

1. Introducción

Numerosos factores alteran la respuesta de la parte terrestre del ciclo hidrológico ante la variabilidad climática: procesos de carga y descarga de acuíferos, procesos de acumulación y fusión nivales, e interferencias antrópicas relacionadas con la gestión hidrológica. Estas perturbaciones hacen que el aislamiento de la influencia del clima sea difícil, debido a que la respuesta hidrológica a la precipitación puede variar marcadamente en función del tiempo, como resultado de las diferentes frecuencias de las variables hidrológicas y climáticas.

Por otra parte, la sequía se considera un fenómeno multi-escalar, debido a que los déficits de precipitación se manifiestan en distintos sistemas y a distintas escalas temporales. Este hecho es muy importante para la cuantificación y monitorización de las sequías, ya que la escala a la que los déficits de precipitación se acumulan, separa los diferentes tipos de sequía, y permite la cuantificación de los retardos entre las sequías climáticas y las hidrológicas. La cuantificación de dichos retardos resulta de gran importancia en un ámbito espacial como la Península Ibérica, que sufre de manera habitual la recurrencia de sequías, tanto climáticas como hidrológicas.

2. Área de estudio

La precipitación en la Península Ibérica presenta una gran complejidad espaciotemporal, debida a su localización en la transición entre dos zonas climáticas y por la disposición de la orografía, que genera grandes contrastes en el reparto pluviométrico (Figura 1). Este reparto genera una desigual distribución de los caudales ibéricos: las cuencas septentrionales de la vertiente Atlántica generan abundantes caudales (10570hm³/año el Miño, 13788hm³/año el Duero y 12350hm³/año el Tago), mientras que las cuencas más meridionales presentan caudales más modestos (4039hm³/año el Guadalquivir y 3780hm³/año el Guadiana). Los caudales de los grandes ríos de la vertiente Mediterránea son generalmente bajos, a excepción del Ebro (12279hm³/año). Este desequilibrio en la distribución de los recursos hídricos ha motivado al construcción de una amplia red de grandes embalses (1195 en el año 2000), con una capacidad total de 56500hm³, lo que equivale al caudal medio anual de los 8 grandes ríos peninsulares.

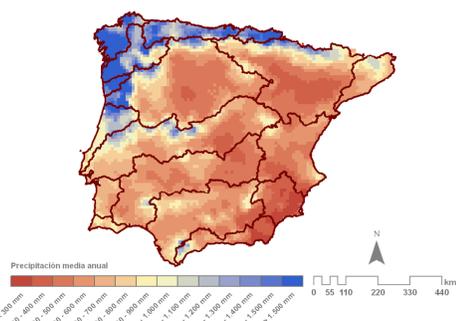


Figura 1. Distribución de la precipitación media anual en la Península Ibérica entre 1945 y 2005.

3. Base de datos

La base de datos hidrológica está compuesta por 187 series de caudal mensual de calidad contrastada y distribuidas uniformemente por toda la Península (Figura 2). Las series fueron transformadas en anomalías de caudal estandarizadas mediante el mejor ajuste respecto a 6 distribuciones de probabilidad (General de los Valores Extremos, Pearson III, Loglogística, LogNormal, General de Pareto y Weibull), para asegurar la comparabilidad de los resultados independientemente de los regímenes de caudal o de la magnitud de las descargas. Mediante este proceso se obtuvieron 187 series mensuales del Índice de Caudal Estandarizado (SSI, Vicente-Serrano et al., 2012).

La base de datos de precipitación empleada fue la base de datos MOPREDAS (MONTHLY PRECIPITATION DATABASE of Spain; González-Hidalgo et al., 2011), a la cual se le añadieron 380 series de precipitación portuguesas siguiendo el mismo protocolo para la detección de datos anómalos, el análisis de homogeneidad y el relleno de lagunas. Con un total de 3056 series de precipitación mensual se generó un grid de precipitación (10x10km) que sirvió para calcular las series de precipitación media de cada una de las 187 cuencas de drenaje de las que se disponía de datos de caudal. Basándonos en dichas series de precipitación se calculó el SPI promedio de cada cuenca de drenaje a las escalas de 1 a 48 meses.

