



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Geografía Física y Análisis Geográfico Regional

EL ESTUDIO DE LA SEQUIA HIDROLÓGICA EN EL
MEDITERRÁNEO ESPAÑOL. PROPUESTA DE APLICACIÓN
DEL INDICE ESTANDARIZADO DE SEQUIA
PLUVIOMETRICA A LAS APORTACIONES HIDRICAS.

AUTORA: Natalia Limones Rodríguez

DIRECTORA: María Fernanda Pita López

7 de Junio de 2013

Índice

1.	INTRODUCCIÓN.	Pág. 5
1.1.	Contexto, justificación y objetivos del trabajo.	5
1.2.	Metodología.	12
1.3.	Fuentes.	14
1.4.	Área de estudio e intervalo temporal escogidos. Contextualización y justificación de su selección.	16
2.	ESTADO DE LA CUESTIÓN.	27
2.1.	El funcionamiento de la escorrentía en una cuenca hidrológica. Conceptos y procesos fundamentales.	27
2.2.	Revisión del estado de la cuestión sobre los estudios generales de sequía y sequía hidrológica.	30
3.	CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS HIDROLÓGICAS DE ESTUDIO	59
3.1.	Atributos morfológicos de las cuencas de estudio.	59
3.2.	Clasificación de las cuencas según sus características.	86
4.	LAS PRECIPITACIONES Y LAS APORTACIONES EN EL ESTUDIO DE LA SEQUÍA.	99
4.1.	Reflexiones iniciales relativas a la disponibilidad, calidad y manejo de los datos climáticos e hidrológicos.	99
4.1.1.	<i>Los datos de precipitación.</i>	
4.1.2.	<i>Los datos de aportación.</i>	
4.2.	Las precipitaciones.	106
4.2.1.	<i>Las series de observación de la precipitación. Características generales.</i>	
4.2.2.	<i>Exploración de las precipitaciones en las cuencas de estudio.</i>	
4.3.	Las aportaciones hídricas.	116
4.3.1.	<i>Las series de observación de la aportación. Características generales.</i>	
4.3.2.	<i>Exploración de las aportaciones en las cuencas de estudio.</i>	

5.	RELACIONES ENTRE LAS VARIABLES EN EL ÁMBITO DE ESTUDIO.	135
5.1.	Hipótesis sobre la relación y conexión entre las variables precipitación y aportación a diferentes escalas temporales.	135
5.2.	Fundamentos de un primer acercamiento a diferentes escalas temporales.	139
5.3.	El estudio a nivel mensual de la respuesta de las aportaciones a la precipitación.	140
5.3.1.	<i>Comparación de los regímenes pluviométricos e hidrológicos</i>	
5.3.2.	<i>Correlación de las series mensuales de precipitación y aportación.</i>	
5.3.3.	<i>Análisis de los retardos entre las variables.</i>	
5.3.4.	<i>Estudio de la conexión estacional entre las variables.</i>	
5.4.	El estudio a nivel anual de la respuesta de las aportaciones a la precipitación. Análisis de correlación.	167
5.5.	Resumen. Algunas reflexiones finales.	175
6.	LA APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE SEQUÍA.	179
6.1.	La sequía. El Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP).	179
6.2.	Aplicación del índice de sequía a las series de precipitaciones mensuales (IESP).	185
6.3.	Aplicación del índice de sequía a las series de aportaciones mensuales (IESAp).	209
6.4.	Sequía pluviométrica frente a sequía hidrológica. Comparativa de las situaciones observadas en las cuencas de estudio.	233
6.4.1.	<i>Exploración de la conexión entre el fenómeno pluviométrico y el hidrológico.</i>	
	A Nivel de conexión entre las series de IESP e IESAp.	
	B Comparación de las secuencias secas en ambas variables.	
	C Análisis de los retardos entre las variedades de sequía.	
6.4.2.	<i>Tipología y clasificación de las cuencas según su respuesta hidrológica a la sequía.</i>	
	A Fase de clasificación previa.	
	B Fase de interpretación.	
	o GRUPO 1. Las cuencas de histogramas del IESAp bimodales o cuasi-bimodales.	
	o GRUPO 2. Las cuencas suroccidentales impermeables de la Península.	
	o GRUPO 3. Las cuencas de ambientes de intensa aridez.	
	o GRUPO 4. Las cuencas de la margen norte del Duero.	
	o GRUPO 5. Las cuencas poco permeables de la montaña interior peninsular.	
	o Cuencas independientes.	
6.5.	Síntesis de los resultados y reflexiones.	312
6.5.1.	<i>Singularidades de la sequía hidrológica.</i>	
6.5.2.	<i>La funcionalidad y viabilidad del índice aplicado a las aportaciones.</i>	

7.	CONCLUSIONES.	323
7.1.	Conclusiones relativas a la caracterización de las variables precipitación y aportación.	324
7.2.	Conclusiones relativas a la caracterización de las cuencas de estudio.	325
7.3.	Conclusiones relativas a las relaciones existentes entre precipitaciones y aportaciones.	326
7.4.	Conclusiones relativas a los resultados obtenidos en la aplicación del índice a precipitaciones y aportaciones.	327
7.5.	Conclusiones relativas a la realización de una tipología de cuencas de acuerdo con su respuesta hidrológica a la sequía.	331
7.6.	Síntesis de las principales potencialidades y limitaciones de la aplicación del índice estandarizado de sequía pluviométrica a las series de aportaciones. Líneas de investigación futuras.	332
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS E ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.	337
8.1	Referencias bibliográficas	337
8.2.	Índice de figuras y tablas	357

Capítulo 1

Introducción

1.1. CONTEXTO, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO.

Un rasgo geográfico natural que define el clima de las cuencas mediterráneas españolas es la aridez, es decir, la falta sistemática de humedad y de recursos hídricos, que puede resultar limitante (Rico Amorós, A. y Hernández Hernández, M., 2008).

Otro hecho destacable es que las disponibilidades de agua, provenientes principalmente de las masas de agua continentales, tanto superficiales como subterráneas, se caracterizan por una destacada irregularidad temporal- estacional e interanual- y espacial.

Además, existen dos paradojas relativas a la demanda de agua que agravan este problema de la irregularidad temporal y espacial:

- Normalmente las mayores demandas, se producen en verano, la época del año en la que los caudales son más limitados o incluso inexistentes, si la cuenca no dispone de mecanismos de regulación tales como la retención nival o subsuperficial.
- Al mismo tiempo, estas demandas se concentran en el área de mayor dinamismo demográfico y económico, el arco mediterráneo, situándose con frecuencia por encima de unos recursos que se sitúan entre los más escasos del país y generando problemas de déficit y escasez.

A todo este desajuste e irregularidad sistemática, predecible y planificable de manera relativamente sencilla, hay que sumarle el factor azaroso introducido por la sequía. La sequía supone una anomalía transitoria, más o menos prolongada, durante la cual los valores de las precipitaciones son inferiores a los normales en el área, implicando una disminución

significativa de los recursos hídricos en ella (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012b).

Se trata de un riesgo natural ocasional, pero es especialmente frecuente y extremo en la región mediterránea, para el cual está prevista una acentuación en el contexto del incipiente cambio climático. Este aumento del riesgo se explica por el propio aumento de las temperaturas, que determinará un incremento de la demanda evaporativa del aire, y de la existencia de unas precipitaciones cada vez más irregulares, las cuales propiciarán el incremento de las secuencias secas prolongadas y probablemente muy intensas.

La sequía no se puede evitar, pero se pueden mitigar sus efectos negativos ambientales y socioeconómicos, con adecuadas herramientas de planificación y gestión (WWF, 2012). En este sentido, una de las cuestiones aún no completamente resueltas más acuciantes y prioritarias es el establecimiento de un sistema de indicadores capaces de anticipar la sequía y realizar su previsión, seguimiento y control, los cuales además permitan activar los pertinentes protocolos de alerta temprana. De hecho, en esa dirección se están encaminando los mayores esfuerzos en materia de sequía del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, así como de los organismos autonómicos responsables de la gestión del agua en sus respectivos territorios y las Confederaciones Hidrográficas.

En este contexto de preocupación se sitúa la propuesta general dentro de la cual se inserta este trabajo, elaborada por Maria Fernanda Pita López, y publicada dentro de las aportaciones al Comité de Expertos en Sequía del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente en 2007. Esta propuesta metodológica global persigue la elaboración de un sistema de indicadores de sequía apto para los diferentes ámbitos hidrológicos existentes en España, esencialmente las Demarcaciones Hidrográficas, pero también las subcuencas y los sistemas de explotación, cada uno de ellos con escalas espaciales diferentes y por ello mismo con problemas también distintos.

