

CARACTERIZACIÓN HIDRO-CLIMÁTICA Y CAMBIOS AMBIENTALES EN CUENCAS DE MEDIA MONTAÑA DEL ECOTONO ATLÁNTICO-MEDITERRÁNEO (SISTEMA IBÉRICO OCCIDENTAL)

JORGE LORENZO-LACRUZ ([id](#))¹
NOEMÍ LANA-RENAULT ([id](#))¹
JOSÉ ARNÁEZ ([id](#))¹
PURIFICACIÓN RUIZ-FLAÑO ([id](#))¹

¹Departamento de Ciencias Humanas, Áreas de Geografía, Universidad de La Rioja, Calle Luis de Ulloa 2, 26004, Logroño

Autor de correspondencia: jorge.lorenzo@unirioja.es

Resumen. En esta comunicación se realiza una caracterización hidro-climática de seis cuencas de cabecera de media montaña del Sistema Ibérico Occidental. Tres cuencas presentan características bioclimáticas atlánticas (ríos Oja, Najerilla y Albercos) y otras tres, mediterráneas (Cidacos, Linares y Añamaza). Los análisis incluyen: (i) tendencias de caudal, precipitación y temperatura (1965-2015); (ii) evaluación de la respuesta de los caudales a la variabilidad de la precipitación; (iii) cambios en los usos del suelo entre 1970 y 2010; y (iv) tendencias de la actividad vegetal (NDVI). Los resultados muestran: (1) un descenso generalizado de los caudales a escala anual, y durante primavera y verano; (2) un descenso generalizado de las precipitaciones, especialmente en cuencas atlánticas; (3) un incremento significativo y generalizado de las temperaturas anuales, de primavera y verano; (4) una respuesta del caudal a la dinámica de la precipitación rápida y puntual en las cuencas atlánticas, y una respuesta más sostenida en las mediterráneas; y (5), un incremento de la actividad vegetal y de la cobertura forestal en todas las cuencas.

Palabras clave: tendencias, caudal, precipitación, temperatura, usos del suelo, interacciones hidro-climáticas.

HYDROCLIMATIC CHARACTERIZATION AND ENVIRONMENTAL CHANGES IN MID-MOUNTAIN CATCHMENTS OF THE ATLANTIC-MEDITERRANEAN ECOTONE (WESTERN IBERIAN RANGE)

Abstract. We carried out a hydro-climatic characterization of six mid-mountain headwaters catchments of the Western Iberian Range. These catchments hold Atlantic (Oja, Najerilla and Albercos rivers) and Mediterranean (Cidacos, Linares and Añamaza) bioclimatic characteristics. Analyses include: (i) trends in streamflow, precipitation, and temperature (1965-2015); (ii) response of streamflows to precipitation dynamics; (iii) changes in land use between 1970s and 2010; and (iv) trends in vegetation activity (NDVI). The results show: (1) a generalized decrease in annual, spring and summer streamflows; (2) a generalized decrease in precipitation, especially in the Atlantic catchments; (3) a significant and widespread increase in annual, spring, and summer temperatures; (4) a fast and punctual response of streamflow to precipitation in the Atlantic catchments, and a more sustained response in the Mediterranean ones; and (5) an increase in vegetation activity and forest cover in all catchments.

Keywords: trends, streamflow, precipitation, temperature, land use, hydro-climatic interactions.