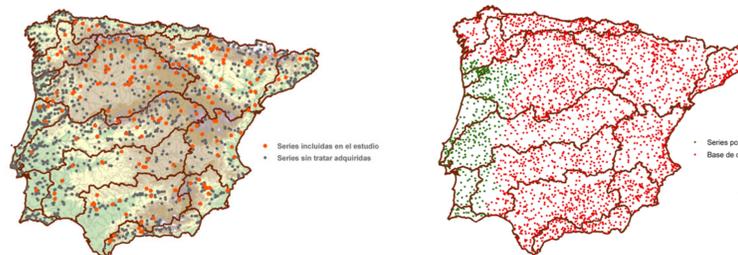


Figura 2. Izquierda: distribución de las estaciones de aforo cuyas series se incluyeron en el estudio. Derecha: distribución de las estaciones meteorológicas incluidas en el estudio.

4. Metodología

Para obtener una medida del impacto de las sequías climáticas sobre los caudales de los ríos, se calculó la correlación (r de Pearson) entre los índices de sequía climática (SPI) e hidrológica (SSI). Ello permitió obtener 187 curvas de correlación (correlaciones continuas de 1 a 48 meses) sobre las que basar la realización de un Análisis de Componentes Principales (ACP). A partir del mismo se extrajeron los patrones generales en la respuesta de las sequías hidrológicas a diferentes escalas temporales de las sequías climáticas en la Península Ibérica.

5. Resultados

Patrones generales de la respuesta hidrológica ante condiciones de sequía climática.

La Figura 3 presenta los resultados obtenidos al realizar un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre las curvas de correlación calculadas entre el SSI y el SPI (a escalas de 1 a 48 meses) en cada una de las 187 estaciones de aforo. Los dos componentes extraídos explican el 91.12% de la varianza total, tras aplicarse una rotación Varimax. El primer componente Principal resume el 65.17% de la varianza y está caracterizado por la respuesta hidrológica a las sequías climáticas a escalas temporales cortas. Las correlaciones obtenidas son positivas para todas las escalas temporales, siendo especialmente altas considerando el SPI a escalas temporales entre 1 y 4 meses, aunque la mayor correlación se registra a la escala de 2 meses ($R=0.37$). Este tipo de respuesta revela que los valores de SSI dependen en mayor medida de la precipitación acumulada durante los dos meses anteriores. El segundo componente Principal explica el 26% de la varianza total. Las correlaciones son positivas en todos los casos. Sin embargo, aunque la respuesta del segundo componente es baja a escalas temporales cortas, ésta aumenta considerablemente a partir de la escala temporal de 6 meses. La máxima correlación se registra a la escala temporal de 12 meses ($R=0.55$), si bien la correlación es también significativa a escalas temporales más largas. En este caso los valores de SSI están especialmente relacionados con la cantidad de precipitación registrada durante los doce meses previos, aunque el papel de la precipitación de los años anteriores no resulta despreciable. El tipo de respuesta a escalas temporales cortas que caracteriza el comportamiento del primer componente Principal coincide con los resultados de Slazai et al. (2000), que encontraron la máxima correlación entre el SPI y los caudales de varias cuencas de pequeño tamaño en Hungría considerando la escala de 2 meses. En la Península Ibérica, Vicente-Serrano y López Moreno (2005) observaron un patrón similar al analizar la respuesta de la cuenca del río Aragón en los Pirineos centrales. Este tipo de respuesta rápida se asocia con cuencas de intensa generación de escorrentía, favorecida por pendientes pronunciadas, un área de drenaje relativamente pequeña y sustratos rocosos de escasa permeabilidad (López-Moreno et al., 2012). Por su parte, el patrón revelado por el segundo componente Principal introduce un tipo de respuesta totalmente distinto. La acumulación de los impactos de los déficits de precipitación sobre la generación de caudales se produce durante largos periodos de tiempo. Este hecho estaría relacionado con las características de las sequías hidrológicas (de extrema duración) en gran parte de estas zonas (Lorenzo-Lacruz et al., 2012); lo que hace intuir que otros factores distintos de los fisiográficos, entre los que destacarían la regulación y las prácticas de gestión hídrica, están influyendo en ese tipo de respuesta y en la agregación temporal de los impactos de la sequía climática en la generación de caudales.

