

LA RESPUESTA DE LA SEQUÍA HIDROLÓGICA A LA SEQUÍA PLUVIOMÉTRICA EN LAS CUENCAS MEDITERRÁNEAS ESPAÑOLAS

Natalia LIMONES, María Fernanda PITA
Dpto. de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla
natalialr@us.es, mfpita@us.es

RESUMEN

El presente estudio analiza el comportamiento de la sequía hidrológica en las cuencas mediterráneas españolas a partir de las manifestaciones que ésta presenta en las aportaciones a los embalses. Se pone especial énfasis en el modo en que se reproduce la relación precipitación – escorrentía al evaluar los indicadores de sequía en ambas variables, así como en los factores que controlan las diferencias entre las sequías hidrológicas y las pluviométricas. Los patrones de respuesta que se identifican permiten anticipar el comportamiento de la sequía hidrológica y, consecuentemente, pueden resultar de gran ayuda en la gestión de los recursos hídricos antes estas situaciones extremas.

Se trabaja con un total de 29 series de aportaciones a embalses situados en cabeceras de cuencas. El índice de sequía aplicado tanto a las precipitaciones como a las aportaciones es el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP, IESAp para aportaciones), mediante el cual se han identificado y caracterizado las sequías registradas en el periodo 1957 – 2005.

Palabras Clave: Sequía, respuesta hidrológica, cuenca hidrográfica, índices.

ABSTRACT

This study analyzes the behavior of hydrological drought in the Spanish Mediterranean catchments from the patterns presented in this runoff to reservoirs, with particular emphasis on how the rainfall - runoff relationship works when assessing drought indicators in both variables, as well as on identifying the factors controlling the differences between hydrological and rainfall drought. Identified response patterns allow us to anticipate the behavior of hydrological drought and, consequently, they can be helpful for water resources management under extreme situations.

We will work with a total of 29 series of runoff to reservoirs located in headwaters. The drought index applied to both rainfall and runoff to identify and characterize the different dry sequences recorded in the case studies throughout the period 1957-2005 is the Rainfall Drought Standardized Index (IESP, IESAp for runoff).

Key words: Drought, hydrological response, catchment, indices.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento y objetivos

Conforme a las ideas más básicas del ciclo hidrológico, la causa inicial de toda sequía en una cuenca es la insuficiencia de precipitaciones (sequía meteorológica), que deriva en un déficit de la humedad necesaria en el suelo (sequía agrícola) y, si persiste, en la insuficiencia de los recursos hídricos necesarios, tanto subterráneos como superficiales (sequía hidrológica) (Pita-

López, 2007). Se prevé entonces que las rachas secas y húmedas de aportaciones en cada cuenca presenten patrones similares a los de las precipitaciones que las generan (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente 2000), exponiendo variaciones presumiblemente ligadas a los rasgos de cada cuenca. Acorde con esto, se sostiene que la sequía hidrológica puede retardarse durante varios meses desde que se detecte la anomalía pluviométrica o, si las lluvias retornan en poco tiempo, no llegar a manifestarse o percibirse de forma muy leve (Marcos-Valiente, 2001).

Así, nuestro objetivo es examinar la *conexión entre la variedad pluviométrica de la sequía y la variedad hidrológica* en el ámbito mediterráneo español. Es preciso analizar si se aprecian pautas de retardo o se manifiestan recurrentemente algunas otras anomalías: intensificaciones, atenuaciones, etc. cuyo esclarecimiento lleva una mejor explicación del fenómeno de la sequía hidrológica y de su conexión con el fenómeno meteorológico.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

El ámbito de estudio, dentro del cual se seleccionan las cuencas para realizar los análisis, está formado por las once diferentes Confederaciones Hidrográficas del ámbito climático mediterráneo español: Cuencas Internas de Cataluña, Baleares, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Cuenca Mediterránea Andaluza, Cuenca Atlántica Andaluza, Segura, Júcar y Ebro. Estas cuencas mediterráneas se localizan geográficamente en el archipiélago Balear y a lo largo del centro, sur y este de la Península Ibérica. En su seno se dan multitud de gradaciones climáticas, sobre todo derivadas de la proximidad al mar, la altitud, la orografía y en cierta medida también las diferencias latitudinales.

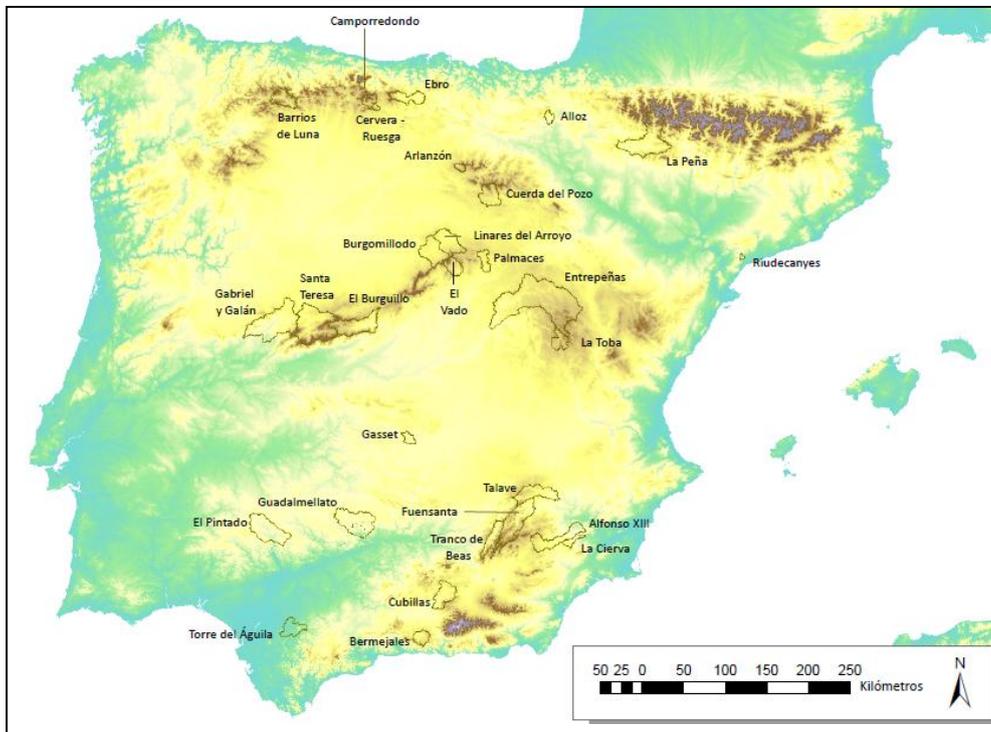


Fig 1: Subcuencas hidrográficas seleccionadas para el estudio.