1. INTRODUCCIÓN

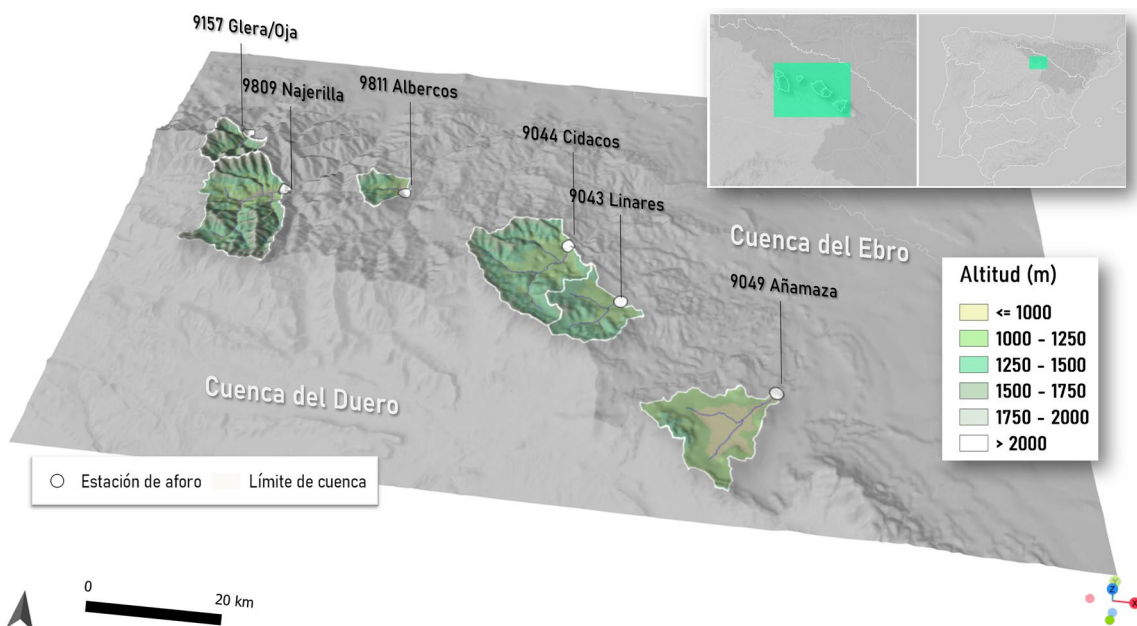
La monitorización y evaluación de cambios hidroclimáticos en ecotonos como el Atlántico-Mediterráneo son de gran interés en el contexto de Cambio Global, ya que es en estas áreas donde se espera que los efectos del Cambio Climático sean más intensos y sus impactos en los recursos hídricos, mayores (Diftenbaugh *et al.*, 2007; García-Ruiz *et al.*, 2011; IPCC, 2022). En el caso de las cuencas del Sistema Ibérico Occidental, el interés es incluso mayor, dado que el abandono de tierras cultivadas desde mediados del siglo XX ha provocado un proceso de revegetación con importantes consecuencias para los recursos hídricos disponibles (Lana-Renault *et al.*, 2018; Morán-Tejeda *et al.*, 2019; Peña-Angulo *et al.*, 2021). Los cambios en los usos del suelo, unidos a las dinámicas climáticas cambiantes en esta zona en particular (incremento de la temperatura y descenso de la precipitación; García-Ruiz *et al.*, 2011; IPCC, 2022) amenazan el futuro mantenimiento tanto de los caudales ecológicos, como de los necesarios para asegurar el suministro aguas abajo, donde el recurso agua es mayoritariamente consumido por la sociedad.

1.1 Objetivos

Los objetivos planteados en esta contribución son los siguientes:

- i. Analizar las tendencias de caudal, precipitación y temperatura ocurridas en las cuencas de estudio entre 1965 y 2015.
- ii. Caracterizar la respuesta hidrológica a la variabilidad y los déficits de precipitación acumulados utilizando índices estandarizados.
- iii. Monitorizar los cambios ocurridos en los usos del suelo y la actividad vegetal en las cuencas durante las últimas décadas.

Figura 1. Localización y topografía de las cuencas analizadas



Fuente: Instituto Geográfico Nacional y Copernicus Land Monitoring System. Elaboración propia.

1.2 Área de estudio

El estudio se ha centrado en seis cuencas de cabecera (y no reguladas mediante embalses) de la cuenca del Ebro, situadas en el Sistema Ibérico Riojano. La Tabla 1 recoge sus características más importantes, donde se pone de manifiesto un marcado gradiente pluviométrico en dirección noroeste-sudeste. Las tres cuencas más occidentales (Oja, Najerilla y Albercos) presentan características bioclimáticas de tipo atlántico, con precipitaciones que oscilan entre los 518 mm del Albercos y los 634 mm

del Najerilla, y caudales específicos por encima de los 0.7 hm³/km². Son, además, las que presentan una mayor altitud media y pendientes más pronunciadas. Por su parte, las cuencas más orientales (Cidacos, Linares y Añamaza) presentan influencias mediterráneas, con precipitaciones inferiores a los 500 mm y caudales específicos muy alejados de las cuencas anteriores, pues no llegan a 0.2 hm³/km². En las cuencas atlánticas, las coberturas del suelo más importantes son bosque y matorral, mientras que en las de carácter mediterráneo el bosque cede importancia en favor de otras cubiertas como pastos o cultivos. Estos últimos son la cobertura más importante en la cuenca del Añamaza.

Tabla 1. Características de las cuencas analizadas. Las variables hidroclimáticas promediadas corresponden al periodo 1965-2015

Est. aforo (ID)	Cuenca	Área (km ²)	Altitud media (m)	Pendiente media (%)	Caudal medio anual (hm ³)	Caudal específico (hm ³ /km ²)	Temp. media anual (C°)	Prec. media anual (mm)
9157	Glera/Oja	65,1	1502	45,8	66,39	1,01	7,33	614,11
9809	Najerilla	238,3	1388	37,13	173,8	0,72	7,95	634,54
9811	Albercos	43,1	1297	23,43	47,36	1,10	9,44	517,94
9044	Cidacos	225,2	1334	22,12	42,6	0,18	9,36	496,78
9043	Linares	105,1	1305	15,96	17,13	0,16	9,7	490,8
9049	Añamaza	149,5	1064	9,29	2,45	0,01	10,86	415,19

Fuente: Instituto Geográfico Nacional, Anuario de aforos (CEDEX), base de datos climática Spain02 (Herrera *et al.*, 2016, 2012). Elaboración propia.

2. BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA

2.1 Base de datos

2.1.1 Caudales hidrológicos

Las series de caudal mensual (aportaciones en hm³) utilizadas en el estudio fueron obtenidas de la página web del Anuario de Aforos del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX; <https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>). La selección de las mismas se basó en su completitud (<10% de datos perdidos) durante el periodo analizado (1965-2015), y se usó un modelo de regresión lineal basado en series de caudal del mismo curso fluvial para rellenar los huecos en las series. La localización de las estaciones de aforo (series de caudal) sirvió para delinear las cuencas de drenaje para las que se calcularon las series regionales de precipitación, temperatura y actividad vegetal (Figura 1), utilizando para ello un modelo digital de elevaciones de 25 m de resolución (<https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1>).

2.1.2 Datos climáticos

Los datos climáticos (precipitación y temperatura mensual) utilizados pertenecen a la base de datos en rejilla Spain02 v5.0 (Herrera *et al.*, 2016, 2012; <https://github.com/SantanderMetGroup>). Utilizando los valores de los píxeles (0,1° x 0,1° ≈ 9 x 9 km) contenidos en las cuencas objeto de estudio, se calcularon series regionales de precipitación y temperatura mensual, ponderando el promedio de los valores por el porcentaje de cubrimiento de cada píxel de la rejilla sobre el total de la extensión de la cuenca.

2.1.3 Usos del suelo y actividad vegetal

El análisis de cambios en los usos de suelo se realizó a partir del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de 1978 y 2010 (<https://www.mapa.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/default.aspx>). En ambos casos, las teselas de 1 x 1 km expresan predominancia de uso del suelo.

Los datos de actividad vegetal (resumidos en el Índice de Vegetación Normalizado, NDVI por su acrónimo inglés) son los correspondientes a la base de datos GIMSS3g.v1 (Pinzon y Tucker, 2014), derivada de observaciones AVHRR con una cobertura temporal de 1982 a 2015, y un tamaño de píxel de

(0,88° x 0,88°) unos 6 x 6 km de lado. Con los valores mensuales de NDVI en rejilla se procedió del mismo modo que en 2.1.2 para calcular las series regionales de NDVI.

2.2 Estandarización de variables hidro-climáticas

Una medida de la respuesta hidrológica a la variabilidad climática se puede obtener correlacionando los caudales estandarizados (comparables en tiempo y espacio y libres de sesgo en las distribuciones; López-Moreno *et al.*, 2013; Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2013), con los déficits de precipitación (éstos también estandarizados y acumulados a escalas temporales de 1 a 48 meses). Para ello se calcularon el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI por su acrónimo inglés; McKee, 1995; McKee *et al.*, 1993) y el Índice de Caudal Estandarizado (SSI; Vicente-Serrano *et al.*, 2012) a escala mensual, utilizando para ello los datos descritos en 2.1.

2.3 Análisis de tendencias

Para la detección de tendencias monotónicas (1965-2015) en las series estacionales y anuales de caudal, precipitación, temperatura y NDVI, se aplicó la prueba de Mann-Kendall, con pre-blanqueo de las series para eliminar la autocorrelación temporal (Yue *et al.*, 2003) (paquete zyp de R).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Dinámicas hidro-climáticas

3.1.1 Tendencias de caudal

Los resultados del análisis de tendencias de los caudales muestran un descenso generalizado de los mismos en todas las cuencas (Tabla 2), con diferencias estacionales. A escala anual, a pesar de que todas las tendencias son negativas, tan solo en el caso del Cidacos ésta es significativa. Del mismo modo ocurre en primavera. Es en verano, la estación crítica para el mantenimiento de caudales ecológicos y cuando la demanda evaporativa es mayor, cuando se han registrado más tendencias negativas significativas (Albercos, Cidacos y Linares).