La respuesta de los ríos no regulados a la sequía climática y la importancia de la litología de las diferentes cuencas.

La Figura 4 muestra los resultados del ACP realizado sobre las curvas de correlación calculadas entre el SSI y el SPI a las escalas temporales de 1 a 48 meses en las 58 estaciones de aforo que no presentan una regulación previa mediante presas. El primer componente agrupa el 67.47% de la varianza total y se caracteriza por una fuerte respuesta hidrológica ante condiciones de sequía climática a escalas temporales cortas. Las correlaciones son positivas entre las escalas temporales de 1 a 30 meses, y la máxima ($R=0.4$) se vuelve a alcanzar a la escala temporal de 2 meses. La correlación desciende bruscamente a partir de la escala temporal de 2 meses y deja de ser significativa a partir de la escala temporal de 10 meses. El segundo componente principal explica el 19.29% de la varianza total. De nuevo se observa una curva con unos valores de correlación entre el SPI y el SSI bajos considerando escalas temporales cortas, que se incrementan a partir de la escala temporal de 6 meses para alcanzar el máximo ($R=0.59$) a la escala temporal de 12 meses. En este caso se vuelve a poner de manifiesto la dependencia de los valores de SSI a las precipitaciones de los 2 años previos. El primer componente, representativo de cuencas en las cabeceras de los ríos, muestra una correlación entre el SSI y el SPI a escalas temporales cortas. Este comportamiento puede estar ligado a elevados coeficientes de escorrentía en zonas con un predominio de litologías poco permeables. En el caso del segundo componente, vuelve a observarse un patrón de respuesta hidrológica ante condiciones de sequía climática a escalas temporales largas. Sin embargo en este caso, al tratarse de cuencas sin regular, se desmiente que la fuerte inercia temporal que caracteriza la respuesta hidrológica de estas cuencas se deba a la gestión hidrológica. Como ya se apuntaba en Lorenzo-Lacruz et al. (2010), el papel de las litologías permeables es relevante en algunas de estas zonas, lo que permite el establecimiento de procesos de recarga de acuíferos. Por ello, la presencia de litologías calizas en parte de las cabeceras de cuencas no reguladas explicaría procesos de recarga y descarga de acuíferos en dichas cuencas, que pueden ser responsables de la agregación temporal de la respuesta hidrológica a condiciones de sequía climática. Las cuencas representadas por el primer componente, salvo alguna excepción, presentan porcentajes de superficie caliza muy bajos, con una media inferior al 10%. Este hecho reafirma la idea de que las cuencas con respuestas rápidas están asociadas a litologías poco permeables. Por su parte, las cuencas representadas por el segundo componente presentan importantes porcentajes de cubrimiento calizo, con un valor medio por encima del 30%.

Modificaciones introducidas por la gestión hidrológica en la respuesta de los ríos ibéricos ante las sequías climáticas.