En dicho documento se insiste en que la diversidad de fenómenos ligados a la sequía y también los distintos tipos de sequía existentes: pluviométrica, hidrológica, edáfica, agrícola, económica, etc. determinan que el sistema de indicadores deba ser también complejo y diverso, en lugar de usarse un único indicador. En el presente estudio no queremos perder de vista esta perspectiva integral, aunque nos ciñamos exclusivamente al desarrollo y análisis de uno solo de estos índices que compondrían el sistema. Además, la caracterización de los

periodos deficitarios del pasado supone un punto de partida, ya que la comparación de su intensidad y persistencia con las medidas llevadas a cabo en ese tiempo para el abastecimiento de la población nos ayudará *a posteriori* a entender cómo evaluar la vulnerabilidad que sufre esa población en particular ante el riesgo de sequía, pudiendo así ampliar las investigaciones hacia las diferentes líneas del sistema de indicadores.

Así, el **objetivo general** de esta investigación persigue estudiar el comportamiento de la sequía hidrológica en las cuencas mediterráneas españolas a partir de las manifestaciones que ésta presenta en las aportaciones.

En profundidad, las **preguntas a las que se pretende dar respuesta** con este estudio son las siguientes:

- ¿Qué relación existe entre la precipitación y la escorrentía a diferentes escalas temporales y espaciales y cómo se reproduce dicha relación al evaluar los déficits o anomalías en ambas variables? ¿De qué depende?
- ¿Tiene sentido estudiar la sequía hidrológica independientemente de la sequía pluviométrica?
- ¿Qué caracteriza y diferencia a la sequía hidrológica con respecto a la variedad pluviométrica?
- ¿Qué tipo de índice sería adecuado para evaluar la sequía hidrológica?
- ¿Qué características de las cuencas hidrológicas son las que más influyen en la respuesta hidrológica a la sequía? ¿De qué manera?

De acuerdo con ellas, el objetivo fundamental de la tesis se desglosa en las siguientes **metas particulares** a llevar a cabo con el desarrollo de la misma:

- En primer lugar, analizar las conexiones y causalidades que se registran entre la sequía pluviométrica y la sequía en las aportaciones. No se espera una relación lineal perfecta entre ambas, ya que supondría que estudiar la sequía o bien en las aportaciones o bien en las precipitaciones fuese equivalente, redundante, y no se apreciaran distinto número de secuencias secas, diferentes duraciones, intensidades o ubicaciones, retardos, etc.
- Por otra parte, verificar la utilidad de la aplicación o adaptación del Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP) a los datos de aportaciones de una cuenca.
Nuestra idea es comprobar que el uso de este índice en un parámetro diferente al de la precipitación, para el que fue originariamente diseñado, nos arroja resultados reales, válidos y de utilidad, ahorrando así el esfuerzo de tener que desarrollar un índice diferente para ambas variables, siendo además sus resultados comparables entre sí.
- Finalmente, establecer una tipología de cuencas, de acuerdo con parámetros físicos fácilmente mesurables; y pronosticar dentro de las clases instituidas un determinado patrón de respuesta hidrológica ante las diferentes situaciones pluviométricas, especialmente ante las secas.

Es evidente que todo este proceso requiere que previamente se efectúe una exhaustiva caracterización física de las cuencas piloto en las que realizamos el estudio, intentando evaluar el efecto que inducen tales rasgos sobre el comportamiento de las aportaciones: anomalías, retardos con respecto a la precipitación, atenuaciones de las tendencias, amplificaciones, etc.

Aunque luego se incidirá mucho en esta cuestión, conviene destacar desde el inicio que el trabajo pretende ceñirse al ámbito de los fenómenos naturales, a la sequía determinada estrictamente por procesos de la naturaleza y no contaminados fuertemente por la

intervención antrópica ¹; ello implica que, al hablar de la sequía hidrológica, aludiremos a la sequía registrada en las aportaciones a los cauces previa a cualquier tipo de intervención humana relativa a embalses o desembalses, los cuales alterarían sustancialmente el verdadero comportamiento de la sequía en el medio natural. Esta exigencia determina la limitación de que solo serán susceptibles de estudiarse las aportaciones registradas en las cabeceras de las cuencas, porque en un clima como el nuestro y con una política del agua tradicionalmente volcada en la construcción de embalses, solo en las cabeceras pueden encontrarse series de aportaciones capaces de reflejar razonablemente el comportamiento “natural” del medio, que es el que aquí nos interesa.

Las **justificaciones** del trabajo, aunque se han esbozado a lo largo de lo ya expuesto, podrían resumirse en los siguientes hechos:

- La relativa escasez de trabajos sobre sequía en aportaciones frente a los existentes en precipitaciones (sequía pluviométrica). Esta última afirmación, que acredita aún más nuestros fines, no deja de resultar paradójica, ya que entender el funcionamiento de la sequía hidrológica en una cuenca constituye un enorme paso en la caracterización de la disponibilidad de agua y la potencialidad de abastecimiento en la misma, de acuerdo con la mejor y más directa vinculación con los recursos reales que tiene la aportación con respecto a la precipitación.
- Las lagunas de conocimiento que aún persisten acerca de la relación existente entre la sequía pluviométrica y el reflejo de ésta en las aportaciones a los cauces. Más allá de algunas generalidades sobre las relaciones entre precipitaciones y aportaciones que se establecen en documentos como el Libro Blanco del Agua, existen pocas verificaciones precisas de estas relaciones, mucho menos en las situaciones precisas de sequía.

¹ Sabiendo que es imposible eliminar del todo la intervención antrópica.

- La necesidad existente actualmente en España de un sistema de indicadores capaces de reflejar la sequía en sus múltiples manifestaciones, para responder a las exigencias impuestas por la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE) y su trasposición a la realidad española.
- La necesidad de aislar la sequía estrictamente climática o natural de los fenómenos derivados de la gestión antrópica del agua, la cual procede también de la DMA, en concreto, el artículo 4.6 , el cual contempla la posibilidad de que se alteren temporalmente los parámetros de calidad del agua cuando se alcance una sequía de carácter excepcional.

Las **hipótesis generales de partida** de esta investigación son:

- De acuerdo con el funcionamiento del sistema hidrológico, la sequía en las aportaciones debería reflejar el comportamiento de la sequía pluviométrica, pero con notorias variaciones atribuibles a los condicionamientos impuestos por las características físicas de la propia cuenca, apreciables sobre todo en los principales parámetros caracterizadores de la sequía (número de secuencias secas, duración, intensidad) y con cierto retardo temporal, reflejo de los procesos que tienen lugar desde que la precipitación cae en la cuenca hasta que circula por los cauces en forma de escorrentía.
Siendo esto así, y supuesto el conocimiento de esas variaciones y relaciones entre sequía pluviométrica y sequía en aportaciones, la sequía pluviométrica podría alcanzar un cierto valor predictivo con respecto a la segunda variedad que sería muy útil para la planificación de los recursos en situaciones deficitarias.
- Esas variaciones y relaciones estarán determinadas por las características de las cuencas vertientes con especial relevancia para la conversión de las precipitaciones en aportaciones, de forma tal que a cada tipo de cuenca debería corresponderle un determinado tipo de respuesta hidrológica a la

sequía pluviométrica, pudiendo establecerse clasificaciones entre las mismas de acuerdo con ello.

En consonancia con todas estas premisas, la **estructura del trabajo** se compone de los siguientes apartados:

- En primer lugar se hará un bloque de contextualización para aclarar las nociones y conceptos fundamentales que utilizaremos en el trabajo en relación con la sequía, en sus diversas acepciones, especialmente la sequía pluviométrica y la hidrológica. En él, además, estableceremos el estado de la cuestión en relación con el tema.
- A continuación dedicaremos otro bloque a la presentación y caracterización del área de estudio. Dado que la selección de dicha área ha estado muy condicionada por la disponibilidad de la información de aportaciones en régimen natural, este bloque estará ligado a la presentación de las fuentes utilizadas para obtenerlas. Tras la presentación de las cuencas, se procederá a su caracterización a partir de las variables morfométricas, hidrogeológicas y fisiográficas relevantes para los propósitos de este trabajo.
- Se entra así ya en el corazón del trabajo, procediendo al análisis de las relaciones existentes entre el comportamiento de las precipitaciones y las aportaciones en las cuencas estudiadas. Un zoom progresivo nos conducirá desde las relaciones entre las variables originarias a las diversas escalas temporales, hasta el análisis de las relaciones que presentan en las situaciones de sequía, en las secuencias secas, que son las más relevantes para nuestro trabajo. Lógicamente, ello implicará la aplicación previa del IESP a las aportaciones y la verificación de su validez para la expresión de la sequía en esta magnitud.

- Por último, se procederá a establecer las conclusiones más relevantes, las cuales, en la medida de lo posible, serán agrupadas de acuerdo con las metas particulares del trabajo a las que dan respuesta.