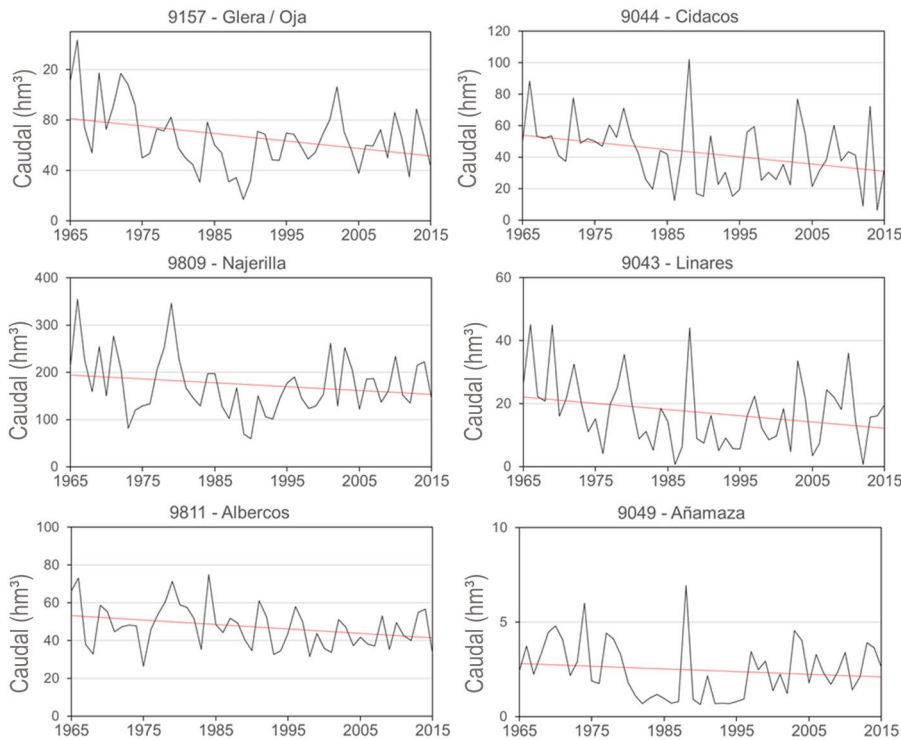
Tabla 2. Resumen del análisis de tendencias de caudal. Las tendencias significativas (p -valor < 0.1) se muestran en **negrita**

Estación de aforo (código)	Cuenca	Anual (hm ³)	Invierno (hm ³)	Primavera (hm ³)	Verano (hm ³)	Otoño (hm ³)
9157	Oja	-22,65	2,55	-1,59	-2,84	-10,47
9809	Najerilla	-25,37	2,12	-13,37	-4,56	2,02
9811	Albercos	-11,73	-1,31	-4,41	-2,7	-1,52
9044	Cidacos	-24,51	-7,69	-11,83	-3,94	-0,89
9043	Linares	-8,085	-1,85	-0,04	-0,48	-0,16
9049	Añamaza	-0,58	-0,16	-0,14	0,15	-0,15

Fuente: Anuario de aforos (CEDEX). Elaboración propia.

A pesar de que el test de tendencia solo ha estimado significativa la tendencia anual en el Cidacos, la Figura 2 muestra que los descensos de los caudales a escala anual han sido muy importantes en todas las cuencas. En el caso de las cuencas atlánticas, éstas han perdido un 37% (Oja), 25% (Najerilla) y un 27% aproximadamente del caudal medio anual durante los últimos 50 años. En las cuencas mediterráneas el descenso de las aportaciones anuales es todavía mayor: 45% de reducción en el Cidacos, 40% en el Linares y un 20% en el Añamaza. Estos resultados están en la línea de los obtenidos en estudios previos (Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2012; Peña-Angulo *et al.*, 2021), en los que se destacaba un descenso generalizado de los caudales en la Península Ibérica, tanto en cuencas reguladas mediante embalses como en cuencas naturalizadas de cabecera.

Figura 2. Evolución del caudal medio anual en las cuencas de estudio



Fuente: Anuario de aforos (CEDEX). Elaboración propia.

La variabilidad interanual de los caudales también es destacable, siendo más amplia en el caso de las cuencas mediterráneas. En todos los casos es posible identificar años especialmente húmedos o caudalosos (1966, 1979 o 2013) o especialmente secos (1976, 1990 o 2002), que corroboran el control climático que existe sobre la generación de caudal en estas cuencas.

3.1.2 Tendencias de precipitación

Los resultados del análisis de tendencias de la precipitación muestran un importante contraste entre las cuencas atlánticas y mediterráneas (Tabla 3). A escala anual, las tendencias significativas han sido observadas tan solo en el Albercos y el Añamaza. Sin embargo, existe un patrón particular en primavera y verano, estaciones en las que todas las cuencas atlánticas (Glera/Oja, Najerilla y Albercos) experimentan tendencias negativas significativas. Estas tendencias son críticas, ya que coinciden con las épocas de mayores temperaturas y, por lo tanto, de mayores pérdidas de agua por la gran demanda evaporativa de la atmósfera, pudiendo provocar episodios de sequía repentinos (Noguera *et al.*, 2021; Vicente-Serrano *et al.*, 2020). Por el contrario, las tendencias durante el otoño son positivas (aunque no significativas) en todos los casos, lo que podría estar causado por el aumento de la temperatura del Mar Mediterráneo y el incremento de fenómenos de DANAs (depresiones aisladas en niveles altos) asociadas a la circulación de la corriente en chorro (Romero *et al.*, 1999). Los resultados de las tendencias de precipitación coinciden con los obtenidos en estudios previos llevados a cabo en ámbitos espaciales más amplios (González-Hidalgo *et al.*, 2011).