La Figura 5 muestra las curvas de correlación, dos por componente, obtenidas del análisis de las 71 cuencas que fueron reguladas durante el periodo de estudio (1945-2005). En cada caso se obtuvieron dos curvas de correlación distintas entre el SSI y el SPI a escalas temporales de 1 a 48 meses; la primera, que expresa las correlaciones desde 1945 hasta el año en que se reguló cada una de las cuencas y, la segunda con las correlaciones desde el año en que se produjo la regulación hasta 2005. El primer componente resume el 32.9% de la varianza, y muestra una modificación del patrón de respuesta a escalas temporales cortas observado hasta ahora. Antes de la regulación estas cuencas muestran una respuesta alta ($R>0.5$) al SPI considerando escalas temporales de 2 y 3 meses. Tras el represamiento aguas arriba, si bien la curva de correlación mantiene el mismo patrón, estas cuencas experimentan un descenso de su sensibilidad a la sequía climática: en este caso, aunque la máxima correlación ($R=0.38$) también se registra a una escala temporal de 2 meses, sólo se registran correlaciones mayores de $R>0.3$ entre las escalas de 2 y 9 meses. Las curvas de correlación del segundo componente (31.1% de la varianza) muestran una inversión total en la configuración entre los dos periodos analizados. Antes de la regulación muestran una mayor sensibilidad ($R=0.34$) a la escala temporal de 2 meses, mientras que las correlaciones descienden bruscamente a escalas temporales mayores como sucede en los sistemas englobados en el primer componente; tras el represamiento, los caudales pasaron a responder a escalas temporales mucho más largas, con correlaciones superiores a $R>0.3$ entre los 8 y 38 meses, adquiriendo la configuración del segundo gran patrón general observado, caracterizado por largas inercias temporales en la respuesta hidrológica ante las condiciones de sequía climática. El tercer componente identificado explica el 19.6% de la varianza y está ligado a cuencas que antes de ser reguladas mostraban una correlación alta con el SPI a escalas temporales medias y largas ($R>0.5$ entre los 7 y los 28 meses), y que tras la regulación aguas arriba experimentaron una reducción de la magnitud de las correlaciones a la vez que una homogeneización de la inercia temporal, con correlaciones en torno a $R=0.4$ a lo largo de todas las escalas temporales analizadas.

La Figura 6 muestra un diagrama de cajas donde se indica la escala temporal del SPI a la que se ha observado la máxima correlación con el SSI, antes y después de la regulación, en las 71 cuencas hidrológicas reguladas entre 1945 y 2005, y que han sido clasificadas según el aprovechamiento que se hace del embalse que las regula. En el caso de los embalses de uso hidroeléctrico (Figura 7a) la regulación no altera en gran manera la respuesta hidrológica a las sequías climáticas. Antes del represamiento, estas cuencas muestran una correlación mayor considerando escalas temporales cortas y no superiores a los 6-7 meses. Tras la entrada en funcionamiento de las presas se produce un leve aumento de la escala temporal a la que se produce la máxima correlación. Este tipo de aprovechamiento de los embalses resulta representativo de aquellas cuencas representadas por el primer componente principal (el 70% de las cuencas de uso exclusivo hidroeléctrico están representadas por el primer componente), en el que se comprobaba un pequeño descenso en los valores de correlación a las diferentes escalas temporales del SPI, sin que se modificara notablemente la escala temporal a la que se produce la respuesta más alta. A pesar de que el aprovechamiento hidroeléctrico de los ríos ha sido históricamente considerado como un uso no-consuntivo del agua, se ha demostrado que las pérdidas generadas por evapotranspiración, también en este tipo de embalses, no son despreciables (Mekonnen y Hoekstra, 2012). Estas pérdidas relacionadas con la evapotranspiración podrían explicar la pérdida de influencia de la precipitación para explicar el comportamiento de los caudales, algo que se deduce de la reducción de las correlaciones obtenidas entre el SSI y el SPI en el primer patrón de modificación de la respuesta hidrológica destacado. Sin embargo, cuando el aprovechamiento de tipo hidroeléctrico se combina con otros como el abastecimiento urbano o el riego en embalses de uso mixto (Figura 7b), las correlaciones más altas entre los caudales y el SPI pasan de producirse a escalas temporales del SPI de entre 2 y 12 meses a escalas temporales de entre 5 y 20 meses. En este tipo de embalses se produce un almacenamiento de agua más sostenido en el tiempo que en los embalses de aprovechamiento hidroeléctrico para hacer frente a la demanda de diferentes usos. Este hecho hace que los caudales respondan a escalas temporales del SPI más largas debido a la mayor capacidad de embalsado aguas arriba.