1.2. METODOLOGÍA.

En nuestro estudio se distinguen *tres etapas de análisis* bien diferenciadas, conducentes a la consecución de cada uno de los objetivos planteados:

- En primer lugar es necesario efectuar una caracterización profunda de las 29 cuencas piloto en las que se desarrollará el estudio, profundizando en los rasgos físicos de las mismas que puedan condicionar el funcionamiento de la escorrentía: área y forma de la cuenca, hidrogeología, relieve, red hidrográfica, etc.

En la medida en que sea posible, se recopilarán datos a escala de detalle relativos a los usos del suelo y coberturas vegetales de las cuencas, dado que estas variables pueden inducir cambios significativos en el funcionamiento hidrológico. No obstante, hay que contar con que este tipo de datos suelen ser escasos y estar poco actualizados.

En las etapas sucesivas, todas estas descripciones nos servirán para intentar razonar las anomalías registradas en los comportamientos de las escorrentías entre una y otra cuenca frente a situaciones pluviométricas similares, atendiendo tanto a los valores originales como a los indicadores de sequía. Dentro de una misma cuenca, además, se identificarán particularidades en el comportamiento de las aportaciones que podrán ser explicadas también por las características físicas.

- A continuación se realiza el análisis de los datos climáticos e hidrológicos. Una vez seleccionadas y corregidas las series de datos de tal forma que se garantice su aptitud, contrastaremos los comportamientos registrados en precipitaciones y aportaciones a distintos niveles temporales (mensuales,

estacionales, anuales, etc.), para evaluar si tales variables siguen un patrón general de comportamiento interconectado en cada cuenca o por el contrario se distribuyen de forma muy cambiante y, si es así, intentar explicar las razones que puedan motivarlo.

No debemos perder de vista la importancia que esta fase posee por sí misma a la hora de interpretar si el análisis de la sequía va a verse mejorado o ampliado en algún sentido (intensidad, duración, comienzo, final, etc.) si lo efectuamos sobre las escorrentías en lugar de sobre la pluviometría o, por el contrario, ambas variables se encuentran tan ligadas que los resultados serán redundantes.

En este paso comenzaremos a intentar separar las cuencas según su comportamiento hidrológico, conectando las diferencias en los regímenes con las características morfológicas y morfométricas identificadas en la fase anterior, primero visualmente, y posteriormente mediante el uso de técnicas multivariantes.

- Por último aplicaremos el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP) tanto a las precipitaciones como a las aportaciones de la cuenca, para identificar y evaluar las diferentes secuencias deficitarias de cada serie. Es otro punto en el que debemos comparar los comportamientos entre ambas variables en una misma cuenca piloto y también entre unas cuencas y otras, si es posible asociando las diferencias identificadas a las particularidades físicas de cada una de acuerdo con la misma perspectiva que en la fase anterior.

Completados nuestros tres pasos fundamentales y solventadas las cuestiones individuales que se planteaban en las hipótesis de partida y los objetivos del trabajo, llega el momento de valorar todos los resultados obtenidos de forma global y verificar si resulta válida y provechosa la aplicación del IESP a la variable aportación. Todo este esfuerzo ampliará el nivel de conocimiento del régimen pluviométrico y su incidencia sobre la escorrentía, la cual

está directamente relacionada con la potencialidad de abastecimiento que ofrecería cada cuenca en particular en las diferentes situaciones.

1.3. FUENTES.

Los datos de *precipitaciones* utilizados proceden de la base de datos MOPREDAS (Monthly Precipitation Dataset), desarrollada por el Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza a partir de la restitución y relleno de lagunas de la información pluviométrica mensual registrada en las estaciones oficiales pertenecientes a la red de AEMET. Para cada cuenca se realiza un promedio de todas sus series, de acuerdo con la metodología que explicaremos en el capítulo 4.

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, 2012c), herramienta perteneciente al Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Se trata de una medida efectuada en el propio embalse mediante sistemas de aforo. Ello supone que solo contamos, también, con una sola serie de aportaciones para cada cuenca, la correspondiente a su desembocadura en el embalse.

En un estudio prospectivo previo, en el que solo abarcamos subsistemas de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, se intentaron realizar los análisis a partir de los caudales estimados mediante modelización hidrológica, concretamente utilizando los datos que para esta cuenca se evaluaron con el uso del modelo SACRAMENTO, un modelo de simulación de la escorrentía a partir de parámetros físicos y volúmenes pluviométricos.

Estos datos fueron calculados con motivo de la realización del Estudio de Recursos Hidráulicos de la Cuenca del Guadalquivir en los años noventa y aparecen publicados en el texto del Protocolo de Sequía para la Cuenca del Guadalquivir (Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, 2005).

Lamentablemente, como ampliaremos más adelante, no se trataba de datos suficientemente consistentes y fiables para algunos de los subsistemas de la Cuenca, por lo que hubo que descartarlos. Posteriormente, usando el modelo SIMPA, se ha efectuado una modelización hidrológica de todo el territorio nacional con una resolución espacial de un kilómetro cuadrado, pero el acceso a los datos a niveles espaciales de detalles resulta aún complicado, puesto que no se encuentran libre y fácilmente disponibles².

Efectivamente, la ventaja de los datos de aportaciones modelados es que aseguran el valor puro de escorrentía natural para cualquier punto de una cuenca, eliminándose la incidencia de los volúmenes procedentes de desembalses aguas arriba de los diversos puntos de medida, los cuales lógicamente desnaturalizan la medición real. Esta certeza de estar midiendo valores exclusivamente procedentes de la escorrentía natural no es posible con los datos reales de los que disponemos salvo en las cuencas de los embalses de cabecera, a las que necesariamente se ceñirá nuestro estudio.

Por último, los datos relativos a las *características de las cuencas* se han extraído a partir del análisis SIG de los archivos con formato *ESRI Shapefile*, en su mayoría tomados también de la página Web de descargas del SIA, en su apartado de información cartográfica.

Los datos de partida extraídos de la web son los siguientes:

- Las Demarcaciones Hidrográficas completas de todas las Confederaciones Hidrográficas del ámbito climático mediterráneo español, tanto peninsular como insular.
- Las subcuencas hidrológicas en las que se dividen las Demarcaciones Hidrográficas generales anteriores, tal y como se delimitaron en los distintos Planes de Cuenca y Estudios de Recursos correspondientes. De esta capa se extraerán las cuencas piloto finales para el estudio.

² En un futuro, podría resultar interesante comparar y ampliar todos nuestros resultados con una evaluación de los mismos aspectos realizada a escala de las Demarcaciones Hidrográficas al completo, utilizando datos del SIMPA, no solamente con idea de corroborar la validez y fidelidad de este modelo para estudios de sequías a diferentes niveles, sino también porque este tipo de datos permite no tener que limitarse solamente a cuencas que cumplan determinados requisitos.

- Los embalses de todas las Demarcaciones, de los que seleccionar aquellos que se sitúen en las desembocaduras de las cuencas pilotos finalmente escogidas.
- La red fluvial de las mismas, a escala 1:25.000.
- La cobertura de unidades hidrogeológicas.
- La cobertura de cuencas nivales de todo el territorio.

En cambio, los *ESRI Shapefiles* correspondientes a los *usos del suelo* en las cuencas de estudio fueron descargados de la página web de la *European Environment Agency*, y corresponden a la información producida para el proyecto europeo *CORINE Land Cover* en el año 2000 (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2000). Estas capas, realizadas a partir de fotointerpretación de imágenes *Landsat*, son una clasificación que cubre todo el territorio europeo (concretamente 32 países para el año 2000) a alta resolución espacial, cartografiándose los elementos lineales y puntuales a partir de que su anchura supere los 30 metros.

En último lugar, el *Modelo Digital de Elevaciones* (MDE) de la Península Ibérica utilizado para efectuar los análisis SIG del relieve, con resolución de 80 m de celdilla, fue generado por A. M. Felicísimo a partir de datos del *U. S. Geological Survey* y obtenido directamente desde su página Web personal (<http://www6.uniovi.es/~feli/index2.html>). Obedece a un estándar cuya precisión absoluta en altura es inferior a 16 m, la relativa en altura a 10 m y la planimétrica a 20 m; por lo que resulta totalmente apropiado para nuestros propósitos, no demasiado ambiciosos en cuanto a precisión.

1.4. ÁREA DE ESTUDIO E INTERVALO TEMPORAL ESCOGIDOS. CONTEXTUALIZACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE SU SELECCIÓN.

El ámbito de estudio, dentro del cual se seleccionan las cuencas piloto para realizar los análisis, son 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 (Ver Tabla 1.1).

TABLA 1.1: Área de las Demarcaciones Hidrográficas mediterráneas en territorio español.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA	ÁREA EN TERRITORIO ESPAÑOL (KM.²)
Cuencas internas de Cataluña	16.494
Cuenca Balear	5.019
Duero	78.860
Tajo	55.764
Guadiana	55.389
Guadalquivir	57.228
Cuenca Sur (mediterráneo andaluz)	17.948
Cuenca Atlántica Andaluza	10.679
Segura	18.897
Júcar	42.958
Ebro	85.567

FUENTE: Elaboración propia a partir de la información contenida en el Sistema Integrado del Agua.