La atribución de las tendencias negativas de los caudales a la variabilidad pluviométrica no es clara ni unívoca. Como se muestra en 3.1.1, las tendencias de la precipitación negativas de primavera y verano en las cuencas atlánticas no han tenido una traslación directa en las tendencias de caudal (salvo en el Albercos), y el descenso de los caudales en el Cidacos y Linares no puede atribuirse a un descenso de las precipitaciones. Esto podría sugerir que otros factores, como la temperatura o el consumo por parte de la vegetación, estarían adquiriendo un papel preponderante para explicar las dinámicas de los caudales hidrológicos (Morán-Tejeda *et al.*, 2012; Peña-Angulo *et al.*, 2021).

Tabla 3. Resumen del análisis de tendencias de precipitación. Las tendencias significativas (p -valor < 0.1) se muestran en **negrita**

Estación de aforo (código)	Cuenca	Anual (mm)	Invierno (mm)	Primavera (mm)	Verano (mm)	Otoño (mm)
9157	Oja	-97,97	-41,08	-80,57	-63,32	1,92
9809	Najerilla	-65,33	-45,25	-78,82	-60,85	5,94
9811	Albercos	-123,32	-31,08	-76,33	-53,38	1,041
9044	Cidacos	-70,89	-8,22	-42,55	-28,66	21,30
9043	Linares	-72,96	-12,92	-41,33	-35,35	17,62
9049	Añamaza	-120,86	-36,35	-21,55	-49,92	16,09

Fuente: Base de datos climática Spain02 (Herrera *et al.*, 2016, 2012). Elaboración propia.

3.1.3 Tendencias de temperatura

Las tendencias de las temperaturas son mucho más homogéneas a lo largo del área de estudio y de las escalas temporales analizadas. Se observan tendencias positivas significativas a escala anual en todas las cuencas, aunque éstas son especialmente importantes en el Albercos y las tres cuencas mediterráneas, en las que el calentamiento ha superado 1°C desde 1965. El patrón es similar en verano, con un calentamiento extraordinario que ha superado 1.5°C en el Cidacos, y 2°C en el Linares y el Añamaza. Las consecuencias hidrológicas de estas tendencias son muy relevantes, ya que estarían aumentando de manera muy importante las pérdidas por evaporación en las láminas de agua, así como la evapotranspiración de la vegetación, a la vez que reducirían de manera muy notable la humedad del suelo. Sin embargo, durante la primavera, el calentamiento ha sido mayor en las cuencas atlánticas, que reciben mayor aportación de precipitación en forma de nieve, lo cual podría estar modificando los picos de fusión nival en esta zona, adelantándolos a principios de primavera o finales de invierno (Morán-Tejeda *et al.*, 2014).

Tabla 4. Resumen del análisis de tendencias de temperatura. Las tendencias significativas (p -valor < 0.1) se muestran en negrita

Estación de aforo (código)	Cuenca	Anual (°C)	Invierno (°C)	Primavera (°C)	Verano (°C)	Otoño (°C)
9157	Oja	0,88	-0,17	1,43	0,71	-0,13
9809	Najerilla	0,72	0,03	1,42	0,25	-0,20
9811	Albercos	1,01	0,28	1,58	0,90	0,38
9044	Cidacos	1,11	-0,11	1,08	1,69	0,68
9043	Linares	1,26	-0,30	1,04	2,08	0,77
9049	Añamaza	1,11	-0,42	1,09	2,01	0,71

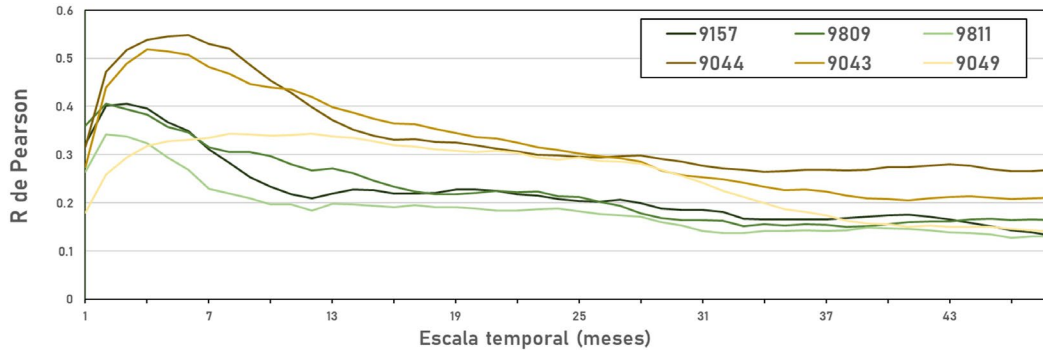
Fuente: Base de datos climática Spain02 (Herrera *et al.*, 2016, 2012). Elaboración propia.