A su vez, dentro de las mismas se han seleccionado en concreto las 29 subcuencas que drenan hacia los embalses que aparecen en la Figura 1. Todas estas subcuencas vierten hacia embalses de cabecera, y por ello carecen en sus registros de aforo de volúmenes procedentes de desembalses aguas arriba, siendo esta la premisa fundamental a la hora de escoger las cuencas piloto. De otro modo los datos manejados no reflejarían fielmente el comportamiento de la escorrentía natural de la cuenca, sino que estarían afectados por cantidades variables desembalsadas como consecuencia de decisiones de gestión, siendo este tipo de datos muy difíciles de restituir con resultados fiables, lo cual requeriría recurrir a datos procedentes de modelos en última estancia.

Por otro lado, la ventaja de restringir el estudio a los subsistemas hídricos de cabecera reside en que un alto porcentaje del volumen de las aportaciones totales que fluyen en las cuencas proviene de estos pequeños subsistemas, habitualmente de montaña; por ello, estudiar su comportamiento hídrico es también predecir qué puede llegar a suceder en el resto del territorio.

2.2. Metodología y datos

Para explorar la conexión entre el fenómeno pluviométrico y el hidrológico, conocer de manera profunda el comportamiento conjunto de ambas variedades de sequía y aclarar los mecanismos que las relacionan se llevarán a cabo los siguientes pasos fundamentales:

- En primer lugar, como es lógico, *se aplicará el índice de sequía* sobre las series de totales mensuales de precipitaciones y aportaciones desde 1957 hasta 2005 (ver formulación en apartado 1.3.a.). Los datos de precipitaciones utilizados proceden de la base de datos MOPREDAS (González-Hidalgo et al. 2011), desarrollada por el Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza. Para cada cuenca se realiza un promedio de todas sus series. Por otro lado, los datos de aportaciones a los embalses de las 29 cuencas se obtienen de la base de datos de los valores de entrada de embalse de la red ROEA (Red Oficial de Estaciones de Aforo), proporcionados de forma directa por medio de la página web del SIA, Sistema Integrado de Información sobre el Agua (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012).
- Posteriormente se inicia la comparación de las series de ambos índices en las cuencas de estudio, valorando el *grado de conexión entre las series para cada cuenca a varios niveles*. Primero se atenderá a las series completas de 588 valores correspondientes a los 49 años de índice en precipitaciones y aportaciones, después se prestará atención a los momentos en que las variables presentan déficit.
- En segundo lugar se incidirá en el *estudio comparativo de las secuencias secas superiores al año en ambas variables* en cuanto a número, intensidad y duración, incidiendo en la variabilidad de las respuestas en las diferentes cuencas y sus posibles razones, pero también intentando revelar el patrón general de cambio hacia secuencias deficitarias en caudal a partir de las correspondientes sequías pluviométricas. Con todo ello se pretende profundizar en los matices que introduce la hidrología de cuenca en el fenómeno.
- Una vez analizados los comportamientos conjuntos- tanto globales como en las etapas secas- se procede a *comprobar la hipótesis de la existencia de retardos* en la aparición de la sequía en las aportaciones.

1.3. a. El Índice Estandarizado de Sequía.

El Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica IESP (IESAp para aportaciones) es un índice mensual de sequía pluviométrica que se basa en el cálculo de las anomalías pluviométricas

mensuales acumuladas y estandarizadas, de modo similar al conocido Standardized Precipitation Index (SPI) de McKee (McKee et al., 1995).

Al igual que en el SPI, los valores negativos corresponden a meses secos, en tanto que los positivos reflejan meses no secos. Las unidades con las que trabaja son puntuaciones z y responde a la siguiente formulación:

$$IESP_i = \frac{APAc_i - \overline{APAc}}{\sigma_{APAc}} \quad (\text{Fórmula 1})$$

donde:

$IESP_i$ = Índice estandarizado de Sequía Pluviométrica del mes i.

$APAc_i$ = Anomalía pluviométrica acumulada del mes i.

\overline{APAc} = Valor medio de las anomalías pluviométricas acumuladas de todos los meses de la serie.

σ_{APAc} = Desviación típica de las anomalías pluviométricas acumuladas de todos los meses de la serie

Por su parte, $APAc_i$ responde a la expresión:

$$APAc_1 = AP_1 \quad APAc_i = \sum_{j=r}^i AP_j \text{ si } i > 1 \quad (\text{Fórmula 2})$$

siendo:

$$r = \max\{k : 1 \leq k \leq i, AP_k < 0, APAc_{k-1} \geq 0\} \text{ y}$$

AP_i la anomalía pluviométrica del mes i.

A su vez:

$$AP_i = P_i - P_{MED_i} \quad (\text{Fórmula 3})$$

siendo:

P_i = Precipitación del mes i.

P_{MED_i} = Precipitación mediana del mes i para el periodo de referencia 1961-90.

La esencia del índice, y su seña de identidad frente a otros similares, es que reinicia los cálculos de las anomalías acumuladas cada vez que se produce un nuevo mes seco ($AP_i < 0$) en el marco de un periodo excedentario (con $APAc_{i-1} \geq 0$); ello permite reflejar las secuencias secas de diferentes longitudes a partir de una única elaboración del índice, frente al SPI, que requiere una aplicación a múltiples escalas temporales para reflejar las diferentes duraciones de la sequía (Pita-López, 2001; Pita-López, 2007).

El cálculo del índice se realiza conforme a tres etapas sucesivas. En la primera etapa se calcula la anomalía pluviométrica de cada uno de los meses de la serie, a partir de la expresión reflejada en la anterior Fórmula 3.