Estas cuencas mediterráneas se localizan geográficamente en el archipiélago Balear y a lo largo del centro, sur y este de la Península Ibérica (Ver Figura 1.1).

FIGURA 1.1: Demarcaciones Hidrográficas de tipología climática mediterránea que poseen todo o parte de su territorio en España.



FUENTE: Elaboración propia.

Al completo comprenden una extensión de 444.810 Km.² dentro de España, ocupando el territorio de 13 comunidades autónomas. Además, hay que tener en cuenta la superficie de 55.610 Km.² que las cuencas de desembocadura del Guadiana, Tajo y Duero ocupan en Portugal, si bien este espacio no concierne al presente estudio.

Estas 11 Demarcaciones Hidrográficas mediterráneas se ubican a lo largo de numerosas macrounidades geológicas y geomorfológicas, destacando la Meseta Central y sus cordilleras internas y adyacentes, las Depresiones del Ebro y Guadalquivir en sus flancos y, bordeando estas, los Pirineos y los Sistemas Béticos respectivamente. Dichas unidades son, como cabe esperar de tan amplio territorio, muy distintas en composición geológica y estructura, lo cual influye en el relieve y la geomorfología, en el trazado de las redes fluviales, en el régimen hídrico, la vegetación, etc.

Hemos considerado estas confederaciones por pertenecer al contexto mediterráneo español, si bien existen en su seno multitud de gradaciones climáticas, sobre todo derivadas de la proximidad al mar, la altitud, la orografía y en cierta medida también las diferencias latitudinales.

A su vez, dentro de las mismas se han seleccionado en concreto las 29 subcuencas que drenan hacia los embalses que aparecen en la Tabla 1.2.

TABLA 1.2: Subcuencas seleccionadas para el estudio.

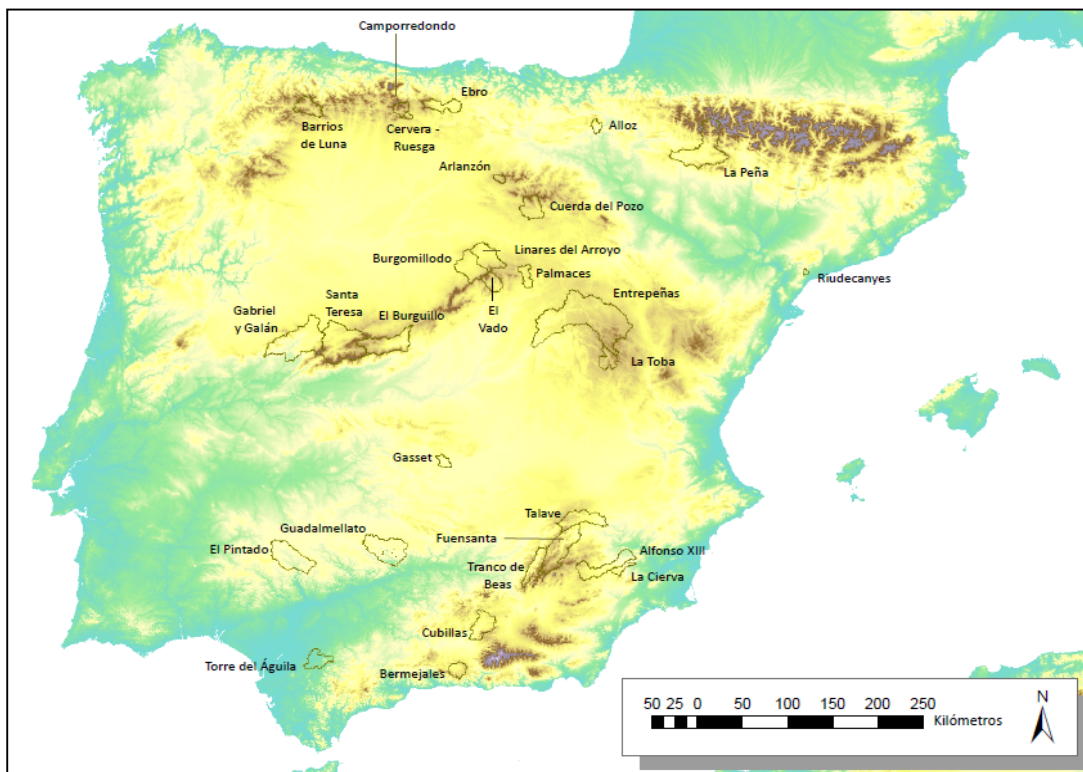
SUBCUENCAS DE CABECERA SELECCIONADAS	CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DE PERTENENCIA
Alfonso XIII	Segura
Alloz	Ebro
Arlanzon	Duero
Barrios de luna	Duero
Bermejales	Guadalquivir
Burgomillado	Duero
Camporredondo	Duero
Cervera Ruesga	Duero
Cubillas	Guadalquivir
Cuerda del pozo	Duero
Ebro	Ebro
El Burguillo	Tajo
El Pintado	Guadalquivir
El Vado	Tajo
Entrepeñas	Tajo
Fuensanta	Segura
Gabriel y Galán	Tajo
Gasset	Guadiana
Guadalmellato	Guadalquivir
La Cierva	Segura
La Peña	Ebro
La Toba	Júcar
Linares del arroyo	Duero
Palmares	Tajo
Riudecanyes	Cuencas internas de Cataluña
Santa Teresa	Duero
Talave	Segura
Torre del águila	Guadalquivir
Tranco de Beas	Guadalquivir

FUENTE: *Elaboración propia.*

Todas estas subcuencas drenan hacia embalses de cabecera (Ver Figura 1.2 y Mapa de localización de las 29 cuencas en el primer epígrafe del Anexo), 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.

FIGURA 1.2: Subcuencas hidrográficas seleccionadas para el estudio.



** Para un mayor detalle, consultar Anexo.
FUENTE: Elaboración propia.*

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. En este sentido, es significativo que entre las 29 subcuencas seleccionadas sumen en torno a los 22.500 Km.², aproximadamente un 4,5% de la superficie total de las once Confederaciones de estudio incluidas, pero se acumule una escorrentía media anual, 6.599 Hm.³, que supera el 8,5% del total del ámbito (estimado en unos 75.500 Hm.³) (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012c).

La elección de estas cuencas piloto en particular atiende fundamentalmente a las siguientes cuestiones:

- En primer lugar, la selección se vio forzada por la relativa juventud de nuestra red de embalses y aforos, existiendo muy pocas infraestructuras dotadas con series completas que se remonten hasta 1957. Se necesitarían demasiados años más, del orden de diez, para ampliar en tan solo unos pocos embalses la red disponible, con el menoscabo de utilizar un horizonte temporal demasiado corto y obtener por ello resultados menos significativos, como veremos más adelante. Existen tres Demarcaciones mediterráneas que no han obtenido representatividad en nuestra elección, pero ello se debe precisamente a estas carencias en los registros.
- Otra de las razones que avalan el uso de estas 29 cuencas en particular es la enorme diversidad de sus características físicas. Esta cuestión las hace muy útiles a la hora de cumplir uno de nuestros objetivos, dirigido a probar si las particularidades morfométricas, hidrogeológicas, de usos, etc. inciden en la diferenciación de la sequía hidrológica con respecto a la pluviométrica.
- La última de las razones atiende al hecho de que las 29 cuencas que finalmente se han podido utilizar están geográficamente muy bien distribuidas, permitiendo analizar diferentes situaciones climáticas dentro del propio ámbito mediterráneo español, de acuerdo con circunstancias latitudinales o fisiográficas distintas. Hubiese sido interesante disponer de algún registro de calidad en las Islas Baleares, pero su red de embalses es más reciente y los registros insuficientes desde el punto de vista estadístico.

En el epígrafe dedicado a la caracterización de las cuencas ampliaremos los detalles sobre cada una de ellas.

En otro orden de cosas, con respecto al contexto temporal que estableceremos para nuestro estudio, se ha seleccionado el periodo comprendido entre 1957 y 2005 de acuerdo con los siguientes criterios:

- *Estandarización.* Se trata de un periodo dentro del cual aproximadamente se mueven la mayoría de los Planes de Cuenca más recientes, así como los Planes Especiales de Sequía.
- *Continuidad en la medición.* En esta etapa ya existe un verdadero desarrollo de la sistematización en la toma de datos de las variables en suficientes puntos de las distintas redes que usamos en el estudio (SAIH, ROEA, AEMET...), por lo que nos aseguramos unos datos completos y de calidad.
- *Representatividad estadística.* Según la Ley de los Grandes Números, enunciada por Jacob y Niklaus Bernoulli en el siglo XVII, cuanto más amplia sea una muestra, el promedio del valor de la información obtenida de esos elementos se acercará más al promedio que se obtendría de todos los elementos que conforman la población completa, y esto la hará más representativa. Además, para llevar a cabo estudios relacionados con el análisis de la variabilidad en fenómenos naturales relacionados con el clima en concreto, encaminados a la obtención de valores normales, tendencias y extremos, AEMET advierte que los registros utilizados deben ser largos y de calidad (Agencia Española de Meteorología, 2012).