3.2 Interacciones hidro-climáticas

La respuesta hidrológica (caudales) a la variabilidad de la precipitación (déficits acumulados a escalas de 1 a 48 meses) muestran una clara diferenciación entre las cuencas atlánticas y mediterráneas. Las primeras (verdes) muestran un patrón de respuesta rápido y puntual a la variabilidad de la precipitación, con la máxima correlación ($r \sim 0,4$) obtenida a la escala de 2 y 3 meses (Figura 3). Esto indica que el caudal en estas cuencas depende, fundamentalmente, de la precipitación registrada en el mes corriente y en los dos anteriores (Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2013). Este tipo de respuesta rápida se relaciona con cuencas de elevadas pendientes, con procesos acelerados de escorrentía (López-Moreno *et al.*, 2013). La moderada correlación obtenida estaría indicando la existencia de un factor disruptivo entre la variabilidad climática e hidrológica, muy posiblemente relacionado con el papel consuntivo de la vegetación (predominantemente bosque en estas cuencas atlánticas; ver figura 4). En el caso de las cuencas mediterráneas (amarillos) la respuesta hidrológica se produce de forma más sostenida y a escalas temporales más largas ($r \sim 0,55$ a los 6 meses), lo que indicaría, por un lado, una fisiografía de cuenca más tendida, con pendientes más suaves que ralentizarían los procesos de escorrentía; por otro lado, pondría de manifiesto el papel que en estos ambientes tienen los suelos desecados, que mientras se recargan de humedad e infiltran agua, evitan la activación de la relación precipitación-caudal a corto plazo ($r < 0.3$ entre el SSI y el SPI a la escala de un mes) (Orth and Destouni, 2018); y finalmente, mostrarían una relación más estrecha entre la precipitación

y el caudal (mayores correlaciones máximas SSI-SPI en comparación con las cuencas atlánticas), por la menor cobertura y densidad vegetal en estas cuencas (López-Moreno *et al.*, 2013; Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2013).

Figura 3. Respuesta hidrológica a la variabilidad de la precipitación. Correlaciones entre el SSI y el SPI



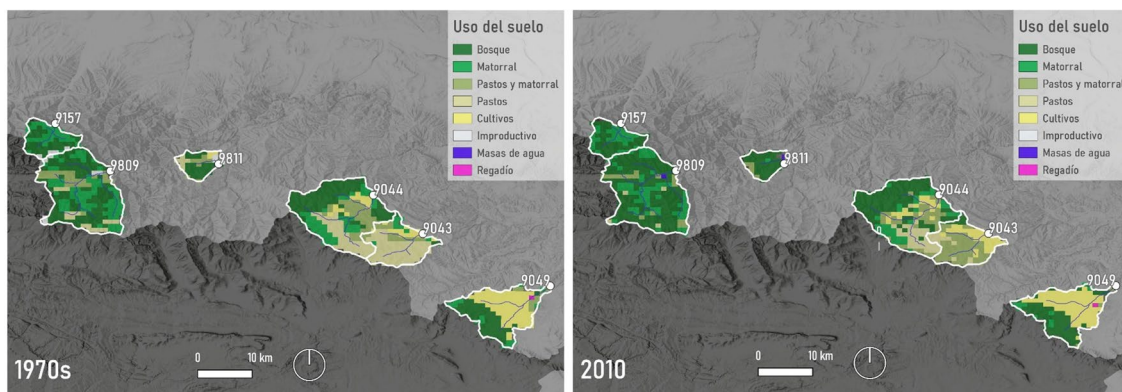
Fuente: Anuario de aforos (CEDEX) y Spain02 (Herrera *et al.*, 2016, 2012). Elaboración propia.

Los análisis de correlación mensual entre el SSI y el SPI (no se muestran) han revelado que las correlaciones durante julio y agosto ($r < 0,1$) son mucho menores que las registradas durante el invierno ($r > 0,7$). Estas diferencias estarían indicando que, durante el verano, cuando la demanda evaporativa es mayor, el papel del factor disruptivo vegetación se incrementa (por el consumo de agua por parte de la vegetación), anulando prácticamente la relación precipitación-caudal.

3.3 Cambios en los usos del suelo y de la actividad vegetal

Los cambios en los usos del suelo de las cuencas estudiadas se resumen en un aumento notable de la cobertura forestal (bosques) en todas las cuencas, especialmente en las atlánticas, favorecido por el abandono de campos cultivados y pastos y por la sucesión vegetal de matorral a bosques. Estos cambios son extrapolables a otras cuencas de montaña de la región mediterránea (García-Ruiz y Lana-Renault, 2011; Lana-Renault *et al.*, 2020) en las que el abandono de pastos y tierras cultivadas ha dado lugar a un proceso de revegetación (*rewilding*), que, siguiendo el esquema de sucesión vegetal, han sido cubiertas por matorral (o mezcla de matorral y pastos), y posteriormente por bosques.

Figura 4. Cambio de los usos del suelo ocurridos en las cuencas durante el periodo de estudio



Fuente: Mapa de cultivos y aprovechamientos (<https://www.mapa.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/default.aspx>). Elaboración propia.