En la segunda etapa se calculan las anomalías pluviométricas acumuladas, desde el primer mes de la serie. En el momento en que se encuentra una anomalía acumulada negativa se iniciaría una secuencia seca, que concluiría con la aparición de una anomalía acumulada positiva, dando paso a una secuencia excedentaria en agua; durante esta secuencia excedentaria, las anomalías siguen acumulándose hasta que aparezca de nuevo una anomalía pluviométrica negativa, momento en que se iniciaría una nueva secuencia seca, que se obtiene por el mismo método, recomenzando el cálculo de las acumulaciones a partir de ese valor

negativo de anomalía pluviométrica. Se trata, por tanto, de un sumatorio que se detiene cada vez que se encuentra una anomalía negativa, lo cual permite precisamente dar prioridad a dicha anomalía. Se evita así el efecto de minimización de las sequías resultante de la acumulación de los excedentes precedentes, que caracteriza a buena parte de los indicadores comúnmente utilizados, incluidos los usados en el Libro Blanco del Agua (Pita-López et al, 2002).

En consecuencia, el cálculo de esta segunda fase se resume de acuerdo con la fórmula 2. Por último, en la tercera etapa se estandarizarían estas anomalías acumuladas mediante su conversión en puntuaciones Z.

$$ZAPAc_i = \frac{APAc_i - \overline{APAc}}{\sigma_{APAc}} \quad (\text{Fórmula 4})$$

donde:

$ZAPAc_i$ = Anomalía pluviométrica acumulada estandarizada del mes $i = IESP_i$.

$APAc_i$ = Anomalía pluviométrica acumulada del mes i .

\overline{APAc} = Valor medio de las anomalías pluviométricas acumuladas de todos los meses de la serie.

σ_{APAc} = Desviación típica de las anomalías pluviométricas acumuladas de todos los meses de la serie.

Por tanto, cada $ZAPAc_i$ es literalmente el índice IESP (o IESAp, si se trata de las aportaciones) correspondiente al mes i de la serie, tal y como se mostraba en la primera fórmula. Posee otra ventaja importante: la obtención de valores normalizados, y por ello universalmente válidos y confrontables entre diferentes observatorios, e incluso entre diferentes magnitudes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Nivel de conexión entre las series de IESP e IESAp.

Una vez calculado el índice sobre las series mensuales de precipitaciones y aportaciones de las cuencas, realizamos un análisis de correlación bivariada sobre las *series completas* de los 49 años de los IESP y los IESAp, del mismo modo que se aplica sobre las series mensuales originales de ambas variables para confrontarlos.

Al evaluar los resultados se comprueba que solamente ocho de las 29 cuencas mejora los coeficientes de correlación (r) de Pearson establecidos con las series de los valores mensuales de precipitaciones y aportaciones sin aplicar el índice (ver Figura 2), lo cual corrobora que el nivel de conexión es generalmente más difuso.

Coincide que estas cuencas en que aumentan los coeficientes de correlación son, en general, las que presentan una o pocas secuencias secas a lo largo de la serie del índice hidrológico, lo cual sucede en las cuencas muy permeables.

Comparando las 29 gráficas temporales de los valores de los IESAp de las cuencas, se aprecia que en las permeables son poco abruptas y tienden a homogeneizar, e incluso a resumir múltiples sequías pluviométricas en una sola secuencia hidrológica. Esto se debe a que el caudal subterráneo tiene mucho peso dentro del caudal total y es más regular y depende menos de la precipitación inmediata que el superficial. Por tanto, merece la pena analizar por separado estas cuencas y el resto de los casos de estudio, puesto que los factores que condicionan la conexión entre ambos índices son muy diferentes según el supuesto del que se trate.

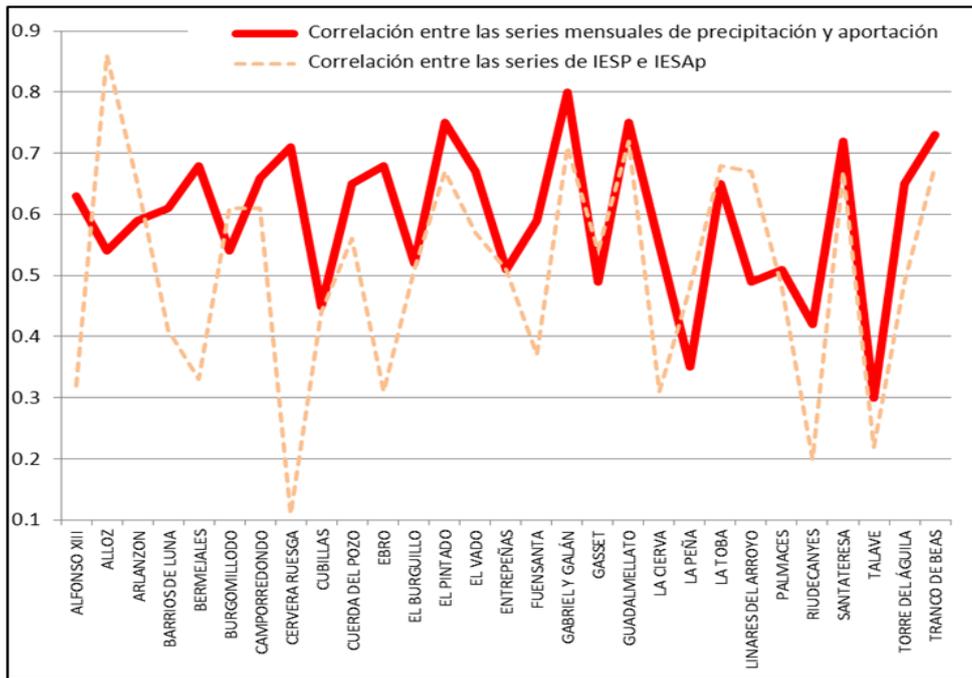


Fig. 2: Diferencias entre la correlación medida sobre los valores mensuales originales de precipitación y aportación y la de sus correspondientes índices de sequía.

Así, observando los diagramas de dispersión que conectan IESP e IESAp en estas cuencas (ver Figura 3) se observa que el principal factor que induce las elevadas correlaciones en ellas no es otro que las plumas de muchos valores negativos del índice IESAp (hidrológico), que equilibran la recta de regresión y que se producen sincrónicos a los valores más bajos del IESP; en el resto de cuencas las sequías no son tan largas en las escorrentías y por ello no existe tanta coincidencia temporal en el cuadrante de los valores negativos que permita este equilibrio de las rectas.