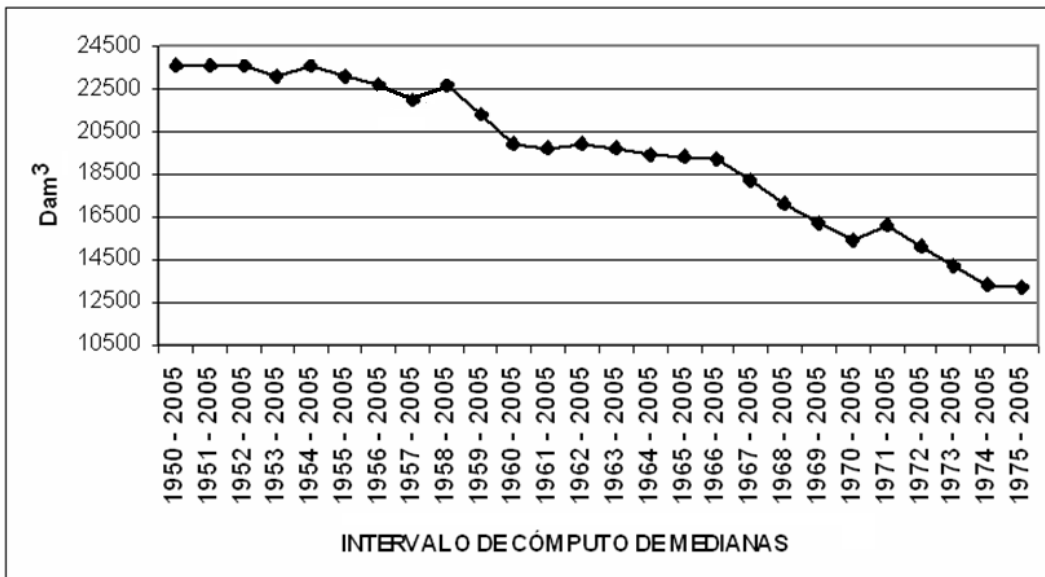
El intervalo de 49 años usado en este trabajo constituye un periodo lo suficientemente largo como para reflejar ciertos rasgos fundamentales de las series, tales como sus valores normales o su variabilidad; y además tiene en cuenta una etapa reciente que aún no aparece en gran parte de los Planes, en la que en teoría debe apreciarse un cambio hacia mayor aridez que se

correspondería con las hipótesis del cambio climático, testadas en numerosos estudios. De hecho, según el IPCC (2007) uno de los impactos más significativos del cambio climático sería este aumento de la aridez en zonas que ya experimentan actualmente sequías y problemas de escasez de recursos hídricos. Este efecto en España, será aún más perceptible e intenso en el área mediterránea (Universidad de Alcalá, 2006), por lo que tenemos que tenerlo muy en cuenta para el presente estudio.

Para comprobar hasta que punto influye el incorporar el mayor número de años posibles a nuestro estudio a la hora de extraer los estadísticos de la serie, se ha realizado un sencillo análisis de evolución de las medianas mensuales (dado que es la medida de tendencia central que usamos en nuestros índices de sequía).

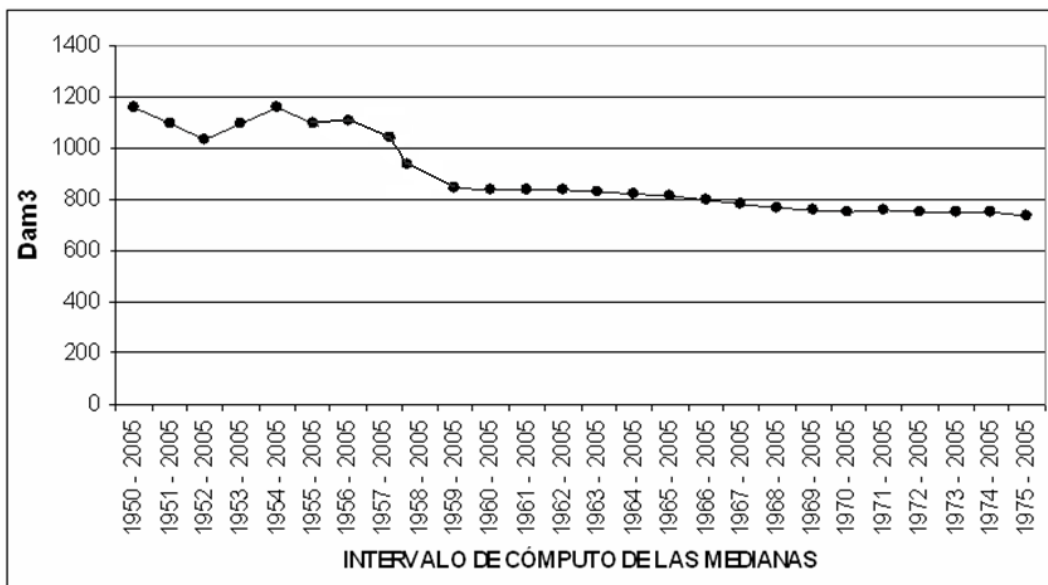
En las 29 cuencas testadas, para prácticamente todos los meses del año, las medianas bajan drásticamente si se calculan a partir de los años 60 del siglo pasado, debido a que pesan demasiado los años secos que se suceden a partir de los años 80 del mismo (Ver Figuras 1.3 y 1.4). Esto influiría, por ejemplo, en que a la hora de calcular los índices de sequía se considerasen como húmedos algunos meses que no lo son porque las medianas están demasiado bajas y que los muy secos aparezcan sensiblemente infravalorados; del mismo modo, en las etapas húmedas obtendrían unos índices extremadamente altos de superávit hídrico.

FIGURA 1.3: Evolución del valor mediano de la aportación del mes de marzo según el intervalo temporal considerado. Cuenca de Tranco de Beas.



FUENTE: Elaboración propia a partir de datos de la red ROEA.

FIGURA 1.4: Evolución del valor mediano de la aportación del mes de septiembre según el intervalo temporal considerado. Cuenca de Alloz.



FUENTE: Elaboración propia a partir de datos de la red ROEA.

Las medianas suben significativamente y tienden a equilibrarse a partir de la consideración de los últimos años de la década de los años 50. Esto implica que solo las cuencas que pueden retrotraerse hasta este punto de estabilización, identificado siempre en el intervalo 1955- 1960, deben ser usadas para un estudio de estas características.

De acuerdo con lo expuesto en este apartado, podemos concluir que, así como el contexto espacial seleccionado condiciona el periodo de estudio que vamos a utilizar, dado que las series de nuestras cuencas tienen una extensión temporal determinada, a la inversa sucede lo mismo, y será el propio periodo de estudio necesario para llevar a cabo un análisis estadístico válido el que restrinja el número de cuencas piloto que será materialmente posible usar.

Capítulo 2

Estado de la cuestión

2.1. EL FUNCIONAMIENTO DE LA ESCORRENTÍA EN UNA CUENCA HIDROLÓGICA. CONCEPTOS Y PROCESOS FUNDAMENTALES.

La cuenca hidrológica constituye un sistema, formado por el conjunto de aguas que drenan hacia un mismo canal o cauce y que constituye, por tanto, una unidad hidrológica y geográfica bien definida (Sala, M. y Batalla, R. J. 1996). El agua entra en dicho sistema a través de las precipitaciones, y sale tanto por medio del flujo subterráneo como en forma de escorrentía superficial.

Los procesos elementales más importantes que intervienen en la escorrentía se detallarán a continuación, y quedan resumidos a su vez en la Figura 2.1.

En primer lugar, la precipitación es la principal entrada de agua dentro de la cuenca fluvial, siendo la variable cuya cuantificación es más importante a la hora de evaluar los caudales, de ahí que sea también la que pongamos en relación con los valores de aportación. La precipitación es muy variable e impredecible, condicionando que los sistemas hidrológicos sean muy aleatorios (Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. 1994).