Por su parte, en el caso de los embalses de uso exclusivo para riego, se ha comprobado que introducen un mayor retardo temporal en la respuesta de los caudales al SPI. Antes de su represamiento, los caudales mostraban una máxima correlación a escalas temporales del SPI cortas y medias (la mediana corresponde a la escala temporal de 4 meses), mientras que tras ser regulados, la mediana de las máximas correlaciones corresponde a una escala de 9 meses. La regulación de carácter multi-anual ligada a sistemas con una alta capacidad de embalsado y al aprovechamiento para riego es la responsable de amplios retardos temporales entre la época en la que se producen déficits de precipitación y cuando éstos se hacen patentes en los caudales aguas abajo de los embalses. El efecto atenuador que producen los embalses en la respuesta hidrológica ante las condiciones de sequía climática durante escalas temporales cortas, genera, sin embargo, el retardo y sostenimiento de dicha respuesta durante escalas temporales largas.

6. Conclusiones

Los análisis han revelado dos grandes patrones de respuesta de las sequías hidrológicas a los déficits de precipitación acumulados a diferentes escalas temporales: un patrón de respuesta breve pero intensa durante escalas temporales cortas, con la máxima correlación a la escala temporal de 2 meses, y que representa, principalmente, a las cuencas septentrionales de la Península; y otro patrón de respuesta muy diferente, caracterizado por una baja respuesta a escalas temporales cortas, que resulta superior a escalas temporales medias y largas, y que representa a la mayor parte de las cuencas de la mitad meridional de la Península.

Las cuencas reguladas durante el periodo de estudio mostraron tres patrones distintos de modificación en la respuesta del SSI a diferentes escalas temporales del SPI: un primer patrón que representa un descenso de la respuesta de los caudales a las sequías pluviométricas que no altera significativamente las inercias temporales en la respuesta (altas correlaciones a escalas temporales del SPI cortas) y que se relaciona a embalses cuyo aprovechamiento principal es la generación de energía hidroeléctrica; un segundo patrón muy notable en la respuesta de los caudales, que pasan de producirse a escalas temporales cortas a otras más largas y que se relaciona con aquellos embalses cuyo uso principal es el abastecimiento de los núcleos urbanos y del regadío; y un tercer patrón de descenso de la respuesta de los caudales a la variabilidad pluviométrica localizada a escalas temporales medias, para homogeneizarla lo largo de todas las escalas temporales analizadas, y que corresponde, principalmente, con embalses de uso mixto.

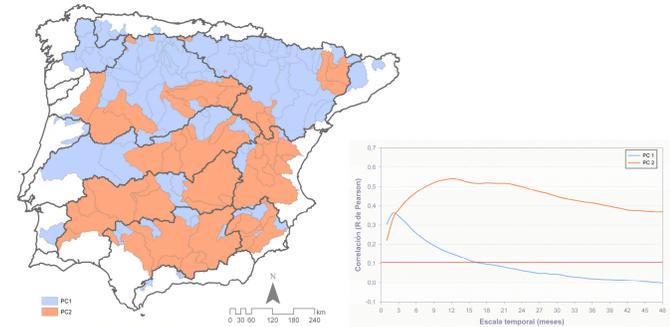


Figura 3. Izquierda: clasificación de las cuencas hidrográficas de acuerdo a la regla de carga factorial máxima según su pertenencia al primer o al segundo componente principal. Derecha: puntuaciones factoriales (transformadas en las unidades originales, r de Pearson) de los dos componentes seleccionados. La línea roja denota el umbral de significación estadística ($\alpha=0.01$).