Estos cambios en los usos del suelo aparecen sintetizados en forma de tendencias de NDVI en la Tabla 5, en la que se observa un incremento significativo de la actividad vegetal durante el invierno en todas las cuencas (entre un 7 y un 10% en las cuencas atlánticas, y alrededor de un 5% en las mediterráneas). Las tendencias también son significativas, aunque de menor entidad (entre el 2 y el 4%) durante el verano en

las cuencas atlánticas. El incremento significativo de la actividad vegetal en estas dos estaciones podría estar favorecido por las tendencias de las temperaturas. En invierno, un aumento de las temperaturas estaría adelantando el momento de brote y floración de determinadas especies (incrementando la cobertura foliar y en consecuencia el NDVI), mientras que, en verano, excepto bajo condiciones de estrés hídrico, un aumento de la temperatura y el incremento de horas de sol asociado, favorecería la actividad fotosintética (Frank et al., 2015). Este aumento de la actividad vegetal en invierno y verano se reflejaría en un mayor consumo de agua por parte de la vegetación en dos estaciones clave: en invierno, por ser la estación en la que más caudales se generan; y en verano, cuando la demanda atmosférica es mayor.

Tabla 5. Resumen del análisis de tendencias de NDVI. Las tendencias significativas (p -valor < 0.1) se muestran en negrita

Estación de aforo (código)	Cuenca	Anual	Invierno	Primavera	Verano
9157	Oja	0,558	0,098	0,591	0,038
9809	Najerilla	0,551	0,081	0,631	0,046
9811	Albercos	0,587	0,077	0,651	0,024
9044	Cidacos	0,485	0,048	0,59	0,042
9043	Linares	0,496	0,054	0,595	0,011
9049	Añamaza	0,408	0,058	0,565	0,026

Fuente: NDVI GIMSS3g.v1. Elaboración propia.

4. CONCLUSIÓN

Los resultados del estudio muestran la elevada variabilidad, tanto hidrológica como climática, en un gradiente transicional de apenas 100 km, poniendo de manifiesto la necesidad de estudios de detalle a escala de cuenca. El aumento de la vegetación, las tendencias positivas de las temperaturas y una disminución de las precipitaciones son factores explicativos del descenso generalizado de los caudales, si bien esta tendencia negativa todavía no es significativa en la mayor parte de las cuencas estudiadas. Estudios como el que se presenta resaltan la necesidad de repensar la gestión hidrológica de forma integral (considerando los cambios de usos del suelo en cabecera), con el objetivo de alcanzar un equilibrio sostenible entre la futura disponibilidad (menguante) del recurso agua, y la creciente demanda, tanto antrópica (usos socioeconómicos consuntivos), como natural (mayor evapotranspiración por parte de la vegetación).

Agradecimientos: Esta comunicación se ha realizado en el marco del proyecto de investigación MOUNTWATER- Recursos hídricos para el futuro: estrategias científicas basadas en la naturaleza para conciliar gestión del territorio y disponibilidad de agua en la montaña Mediterránea (TED2021-131982B-I00). Ministerio de Ciencia e Innovación.

REFERENCIAS

- Diffenbaugh, N.S., Pal, J.S., Giorgi, F., Gao, X. (2007). Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot. *Geophys. Res. Lett.* 34, L11706. <https://doi.org/10.1029/2007GL030000>
- Frank, D.C., Poulter, B., Saurer, M., Esper, J., Huntingford, C., Helle, G., Treydte, K., Zimmermann, N.E., Schleser, G.H., Ahlström, A., Ciais, P., Friedlingstein, P., Levis, S., Lomas, M., Sitch, S., Viovy, N., Andreu-Hayles, L., Bednarz, Z., Berninger, F., Boettger, T., D'alessandro, C.M., Daux, V., Filot, M., Grabner, M., Gutierrez, E., Haupt, M., Hiltunen, E., Jungner, H., Kalela-Brunidin, M., Krapiec, M., Leuenberger, M., Loader, N.J., Marah, H., Masson-Delmotte, V., Pazdur, A., Pawelczyk, S., Pierre, M., Planells, O., Pukiene, R., Reynolds-Henne, C.E., Rinne, K.T., Saracino, A., Sonninen, E., Stievenard, M., Switsur, V.R., Szczepanek, M., Szychowska-Krapiec, E., Todaro, L., Waterhouse, J.S., Weigl, M. (2015). Water-use efficiency and transpiration across European forests during the Anthropocene. *Nat. Clim. Chang.* 2014 56 5, 579–583. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2614>
- García-Ruiz, J.M., Lana-Renault, N. (2011). Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region - A review. *Agric. Ecosyst. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.003>

- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta-Martínez, T., Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006>
- González-Hidalgo, J.C., Brunetti, M., de Luis, M. (2011). A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945–November 2005). *Int. J. Climatol.* 31, 715–731. <https://doi.org/10.1002/joc.2115>
- Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M. (2016). Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: Assessing the effect of the interpolation methodology. *Int. J. Climatol.* 36, 900–908. <https://doi.org/10.1002/joc.4391>
- Herrera, S., Gutiérrez, J.M., Ancell, R., Pons, M.R., Frías, M.D., Fernández, J. (2012). Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *Int. J. Climatol.* 32, 74–85. <https://doi.org/10.1002/joc.2256>
- IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the *Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Aleg. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Lana-Renault, N., López-Vicente, M., Nadal-Romero, E., Ojanguren, R., Llorente, J.A., Errea, P., Regüés, D., Ruiz-Flaño, P., Khorchani, M., Arnáez, J., Pascual, N. (2018). Catchment based hydrology under post farmland abandonment scenarios. *Geogr. Res. Lett.* 44, 503–534. <https://doi.org/10.18172/CIG.3475>
- Lana-Renault, N., Morán-Tejeda, E., Moreno-de las Heras, M., Lorenzo-Lacruz, J., López-Moreno, J.I. (2020). Land use change and impacts, in: Zribi, M., Brocca, L., Trambly, Y., Molle, F. (Eds.), *Water Resources in the Mediterranean Region*. Elsevier, pp. 257–296. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818086-0.00010-8>
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Zabalza, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., Moran-Tejeda, E. (2013). Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. *J. Hydrol.* 477, 175–188. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.028>
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., González-Hidalgo, J.C., López-Moreno, J.I., Cortesi, N. (2013). Hydrological drought response to meteorological drought in the Iberian Peninsula. *Clim. Res.* 58, 117–131. <https://doi.org/10.3354/cr01177>
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J. (2012). Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005). *J. Hydrol.* 414, 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.023>
- McKee, T. (1995). Drought monitoring with multiple time scales, in: American Meteorological Society (Ed.), *Ninth Conference on Applied Climatology*. Dallas (TX), pp. 233–236.
- McKee, T., Doesken, J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales., in: *Eight Conf. On Applied Climatology*. Anaheim (California), pp. 179–184.
- Morán-Tejeda, E., Ceballos-Barbancho, A., Llorente-Pinto, J.M., López-Moreno, J.I. (2012). Land-cover changes and recent hydrological evolution in the Duero Basin (Spain). *Reg. Environ. Chang.* 12, 17–33. <https://doi.org/10.1007/s10113-011-0236-7>
- Morán-Tejeda, E., Fassnacht, S.R., Lorenzo-Lacruz, J., López-Moreno, J.I., García, C., Alonso-González, E., Collados-Lara, A.-J. (2019). Hydro-Meteorological Characterization of Major Floods in Spanish Mountain Rivers. *Water* 11, 2641. <https://doi.org/10.3390/w11122641>
- Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., López-Moreno, J.I., Rahman, K., Beniston, M. (2014). Streamflow timing of mountain rivers in Spain: Recent changes and future projections. *J. Hydrol.* 517, 1114–1127. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.053>
- Noguera, I., Domínguez-Castro, F., Vicente-Serrano, S.M. (2021). Flash drought response to precipitation and atmospheric evaporative demand in Spain. *Atmosphere* (Basel). 12, 1–22. <https://doi.org/10.3390/ATMOS12020165>
- Orth, R., Destouni, G. (2018). Drought reduces blue-water fluxes more strongly than green-water fluxes in Europe. *Nat. Commun.* 9. <https://doi.org/10.1038/S41467-018-06013-7>
- Peña-Angulo, D., Vicente-Serrano, S.M., Domínguez-Castro, F., Noguera, I., Tomas-Burguera, M., López-Moreno, J.I., Lorenzo-Lacruz, J., El Kenawy, A. (2021). Unravelling the role of vegetation on the different

- trends between climatic and hydrologic drought in headwater catchments of Spain. *Anthropocene* 36, 100309. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100309>
- Pinzon, J.E., Tucker, C.J. (2014). A non-stationary 1981-2012 AVHRR NDVI3g time series. *Remote Sens.* 6, 6929–6960. <https://doi.org/10.3390/rs6086929>
- Romero, R., Sumner, G., Ramis, C., Genovés, A. (1999). A classification of the atmospheric circulation patterns producing significant daily rainfall in the Spanish Mediterranean area. *Int. J. Climatol.* 19, 765–785. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19990615\)19:7<765::AID-JOC388>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19990615)19:7<765::AID-JOC388>3.0.CO;2-T)
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., Moran-Tejeda, E. (2012). Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *J. Hydrol. Eng.* 17, 318–332. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433)
- Vicente-Serrano, S.M., McVicar, T.R., Miralles, D.G., Yang, Y., Tomas-Burguera, M. (2020). Unraveling the influence of atmospheric evaporative demand on drought and its response to climate change. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.* 11, e632. <https://doi.org/10.1002/WCC.632>
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B. (2003). Canadian streamflow trend detection: Impacts of serial and cross-correlation. *Hydrol. Sci. J.* 48, 51–64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1623/hysj.48.1.51.43478>