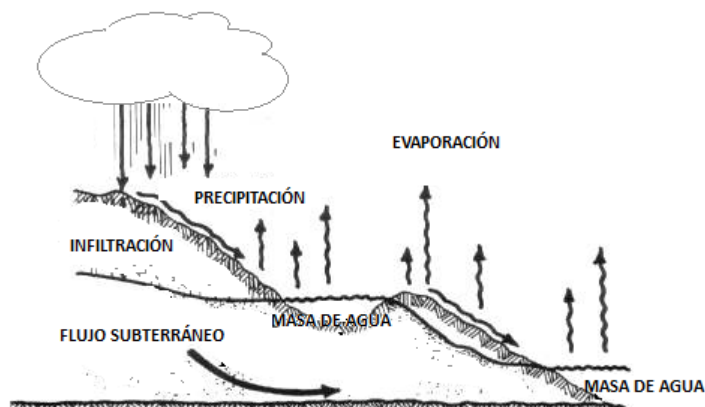
La evapotranspiración es la combinación de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación, siendo otro elemento muy variable y además uno de los más complicados de controlar en el ciclo hidrológico. Los principales factores que le afectan son la radiación solar, la cual es su principal motor; la velocidad del viento sobre la superficie; la disponibilidad de agua en el suelo, que impone la diferencia entre los valores potenciales y reales de este parámetro; y la cobertura vegetal.

Se trata de un factor despreciable en el cómputo del proceso lluvia- escorrentía a corto plazo, pero llega a influir de forma trascendental a las escalas de tiempo con las que trabajaremos. Es posible que llegue el punto en que la relación precipitación- escorrentía presente anomalías claras y que estas puedan imputarse a fases de evapotranspiración muy importante que tengan lugar en la cuenca donde se estén testando los comportamientos.

La intercepción por la vegetación y el almacenamiento en la microtopografía del suelo se conoce también como retención superficial. El agua participante en este fenómeno acaba finalmente por evaporarse o infiltrarse; de manera que a las escalas en las que se moverá este estudio resulta un parámetro de poca importancia y no suele incorporarse en los análisis (Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. 1994).

Mediante la infiltración, el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el interior del subsuelo. Este proceso está controlado por las características de la superficie del suelo y sustrato rocoso, la cubierta vegetal y demás usos del suelo, el contenido de humedad previa y la duración e intensidad de las precipitaciones (Ferrer Polo, J., 1993). Por lo general, la infiltración tiene una mayor incidencia si el episodio de precipitación viene tras un periodo seco, de ahí que la escorrentía tenga un cierto retardo en su inicio, pero su intensidad disminuye conforme se satura el suelo.

FIGURA 2.1: Procesos fundamentales que intervienen en el ciclo hidrológico dentro de una cuenca.



FUENTE: *Elaboración propia.*

Además de los procesos del ciclo hidrológico que se han explicado, como determinante del mismo se tendrá en cuenta la topografía de la cuenca. Ésta influye sobre el sistema de las siguientes formas (Parrilla Alcalá, E., 2004):

- El agua se escurre conforme a la línea de máxima pendiente dentro de la cuenca (Felicísimo, A. M., 1994). Por otra parte, establece la propia red ramificada de canales fluviales, formando un sistema de convergencia eficiente (Strahler, Arthur y Strahler, Alan, 1989) y estableciendo las zonas de salida del sistema.
- La topografía establece las divisorias de agua, que son los límites físicos de las cuencas, y por tanto determina la forma y tamaño de la cuenca, con todo lo que ello implica, como se detallará en el capítulo 3 relativo a las características morfométricas de los casos de estudio.
- Si la pendiente es pronunciada, se reduce la infiltración del suelo porque se acelera la velocidad de desplazamiento de la escorrentía superficial. Para zonas planas, se promueven los procesos de infiltración y retención del agua; aunque a menudo también se le da un mayor margen de actuación a la radiación solar, que incide durante mucho tiempo sobre la masa de agua – más estancada- y condiciona que esta pueda evaporarse más. En este sentido, dos ejemplos opuestos serían los de la cuenca de Tranco de Beas, con unas altas pendientes que propician la torrencialidad de los cauces pese a la gran capacidad hidrogeológica, y el de Gasset, tan llana que facilita una mayor retención del flujo pese a ser bastante impermeable.
- La distribución de las alturas en la cuenca- la cual puede definirse trazando una curva hipsométrica- condiciona la regularidad de la escorrentía dentro de la misma, ya que es un buen indicador de los cambios de pendiente que van a producirse. Para el proceso de escurrimiento no solo importa que la pendiente media sea elevada o no, sino la homogeneidad de la misma en el ámbito de la cuenca.

Estos son los parámetros fundamentales a tener en cuenta a lo largo de un estudio de las características del nuestro en lo concerniente al ciclo del agua y al papel de la escorrentía dentro de él.

2.2. REVISIÓN DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN SOBRE LOS ESTUDIOS GENERALES DE SEQUÍA Y SEQUÍA HIDROLÓGICA.

Indudablemente, en las últimas décadas se ha incrementado el número de estudios sobre el problema del agua en general y sobre la sequía en concreto, teniendo en cuenta la sensibilización con respecto a estos temas en el seno del cambio climático y considerando los impactos de las dos secuencias secas importantes de finales del siglo XX, acaecidas en los ochenta y noventa (Estrela Monreal, T. y Rodríguez Fontal, A., 2008), hasta el punto de que no resulte posible ni conveniente intentar recoger en este apartado todo lo desarrollado hasta ahora.

Sin perder la perspectiva general, a lo largo de todo este epígrafe se profundizará en lo que se ha desarrollado recientemente en España, ya que se corresponde con el área de estudio del presente trabajo. Las características de la sequía están lo suficientemente vinculadas al entorno en el que el fenómeno se desarrolle- incluso atendiendo solamente a la variedad pluviométrica del mismo- como para que las definiciones, los umbrales y los métodos para su detección y estudio también lo estén, en gran medida (Garrido, N. *et al.*, 2006). Valga como ejemplo lo enunciado por Olcina Cantos, J. (1994) con respecto a las Demarcaciones Hidrográficas españolas, aludiendo a que es necesaria una diferente reducción en el porcentaje de precipitación con respecto a la media anual según la cuenca de la que se trate para que en ella se empiece a considerar sequía. Por ello, no tiene sentido enfatizar en las cuestiones de interés en otros dominios climáticos y de gestión cuando el índice se diseñará para ser usado, al menos en principio, en el mediterráneo español.

- Así, este apartado comenzará haciendo un muy breve resumen de los conceptos y métodos manejados en los *trabajos de investigación* recientes más relevantes enfocados en la problemática de la sequía en nuestro país, particularmente aquéllos que tratan la variante hidrológica de ésta, ya que seguramente esto pondrá de manifiesto algunas carencias que han de ser cubiertas por un estudio como el nuestro.
- Subsiguientemente se dedicará una recopilación mucho más amplia de las técnicas y definiciones aplicadas por *organismos, administraciones, documentos oficiales, planes y leyes*. Se hará mayor hincapié en esta literatura en particular porque se trata de la parte de la teoría que ha logrado calar hacia las entidades encargadas de gestionar el

riesgo, y es verdaderamente este ámbito, la gestión, hacia cuyas posibles carencias se quiere orientar la aplicación de nuestro índice una vez testado.

Es importante añadir que no solo se atenderá a cómo se trata y se mide la sequía sino también a sobre qué datos de recursos hídricos se aplican, a cómo estos datos se obtienen las y a las técnicas usadas a tal efecto, ya que existe mucha disparidad al respecto.

Los *trabajos de investigación sobre sequía en España* son muchos y muy variados, identificándose los primeros indicios de preocupación por el tema en los trabajos de Rico Sinobas, M. y Echegaray Lacosta, J. ya a mitad del siglo XIX, y creciendo exponencialmente el número de ellos conforme nos acercamos a la actualidad.

Sin contar los documentos sobre materias afines o trabajos que tratan la sequía de manera transversal, Hernández Hernández, M. y Torres Alfosea, F., dentro del libro de Gil Olcina, A. y Morales Gil, A. (2001), nos ofrecen un resumen del gran volumen de bibliografía que se desarrolla en las últimas décadas con este fenómeno como tema central, distinguiendo entre obras generales en las que se aborda el concepto y la definición, estudios sobre detección y evaluación de la sequía y estudios en los que se valoran sus impactos ambientales y socioeconómicos, estos últimos no tan relacionados con la temática de este trabajo. Resulta especialmente llamativo comprobar que a raíz de la sequía de los años 80 del pasado siglo, las contribuciones son cada vez más frecuentes y en ellas se empieza a abordar el tema como un riesgo natural y por ello como una potencial amenaza (Pérez Cueva, A., 1983; Calvo García-Tornel, F., 2000); esta perspectiva cobra fuerza a partir de la siguiente gran sequía de los años 90 del pasado siglo. De hecho, solamente entre 1990 y 2000 surgen más de cien artículos y monografías nacionales en cuyo título aparece el término sequía y se aborda el tema como cuestión principal.

La sequía tiene multitud de definiciones, asumiendo que lo que las pone en común es la anomalía o déficit inusual en las condiciones de humedad, normalmente con independencia de las condiciones que la generen. Tiene además los siguientes componentes necesarios: la reducción de agua es temporal (si no sería aridez), es significativa y se define con respecto a una norma de referencia preestablecida (Hernández Moreno, E., 2008).