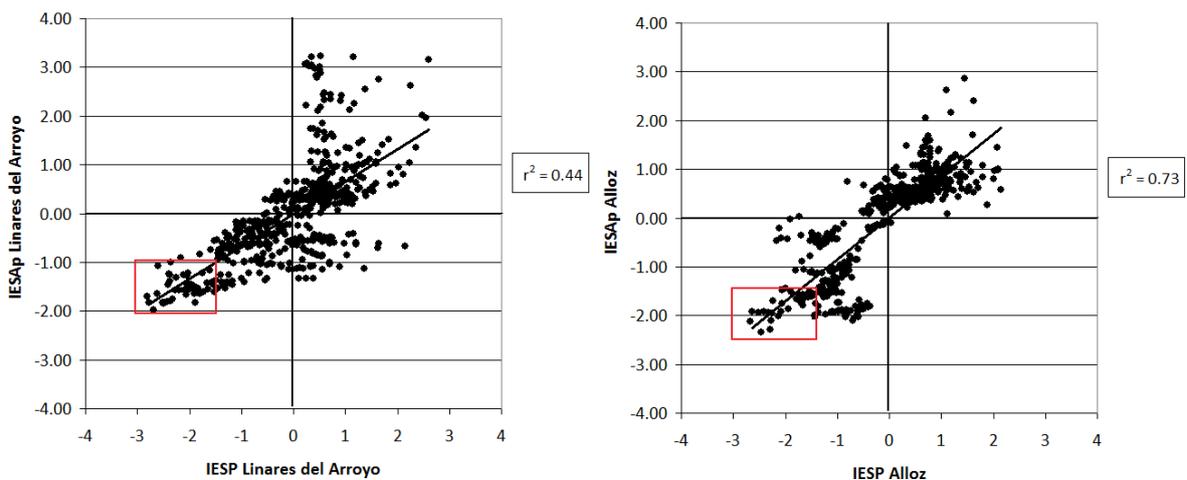


Fig. 3: Diagramas de dispersión IESP / IESAp en dos de las cuencas donde la correlación ha aumentado con respecto a la establecida con los valores originales de las variables. Señalada en roja la pluma de valores negativos y elevados.

En el resto de casos de estudio, el cambio hacia peores correlaciones sería el que a priori cabría esperar desde un inicio, dado que los índices de sequía eliminan la influencia de los regímenes intermensuales que explican una gran parte de la covariación de los valores de las variables originales. En las cuencas impermeables en concreto, los coeficientes de correlación de Pearson decaen poco con respecto a los que se obtenían comparando las variables originales (ver Figura 4) debido a que los ritmos IESP / IESAp son muy similares.

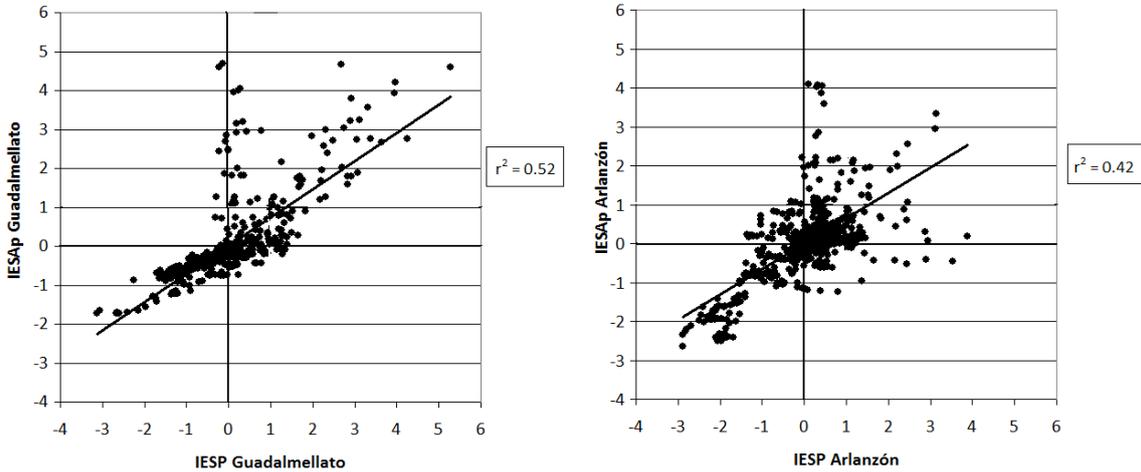


Fig. 4: Diagramas de dispersión IESP / IESAp de dos de las cuencas impermeables donde la correlación se ha mantenido elevada.

Al pasar de este nivel a la comparación de los *meses en que al menos alguna de las variables presenta un valor negativo*, las correlaciones bajan sustancialmente en todas las cuencas con pocas excepciones (ver Figura 5). De nuevo existen mejores correlaciones en aquellos casos en que los índices presentan pocas secuencias secas y muy largas por las mismas razones explicadas más arriba: la regresión se equilibra gracias a la existencia de muchos valores negativos.

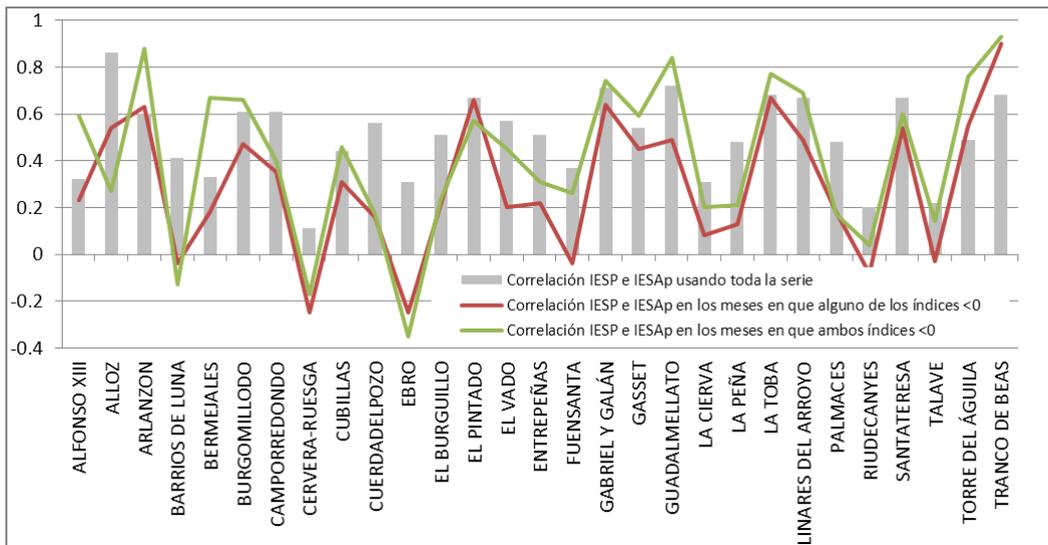


Fig. 5: Diferentes niveles de detalle a los que se ha establecido la correlación entre los dos índices de sequía, desde la comparación de las series completas hasta el uso de solo los momentos en que ambos índices son negativos.

