umbral de escorrentía reducido, periodos con parcelas agrícolas sin cultivos establecidos o periodos de cosecha. Fuente: [Elaboración propia].

4. CONCLUSIONES

El cálculo del umbral de escorrentía general en la cuenca sur mediterránea, elaborada a partir de variables ambientales (pendiente, grupo hidrológico, usos del suelo, etc.), muestra diferencias contrastadas a lo largo del gradiente pluviométrico longitudinal, con valores máximos en las áreas forestales de Cádiz y Málaga (31 mm) y mucho más bajos en Almería (con una media de 15 mm). Sin embargo, para hacer accesible a la ciudadanía el estado hidrológico del suelo en tiempo casi real se ha precisado modificar algunas categorías de usos del suelo, concretamente en terrenos agrícolas con cultivos herbáceos de ciclo corto, dada la gran variabilidad temporal de este tipo de cultivos.

Los índices de vegetación y estrés hídrico, NDVI y MSI, obtenidos de imágenes Sentinel 2 a lo largo del año hidrológico 2021-22 presentan una correlación negativa alta en los meses de mayor y menor desarrollo de los cultivos (enero-primavera y verano respectivamente). La evolución temporal de dichos índices ha permitido también conocer con rapidez la cobertura aproximada de vegetación y ajustar el umbral de escorrentía en determinadas categorías de usos de suelo. De este modo, los cambios de numerosas parcelas de cultivos agrícolas herbáceos vieron reducido el umbral de escorrentía en el sector occidental mediterráneo en 2-10 mm entre julio a noviembre, y en el oriental 4 mm de enero a marzo, fechas en que el valor del uso del suelo es similar al barbecho.

Tener una monitorización de estos valores, interpretarlos y ajustarlos con una mayor precisión puede apoyar otras líneas de actuación como la pérdida de suelo por escorrentía o el control de humedad a gran escala para un consumo de agua correcto.

Finalmente indicar la posible ampliación de este estudio y sus datos mediante el uso de otros índices espectrales e imágenes satélite, ofreciendo unos datos más completos y precisos de manera rápida.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto de investigación MOISES (PDC2021-120768-I00) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

REFERENCIAS

ESA (2022). European Space Agency. Recuperado de:

https://esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2

Ministerio de Fomento (2014). *Norma 5.2-IC de la Instrucción de carreteras, drenaje superficial* : - SERIE *NORMATIVAS* – (2019.ª ed.). Dirección General de Carreteras.

MITMA (2022). Centro de descargas del CNIG. Instituto Geográfico Nacional. Recuperado de: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

SIGPAC V 4.10 (2022). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Recuperado de: <http://sigpac.mapama.gob.es/fega/visor>

Open Access Hub (2022). Copernicus. Recuperado de <https://scihub.copernicus.eu>

Ruiz-Sinoga, J.D., Sillero-Medina, J.A., Tessouki, J., Molina-Luque, J. (2022). Repercusiones de la variabilidad pluviométrica en la dinámica xérica de los suelos del sur de España. *Retos del Cambio Climático: Impactos, Mitigación y Adaptación*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC) Serie A, nº 12. ISBN: 978-84-125772-1-1 NIPO: 666-22-008-0 (versión impresa) y 666-22-009-6 (versión usb) Depósito legal: M-18335-2022 (versión impresa) y M-21115-2022 (versión usb).