La controversia más frecuente aparece en si se trata de un fenómeno natural o tiene un componente antrópico, pero en este segundo caso la mayoría de los autores opta por

denominarlo escasez de agua (Iglesias, A., Garrido, A. y Moneo, M., 2003) como consecuencia derivada, o bien de la sequía (de la cual pretende distinguírsela), o bien de la mala gestión del recurso, o de la consolidación conjunta de ambas circunstancias.

Ahora bien, el umbral y las características temporales de la sequía sí se suelen asociar con los efectos socioeconómicos y ambientales que produce, ya que se asume que una secuencia seca corta, a menudo incapaz de generar un impacto significativo, no se considera una sequía como tal, aunque la situación meteorológica sea amenazante (Pérez Cueva, A. 1988; Olcina Cantos, J. y Rico Amorós, A, 1995; Pita López, M. F., 1995; ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012b).

Centrándonos específicamente en la variedad hidrológica del fenómeno, cabe añadir que aunque generalmente el estudio de los recursos hidrológicos y la evaluación de sus periodos de déficit se han abordado con menor ahínco y más imprecisión que la sequía pluviométrica en la literatura especializada, aparecen cada vez más estudios y documentos que lo hacen, dado que se la considera como la vertiente del fenómeno más expresiva del estado de los recursos y de la situación de escasez de agua que pueda generarse.

En todos los documentos consultados existe un consenso en asociar la sequía hidrológica a los efectos que tienen las etapas de poca precipitación sobre los niveles de los acuíferos, los lagos y los ríos (García Prats, A., 2006; UNESCO/OMS, 1992); en algunas definiciones se añaden los sistemas de gestión, los embalses y reservas y la insuficiencia para cubrir las demandas y necesidades sociales (ANDALUCÍA. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, 2012a; ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012b), si bien estas cuestiones están muy condicionadas por las características de la población objetivo y por las decisiones de gestión de agua en el entorno en concreto, desligándose mucho del fenómeno natural en sí.

Según Garrido, N. *et al.* (2006) la distinción entre la sequía meteorológica y la hidrológica se basa en que la primera de ellas se explica como la desviación de los valores climáticos con respecto a valores medios, difiriendo bastante, aún así, la definición de sequía según la zona geográfica donde ésta se acuñe. En cuanto a la sequía hidrológica, como hace referencia al caudal, depende en cierto sentido de la capacidad de gestionar los recursos hídricos, al menos los subterráneos; este matiz, sobre el que se reflexionará ampliamente a lo largo de este trabajo, cuestiona que sea un fenómeno estrictamente natural. En este

documento se indica que la variedad hidrológica tiene en general un retardo respecto a la meteorológica y si aumenta la precipitación en poco tiempo, a veces no se manifiesta.

Además, Marcos Valiente, O. (2001) sostiene que, al mostrarse retardada con respecto a la sequía pluviométrica, lógicamente no es un buen indicador del inicio del déficit pero sí lo es de la intensidad que puede llegar a adquirir el mismo.

Los métodos de identificación y cuantificación de la sequía hidrológica son esenciales y ocupan un importante volumen de bibliografía, ya que suele existir mucha subjetividad en la percepción de la sequía dependiendo de sus impactos socioeconómicos (Sánchez Muniosguren, L., 1990), y por ello es preciso elaborar indicadores que evalúen objetivamente la componente natural. Un buen resumen de los índices para la medición de la sequía más comunes aparece precisamente también en Marcos Valiente, O., 2001, donde el autor presenta toda una recopilación en la que se hace hincapié en la variedad hidrológica en particular.

Uno de los más destacados es la adaptación del *Palmer Drought Severity Index* o PDSI de Palmer (Palmer, W. C., 1965), el índice más usado para la evaluación de la sequía en el pasado. Establece un balance hídrico, considerando además las situaciones de déficit en las variables que participan en el cálculo (Vicente Serrano, S., 2004). No obstante, este índice presenta dificultades de cálculo y demostradas limitaciones (Alley, W., 1984); concretamente ha sido muy discutido porque sus resultados cambian mucho al modificar el periodo de estudio y presenta un pobre ajuste a los ambientes mediterráneos o las zonas de orografía compleja (Martínez Cortina, L. y Llamas Madruga, M. R., 2001).

El texto describe también otros índices basados en el balance hídrico del suelo, los cuales se encuentran plenamente desarrollados pero no han sido hasta el momento muy usados, tales como el *Surface Moisture Drought Index* (Hollinger, S. E., Isard, S. A. y Welford, M. R., 1993) o el Índice de balance demanda – disponibilidad hídrica (*Reclamation Drought Index*). Con este último índice se aporta una visión interesante por su simplicidad, ya que se define una sequía hidrológica como una sucesión de intervalos en los cuales la variable oferta hídrica menos demanda se mantiene negativa (Fernández Larrañaga, B., 1997). No obstante, una vez se profundiza en la definición de ambos parámetros de la resta, se encuentra que de

nuevo se mezclan en sus formulaciones fenómenos antrópicos y naturales y los resultados son más expresivos de escasez de agua que de sequía en sí.

Entre los métodos de evaluación de la sequía más célebres en la bibliografía, y que sin duda ha logrado introducirse entre las técnicas más aplicadas para su gestión a nivel internacional, merece mención especial el *Standardized Precipitation Index* o SPI (McKee, T. B.; Doesken, N. J. y Kleist, J., 1993), usado esencialmente debido a su sencillez y a la facilidad de su interpretación.

Paralelamente al desarrollo de esta tesis doctoral han sido publicados estudios de enorme interés centrados en la aplicación o modificación de algunos de estos índices de sequía para los caudales.

Los esfuerzos más interesantes provienen conjuntamente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y el Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza. Por afinidad temática a este trabajo destacamos las diferentes aproximaciones de Vicente Serrano, S. y López Moreno, J. I. (2005), Vicente Serrano, S. *et al.* (2010) y Lorenzo Lacruz, J. *et al.* (2012) entre muchas otras. En estos casos concretos, lo hallado para la sequía hidrológica se compara con los resultados del SPI de McKee, T. B. usado sobre precipitaciones, siendo una vez más el índice de referencia.

En estos trabajos se intenta identificar patrones de respuesta hidrológica a las situaciones de sequía meteorológica; sin embargo, poseen la desventaja de no contemplar en profundidad el grado de regulación hidrológica que cada cuenca usada puede tener, de tal forma que en los caudales medidos utilizados no solo están interviniendo procesos naturales de difusión de los volúmenes de agua, sino también detracciones, desembalses, etc., y de este modo resulta complicado aislar el papel de las características de las cuencas en el proceso.

Además, de nuevo en alguno de ellos, como en el trabajo de Vicente Serrano, S. y López Moreno, J. I. (2005), se introducen variables, como puede ser el volumen embalsado, cuyos valores que pueden estar distorsionados por cuestiones derivadas de la gestión de cuenca y que por tanto no son expresivas de la simple respuesta natural a la sequía climática.

Ahora bien, es muy importante el hecho de que en dichos estudios se identifiquen con claridad desfases entre ambas variedades de sequía en todos los casos, menores en las cuencas impermeables, y siempre del orden de unos 3 meses. Será necesario comprobar si

esto también sucede con nuestros datos, aprovechando los matices que aporta el hecho de manejar escalas de mayor detalle y datos de cabecera de cuenca.

Una cuestión relevante que se desprende de estos trabajos es la necesidad de centrar los esfuerzos en evaluar de qué manera las características litológicas o fisiográficas de las cuencas pueden intervenir en la modulación de la respuesta hidrológica, tal y como se pretende con esta tesis doctoral, ya que se reconoce que debe existir una vinculación bastante estrecha entre estos rasgos y las diferentes manifestaciones de la sequía en las aportaciones (Lorenzo Lacruz, J. *et al.*, 2012; Vicente Serrano, S. y López Moreno, J. I., 2005).

Se efectuará a continuación una revisión sobre el *tratamiento del tema en los organismos de gestión de los recursos y en los documentos oficiales*, esencialmente Leyes y Planes, a diferentes escalas espaciales y administrativas. Este esfuerzo aspira a poner en evidencia tanto las potencialidades de los indicadores y modelos de aproximación al problema de la sequía hidrológica que ya se han desarrollado para la gestión, como los aspectos en los que serían necesarias mayores investigaciones.

En el *contexto europeo*, el tema es discutido por la *Directiva Marco del Agua* o Directiva 2000/60/CE de 23-X-2000 “*Marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de agua*” (UNIÓN EUROPEA. PARLAMENTO Y CONSEJO, 2000), aunque solo parcialmente, puesto que se trata de una norma que pretende establecer un ámbito de actuación comunitario para la política de aguas en general.