La norma general de descenso en las correlaciones apunta a que en las primeras fases de la sequía- o en aquellos meses en los que aparece algún negativo aislado- las correspondencias aún no se muestran. Esto sugiere la posibilidad de anticiparse temporalmente al devenir de la sequía hidrológica a partir de la identificación de las situaciones secas que se están excavando o que están en recuperación en la pluviometría.

Ampliando una vez más el nivel de detalle, en este caso hacia los *meses que presentan valores negativos para ambos índices*, se encuentra una evidente y lógica subida en las correlaciones con respecto a la columna anterior. Suelen ser meses en los que los ritmos tienden a ser bastante sincrónicos porque en ellos la sequía es lo suficientemente importante y está lo suficientemente asentada como para haberse reproducido también en las aportaciones y, a su vez, no haber remitido aún para la precipitación. No obstante los valores no son en absoluto lo suficientemente elevados como para concluir que ambos fenómenos sean conformes y equivalentes.

3.2. Comparación de las secuencias secas en ambas variables.

Una vez comprobado que existen importantes desconexiones entre ambas modalidades de sequía, es relevante incidir en la comparación de las secuencias secas más severas en ellas, no solo para cada cuenca, también extrayendo conclusiones sobre lo que ocurre en conjunto. Los parámetros que mejor definen estas secuencias y más significativos resultan para el estudio de la repercusión que generan como riesgo natural son el número de secuencias secas de duración superior a doce meses, por considerarse el intervalo necesario para que las sequías empiecen a causar impacto perceptible en la población (Olcina-Cantos y Rico-Amorós, 1995; Pita-López, 1995), la persistencia media de las secuencias secas en la cuenca y la intensidad de estas (esta última expresada en unidades del índice de sequía), reflejados gráficamente en la Figura 6.

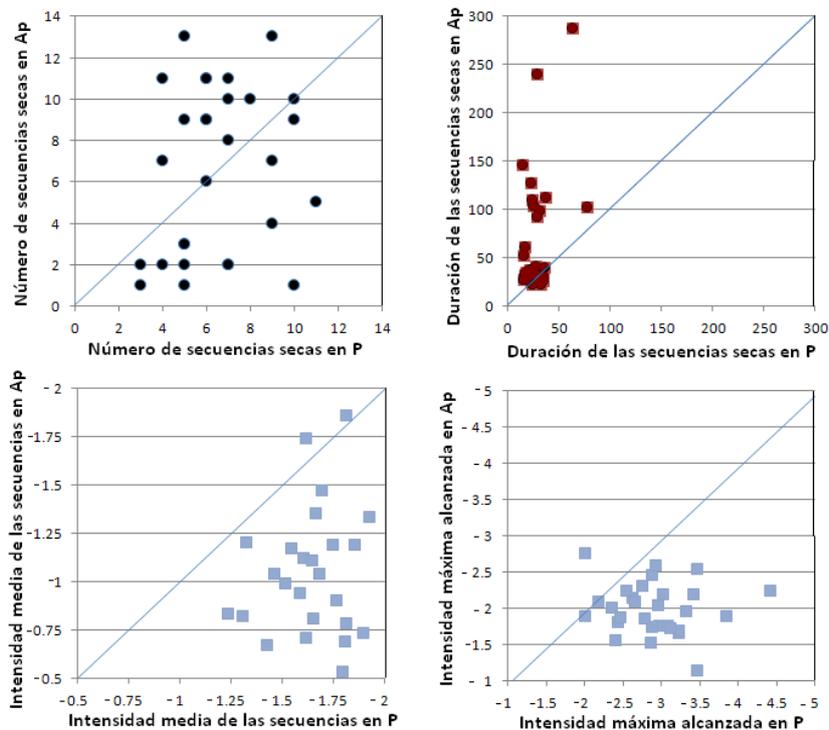


Fig. 6: Parámetros descriptivos de las secuencias secas de duración superior al año identificadas en las distintas cuencas para las precipitaciones (P) y aportaciones (Ap). Cada punto corresponde a una cuenca de estudio.

La primera particularidad que se ha demostrado es la estrecha conexión entre la duración media de las secuencias para precipitación y aportación en cada cuenca, lo cual indica que la persistencia normal de las fases secas es proporcional en ambas variables para el grueso de los casos de estudio, como podría esperarse; por tanto, convencionalmente, cuencas tendentes a presentar largas sequías pluviométricas acarrearán asimismo prolongadas sequías hidrológicas y viceversa. También se ha constatado que el número de secuencias secas superiores al año siempre está inversamente relacionado con la duración promedio de las mismas en el contexto de cada cuenca, sea cual sea la variable de la que se trate. Esto es lógico, si el índice oscila mucho por debajo y por encima del valor 0, aparecen muchas más secuencias, pero de duración más moderada; en cambio, si una o varias sequías se excavan prolongadamente se convierten en casos excepcionales, consiguiendo que existan pocas situaciones equiparables a lo largo de la serie, de acuerdo con la propia formulación del índice.

Por otro lado, cabe señalar que tanto las intensidades promedio de las sequías como las intensidades máximas registradas en ellas a lo largo de la serie son muchísimo más altas en las precipitaciones, como muestran las gráficas de la figura 6; en cambio, la duración es mayor en las aportaciones, tanto en promedio como teniendo en cuenta solamente la secuencia seca más larga de toda la serie. Estos dos rasgos son generales, incuestionables y se distinguen en todas las cuencas sean cuales sean sus características hidrológicas y las formas del histograma de uno y otro índice.