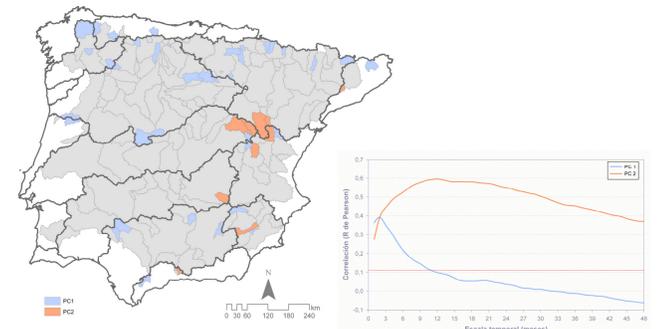


Figura 4. Izquierda: clasificación de las cuencas hidrográficas no reguladas de acuerdo a la regla de carga factorial máxima según su pertenencia al primer o al segundo componente principal. Derecha: puntuaciones factoriales (transformadas en las unidades originales, R de Pearson) de los dos componentes seleccionados. La línea roja denota el umbral de significación estadística ($\alpha=0.01$).

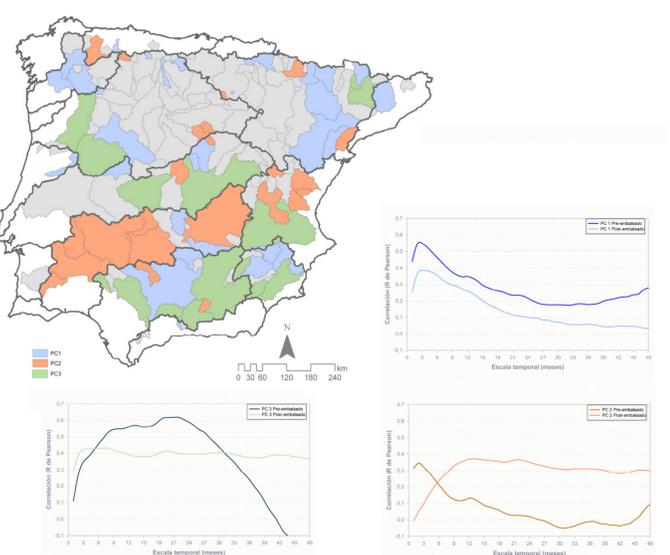


Figura 5. Mapa: Clasificación de las cuencas hidrológicas reguladas entre 1945 y 2005 de acuerdo a la regla de carga factorial máxima según su pertenencia al primer, segundo o tercer componente principal. Gráficas: Puntuaciones factoriales (transformadas en las unidades originales, R de Pearson) de los tres componentes seleccionados antes y después del embalsado de las cuencas que representan.

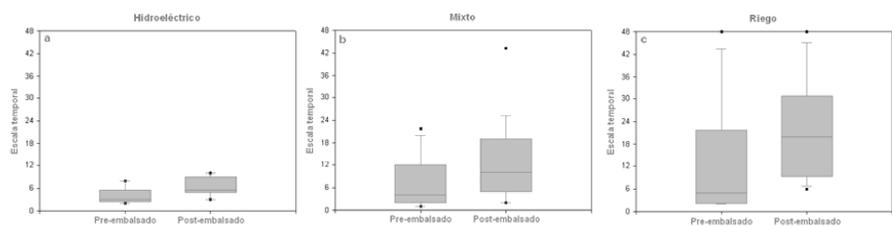


Figura 6. Escala temporal del SPI a la que se obtiene la máxima correlación entre el SSI y el SPI en las distintas cuencas reguladas entre 1945 y 2005, clasificadas según el aprovechamiento del embalse que regula sus caudales aguas arriba en embalses de uso hidroeléctrico (a), embalses de uso mixto (b) y embalses para riego (c). La línea negra representa la mediana y los puntos los percentiles 5 y 95.