La explicación se fundamenta en la naturaleza del fenómeno hidrológico, que posee una inercia que no se observa en la lluvia y que motiva las largas duraciones de las sequías en la aportación. Normalmente el índice IESAp oscila poco en épocas de sequía y se va excavando muy lenta y progresivamente, recuperándose también del mismo modo, mientras que en las precipitaciones es más fluctuante e imprevisible, de ahí que la acumulación en esta variable se recupere rápidamente con la llegada de una lluvia copiosa y se computen menos meses de déficit. Esto es un matiz de diferenciación entre ambas variedades de sequía que resulta muy interesante e implica, además, que sea más sencillo predecir el posible comportamiento de la secuencia seca hidrológica que la pluviométrica, sobre todo mientras se está acentuando.

El hecho de que las intensidades sean menores en el IESAp que en el IESP es lógico y va ligado a todo lo anterior, dado que si unas determinadas condiciones de anomalía acumulada se mantienen prácticamente constantes y se perpetúan en el tiempo más que en las precipitaciones, el índice- de acuerdo con su formulación- no les otorgará un carácter de elevada excepcionalidad. Es importante añadir que esto es opuesto a las hipótesis del *Libro Blanco del Agua*, ya que la sequía hidrológica verdaderamente no acentúa la pluviométrica, sino que más bien tiende a repartir la intensidad en el tiempo. Esto pone de manifiesto que utilizar índices que no incorporan acumulación en su cómputo o la realizan siguiendo intervalos no flexibles a menudo deriva en que se oculten matices como este.

Relacionado con estas cuestiones, se percibe que en las aportaciones las cuencas que muestran secuencias cortas pueden tener prácticamente todo tipo de intensidades, aunque siempre desde bajas a medias (ver Figura 7, rodeado en rojo). Ahora bien, para las que sufren secuencias más largas sí se verificaría que a mayor duración mayor intensidad; por el contrario, en las precipitaciones incluso una secuenciación fluctuante en ocasiones trae consigo algunas sequías extremadamente intensas en las cuencas- algo muy común en las del sur- y al contrario, pueden existir casos con pocas secuencias y muy largas que no posean una gran intensidad promedio, de manera mucho más aleatoria que en la aportación. Esta es otra afirmación que apunta hacia la mayor previsibilidad de la sequía hidrológica.

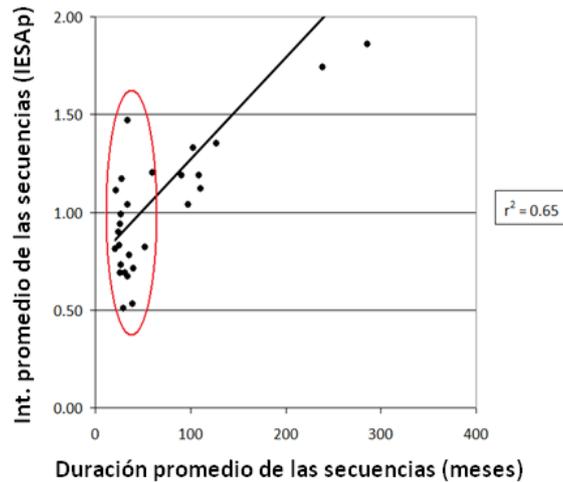


Fig. 7: Vinculación de la duración y la intensidad promedio de las secuencias secas superiores a 12 meses en las aportaciones de las 29 cuencas.

3.3. Análisis de los retardos entre las variedades de sequía.

Una vez ilustradas las características y las peculiaridades de las sequías en las dos variables, es preciso evaluar si existe una clara tendencia al desfase temporal entre ambas variedades del fenómeno. De acuerdo con Lorenzo-Lacruz (2012), las variables de precipitación y aportación presentan retardo, y por ello se esperan mejores correlaciones al establecerse desfasándolas entre sí a nivel mensual; en Limones, 2013 se probó que los valores suben más aún si se correlaciona cada mes de aportación con la suma de la precipitación del mes en concreto y el mes anterior, por lo que tiene sentido comprobar qué sucede al evaluar la sequía.

La primera aproximación a la evaluación de los retardos se establecerá simplemente atendiendo al nivel de coincidencia temporal entre los meses pertenecientes a las secuencias secas en ambas variables y luego se dará un paso más en el análisis de los retardos y se evaluará si mejora la covariación de los índices al realizar el desfasado de las series.

Considerando el *nivel de coincidencia temporal* entre los meses pertenecientes a las secuencias secas en ambas variables, se asume en primer lugar que por supuesto no todas las series tienen exactamente el mismo número de meses negativos pertenecientes a una fase superior a doce meses. Observando la Figura 8 puede comprobarse que, independientemente de la coincidencia inicial entre las fases de uno y otro tipo, la gran mayoría de las cuencas aumentan sustancialmente este valor al desfasar las series y hacer coincidir la escorrentía de un mes en concreto con la precipitación de uno o dos meses anteriores, sobre todo en las cuencas más húmedas. Esto indudablemente refleja que el desarrollo de la sequía pluviométrica induce y se adelanta a la variante hidrológica del fenómeno. El hecho de que prácticamente todas las secuencias secas de una cuenca comiencen y / o terminen con posterioridad a las pluviométricas demuestra que las escorrentías no solo amortiguan y consiguen regular mejor las pequeñas oscilaciones y los comienzos de una fase seca, sino que en la situación contraria, al final, tardan mucho más en recuperarse debido a que las condiciones de humedad del sistema cuenca necesitan un intervalo para restablecerse por completo.

LA RESPUESTA DE LA SEQUÍA HIDROLÓGICA A LA SEQUÍA PLUVIOMÉTRICA EN LAS CUENCAS MEDITERRÁNEAS ESPAÑOLAS

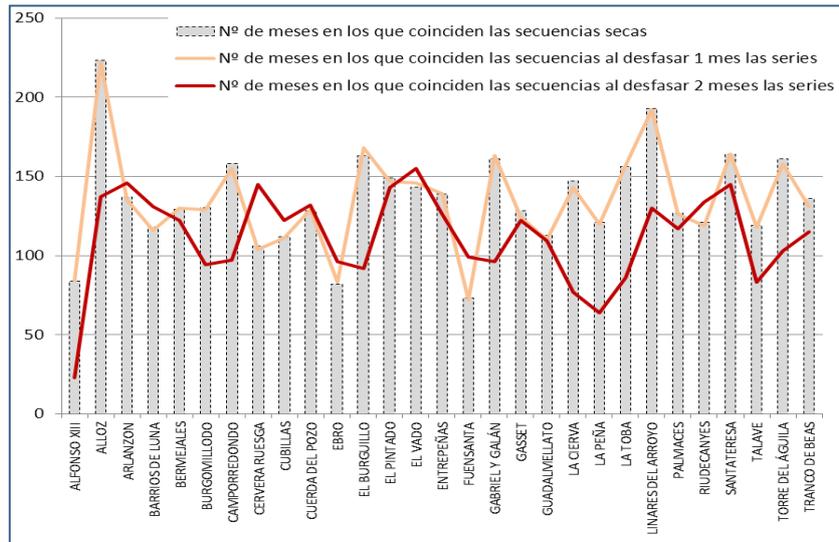


Fig. 8: Efecto del desfasado de las series.

Avanzando en el análisis de los retardos a partir de la simple coincidencia temporal de las sequías, se evaluará si mejora la covariación de los índices al desfasar las series.

Usando las series completas de ambos índices (ver Figura 9) se observa claramente que el desfasado aumenta los valores del índice de correlación de Pearson en la gran mayoría de las cuencas, manteniéndose prácticamente iguales en el resto; esto demuestra sobradamente que los ritmos de excedente y déficit hídrico se encuentran levemente retrasados con respecto a los de las precipitaciones que los generan. Esto es interesante para la gestión del riesgo, ya que lo que llega al embalse y puede reservarse para abastecer la demanda es fruto directo de la escorrentía y no de la propia precipitación, de modo que si se observa el devenir de un déficit en esta última es posible anticiparse a la transmisión del mismo hacia el recurso en sí.

Son las cuencas impermeables las que menores incrementos de correlación muestran al retardar una serie con respecto a la otra, y viceversa. Esto se explica porque la fracción subterránea de la aportación es el principal agente responsable de que una importante parte de lo precipitado tarde más tiempo en llegar al aforo de embalse, como ya se explicó.

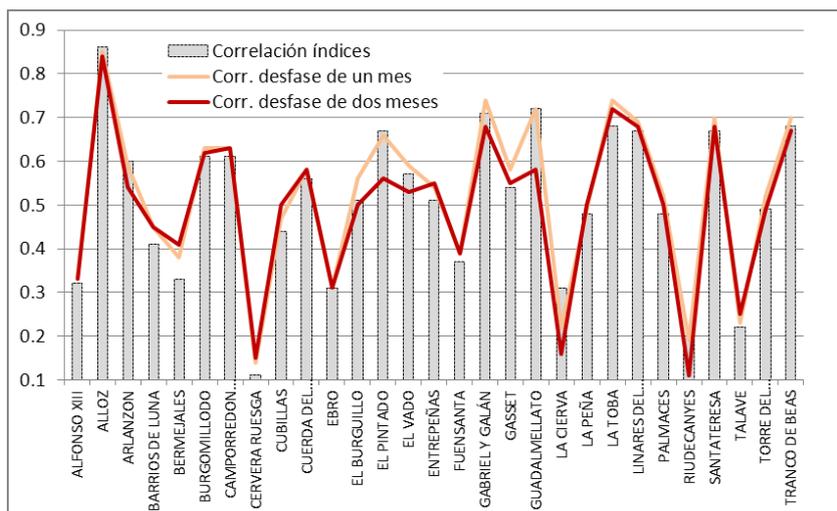


Fig. 9: Correlación entre IESP e IESAp al hacer coincidir un mes del índice hidrológico con el mes o meses previos del índice pluviométrico.

Conviene aclarar que el desfase de las series que produce mejores resultados es el correspondiente a uno o dos meses, comprobándose que si se aplica un intervalo mayor los resultados comienzan a decrecer de nuevo; así, se establece este intervalo como el de mejor correspondencia entre los índices en la mayor parte de las series (con pocas excepciones), al igual que ocurría con los valores de las variables originales (ver Figura 10). Los valores no mejoran al sumar varios meses del índice de precipitación y correlacionarlo con la precipitación, como si ocurría en las variables originales (Limones, 2013).

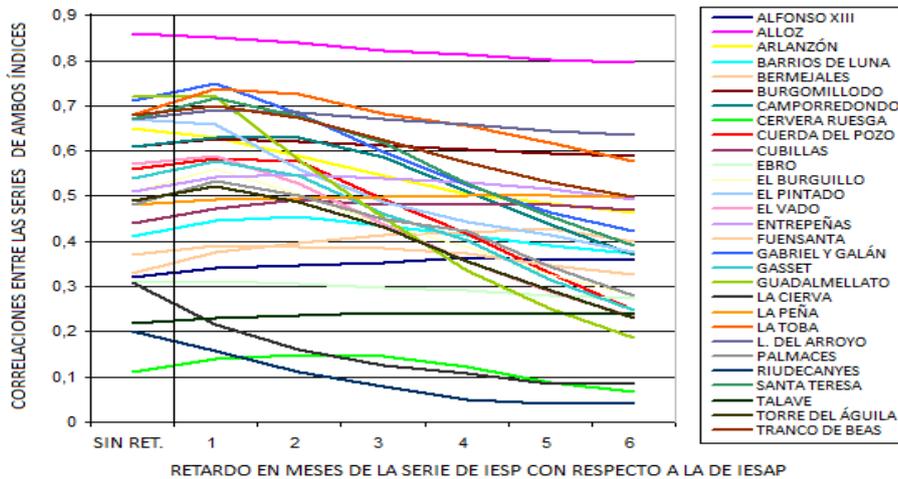


Fig. 10: Efecto de los retardos desde 0 hasta 6 meses entre las series de de IESP y IESAp sobre la correlación entre ambas (r de Pearson).

Al fijar el análisis de retardos solamente sobre los meses que forman parte de las secuencias deficitarias superiores al año en ambas variables, se aprecia que las mejoras al desfasar se restringen a un menor número de cuencas, y son siempre menos significativas. La lógica de este hecho se asocia con que una vez que se afianzan completamente las sequías el comportamiento es algo más inmediato entre las variables que el que tiene lugar durante el resto de la serie.

4. CONCLUSIONES

4.1. Sobre las relaciones de la sequía hidrológica y la sequía pluviométrica.

La conexión de las series del IESAp con las de la sequía pluviométrica que las genera son menores que las que aparecían entre las dos variables originales mensuales- precipitación y aportación- en las cuencas. Las cuencas más impermeables, que evacuan más inmediatamente el flujo, tienden a tener mejores correlaciones entre IESP e IESAp. Se aprecian desconexiones en los ritmos durante la sequía, especialmente cuando ésta afecta únicamente a uno de los índices, lo cual a menudo sucede bien al inicio o al final de las secuencias secas. Este es uno de los indicativos de que existe cierto desfase en el tiempo entre ambas variedades.

Además, las series mejoran su correlación al conectar cada mes de la serie del IESAp con uno o dos meses atrás en la serie del índice pluviométrico, especialmente en cuencas permeables y

húmedas. Este fenómeno confirma que los comportamientos de ambas sequías están desfasados entre sí.

4.2. Sobre el número de secuencias secas que aparecen en las series de ambas variables, su persistencia e intensidad.

En general, aparecen menos secuencias secas severas en las aportaciones que en las precipitaciones debido al carácter acumulativo de la sequía hidrológica: una sola secuencia seca en la hidrología suele englobar varios episodios secos en las precipitaciones sin lograr recuperarse. Se aprecia que este fenómeno es más importante en las cuencas más permeables porque una vez agotado el caudal base es complejo- y más lento- que se restablezcan sus valores previos, a pesar de que la lluvia vuelva a ser abundante.

La persistencia y la duración de la sequía hidrológica son mucho mayores que las de la sequía pluviométrica, pero esto no conlleva una acentuación de las intensidades de la sequía hidrológica, sino más bien el reparto de la situación deficitaria entre un mayor número de meses. Algunos documentos e índices, al no considerar adecuadamente la acumulación de las circunstancias previas en la formulación de los cálculos que aplican, solo analizan la disminución de los volúmenes en una determinada etapa con respecto a los valores promedios de la serie. Como estas disminuciones son cuantitativamente mayores a las que se producen en las precipitaciones, se asegura que la sequía es más severa en las aportaciones, pero no se considera el hecho de que son unas condiciones mucho más distribuidas en el tiempo, por lo que su excepcionalidad es menor y por ello también su intensidad debe ser considerada inferior. En conclusión, los índices usados a menudo fallan al intentar describir toda esta complejidad.

En resumen, la sequía pluviométrica es más variable que la hidrológica, la cual dibuja oscilaciones mucho más suaves, su intensidad se excava suavemente y es sensiblemente más predecible. De cara al recurso, es evidentemente más sencillo prever y tratar un riesgo penetrante a ritmo más o menos constante. Aun así, para una gestión verdaderamente eficaz es importante que se tenga en cuenta junto con el fenómeno pluviométrico, dado que manejando el retardo habitual que ambas variedades tienen entre sí en cada tipo de cuenca puede también anticiparse el inicio del propio déficit.

5. AGRADECIMIENTOS

Las autoras de esta comunicación quieren agradecer a la Fundación Caja Madrid y al Proyecto SWAN, del 7º Programa Marco de la Unión Europea FP7/2007-2013, concedido bajo el acuerdo nº 294947 FP7-INCO-2011-7, cuyos fondos contribuyeron en el desarrollo de la investigación aquí expuesta.

6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2000). *Libro Blanco del Agua* [online]. Madrid. Colección de archivos pdf. <http://hispagua.cedex.es/documentacion/documentos/l_b/l_b.php?localizacion=Libro%20Blanco%20del%20Agua> [ref. de 31 de enero de 2014].

ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014). *Página web del Sistema Integrado del Agua* [en línea] Base de datos en línea <<http://servicios2.marm.es/sia/consultas/servlet/consultas.GlobalFilter?tipo=masiva&sid=generare>> [ref. de 1 de marzo de 2014].

- González-Hidalgo, J.C., Brunetti, M. y de Luis, M. (2011). A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (Monthly precipitation trends December 1945- November 2005). *International Journal of Climatology* 31: 715-731.
- Limones, N. (2013). *El estudio de la Sequía Hidrológica en el Mediterráneo Español[...]*. Fondo digital de tesis doctorales de la Universidad de Sevilla. [online]: <<http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/2034/el-estudio-de-la-sequia-hidrologica-en-el-mediterraneo-espanol-propuesta-de-aplicacion-del-indice-estandarizado-de-sequia-pluviometrica-las-aportaciones-hidricas>> [ref. de 5 de junio de 2014].
- Lorenzo-Lacruz, J. (2012). *Las sequías hidrológicas en la Península Ibérica: Análisis y caracterización espacio-temporal, influencias climáticas y el efecto de la gestión hidrológica en un contexto de cambio global*. Fondo digital de tesis doctorales de la Universidad de Zaragoza. [online]: <<http://zaguan.unizar.es/record/9913/files/TESIS-2012-146.pdf>> [ref. de 9 de junio de 2014].
- Marcos-Valiente, O. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones geográficas*. nº 26. Alicante. p. 59 – 80.
- McKee, T.B.; Doesken, J.; Kleist, J., (1995). Drought monitoring with multiple time scales. *Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society* (Dallas, TX), p. 233–236.
- Olcina-Cantos, J. y Rico Amorós, A. (1995). Sequías y golpes de calor en el sureste ibérico: efectos territoriales y económicos. *Investigaciones Geográficas*. nº 13. p.47 – 79.
- Pita-López, M. F. (1995). *Las Sequías: Análisis y Tratamiento*. Sevilla: Publicaciones de la Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.56 p.
- Pita-López, M.F. (2001). Sequías en la cuenca del Guadalquivir. *Causas y Consecuencias de las sequías en España*. Alicante: Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante y Caja de Ahorros del Mediterráneo, p. 303-343.
- Pita-López, M.F. (2007). Recomendaciones para el Establecimiento de un Sistema de Indicadores para la Previsión, el Seguimiento y la Gestión de la Sequía. *La Sequía en España. Directrices para minimizar su impacto*. Madrid: Dirección General del Agua. Ministerio de Medio Ambiente.
- Pita-López, M.F. et al. (2002). La covariación espacial de la precipitación en la Península Ibérica y su contribución al establecimiento de mecanismos de compensación interterritorial como instrumento de ayuda en la gestión de las sequías. *III Congreso ibérico sobre gestión y planificación de aguas. La Directiva Marco del agua: realidades y futuros*. (Sevilla, 13- 17 de 2002).