Lo más destacable de esta norma a efectos del presente estudio es la definición de cuenca hidrográfica como elemento unitario básico de gestión y protección de las aguas y problemas asociados, de manera que se establezca una sola autoridad por cuenca y se promueva la cooperación administrativa entre los territorios que las integran (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000). De este modo, se asume implícitamente que será la Demarcación Hidrográfica la escala apropiada para el manejo pormenorizado de todas las cuestiones hidrológicas (entre ellas la sequía), si bien éstas pueden abordarse sintéticamente a escala nacional, sobre todo en lo concerniente a homogeneizar criterios y técnicas utilizadas.

Otra cuestión fundamental que establece es el contenido básico que deben contemplar los Planes Hidrológicos que se desarrollen en estas cuencas, cuya prioridad se cede, entre otros temas, a la identificación de las condiciones de referencia para los tipos de masas de agua superficiales. En este sentido debemos admitir que se trata de una norma muy orientada hacia cuestiones de calidad, contaminación, grado de desnaturalización, estado y potencial ecológico de las masas de agua, etc. y no tanto a cuestiones relativas al recurso en términos cuantitativos. Por tanto, la sequía aparece en cierto modo relegada a un segundo plano en esta identificación de las condiciones de referencia; a pesar de ello, su delimitación tiene un papel vital, ya que en caso de sequía excepcional se le otorga al país miembro la flexibilidad de postergar el cumplimiento de los estándares de calidad.

Aparte de esto, según Paneque Salgado, P. (2012), se están dando pasos conducentes a la redacción de una Directiva europea específica sobre sequías, tal y como existe para otros riesgos naturales, a juzgar por la profundidad y la intencionalidad del “Programa para salvaguardar los recursos hídricos en Europa” (*Blueprint to Safeguard Europe’s Waters*), a aprobar a finales de 2012, el cual se fundamenta en la evaluación del cumplimiento de la propia Directiva Marco de Aguas, haciendo especial hincapié en las circunstancias de déficit de agua.

A *escala nacional*, el documento más importante para cualquier cuestión de tipo hidrológico, y particularmente en cuanto a caracterización de recursos e identificación de sequías tanto pluviométricas como hidrológicas es el *Libro Blanco del Agua en España* (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000), texto que a su vez sirvió como elemento de ayuda para la elaboración de la que acabaría siendo la otra gran referencia a esta escala territorial, el *Plan Hidrológico Nacional*, para culminar así el desarrollo normativo previsto en la *Ley de Aguas* de 1985 (ESPAÑA. Jefatura de Estado, 1985; ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2001).

El *Libro Blanco* surgía ante la evidente necesidad de la recopilación de los datos básicos del agua en España, los cuales se encontraban muy dispersos en numerosas instancias administrativas y estudios privados, y su mera unificación en bancos de datos homogéneos y sistematización, ciertamente complicadas y que aún no están completas, ya suponía un gran interés intrínseco.

Será de gran importancia para nosotros la nueva forma de evaluación de los recursos que no solo propone sino que también efectúa de manera excelente el propio *Libro Blanco del Agua*, utilizando criterios homogéneos y una metodología común para todo el territorio nacional, e incorporando incluso los datos correspondientes a la sequía de los años noventa.

Previamente a su realización, el *Libro Blanco* distingue entre dos alternativas al uso de las series de caudales medidos, en el caso de que éstas sean insuficientes o el régimen se encuentre muy alterado: la restitución al régimen natural y la modelización hidrológica.

La restitución de los caudales consiste en estimar el régimen natural a partir del alterado, que es el que puede medirse. Para ello es necesario conocer con cierta precisión el volumen que han supuesto las detracciones de agua de los ríos y acuíferos, los retornos al río, los desembalses, los trasvases entre cuencas, etc., para que, a partir de ellos y de los propios datos de caudales medidos, se compute lo que realmente fluiría por cada cuenca si todas estas actuaciones no hubieran tenido lugar. Teóricamente se trata de una metodología sencilla, pero requiere que existan bases de datos pormenorizadas sobre todas estas actuaciones, lo cual sin lugar a dudas supone un obstáculo que implica recurrir a las simulaciones, pero sin olvidar que en un futuro lo óptimo es intensificar y potenciar las redes de medida (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000).

La modelización hidrológica, por su parte, consiste en simular las series históricas de escorrentía mediante programas informáticos, a partir de una serie de parámetros básicos de entrada referentes a la morfología y a la climatología de las cuencas. El procedimiento concreto de evaluación en el *Libro Blanco del Agua* ha consistido en la estimación hidrológica distribuida de los componentes básicos del ciclo del agua a la escala de todo el país, mediante el modelo precipitación- escorrentía conocido como SIMPA, reproduciéndose con bastante eficacia fenómenos muy complejos tales como la interacción de las aguas superficiales y subterráneas (CEH CEDEX, 2012).

En cuanto a las sequías propiamente dichas, en el *Libro Blanco* se reflexiona sobre la controversia relativa a su definición (y por ende, a los valores sobre los que debe medirse), a su escala temporal y espacial, sus umbrales, etc. Por primera vez, además, se establece que en ámbitos como el español, debido a su elevada capacidad de embalse y larga tradición en afrontar situaciones de déficit hídrico, el umbral del año es bueno para empezar a considerar una situación como suficientemente persistente como para ser considerada sequía.

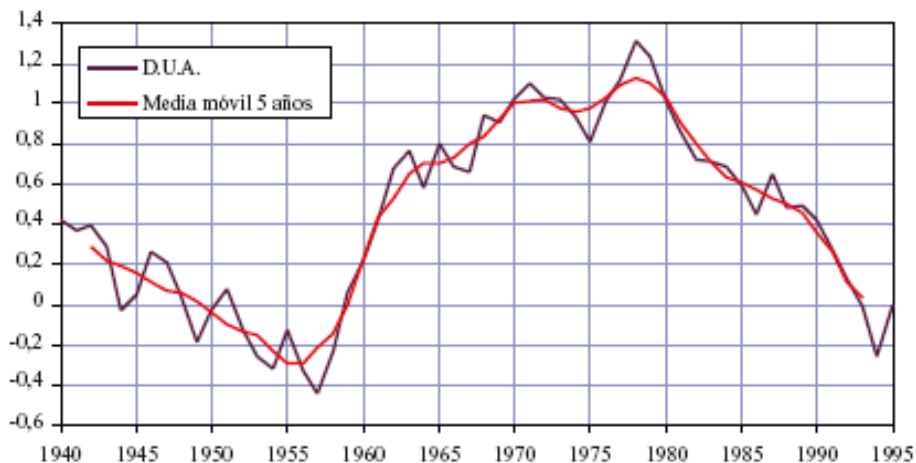
Además, el documento dedica un subepígrafe completo al tema, en el cual distingue entre las variantes pluviométrica e hidrológica, y para cuya caracterización en todo el territorio usa los datos generados por el modelo SIMPA.

Como complemento de esa descripción espacial de la sequía, se realizó una primera caracterización de la variabilidad temporal de precipitaciones y aportaciones, generando una serie de valores medios anuales para toda España en el periodo de 56 años comprendidos entre 1940/41 y 1995/96, junto con la media global para ese periodo. En un primer momento solo se comparan los valores anuales con la media de la serie, y pese a usar esta técnica *a priori* poco perfeccionada, se identifican bastante bien las etapas más secas y húmedas dentro de esos 56 años.

Con posterioridad, para apreciar mejor las rachas, se construyó la serie de desviaciones unitarias acumuladas o DUA (desviación del dato anual con respecto a la media, dividido por esta misma). Tendencias crecientes reflejarán rachas húmedas, y tendencias decrecientes reflejarán rachas secas (Ver Figura 2.2).

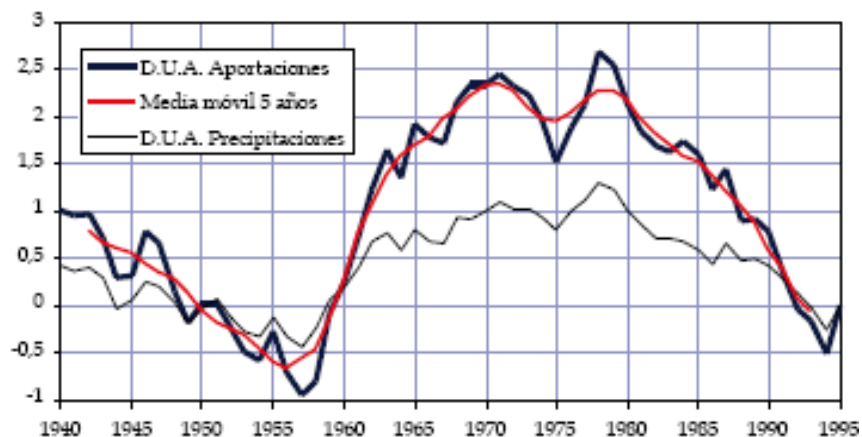
Pese a tratarse de una generalización para todo el territorio nacional y utilizar el nivel anual, las rachas secas identificadas se corresponden bien con las que se aprecian en estudios mucho más detallados, en parte porque la sequía pluviométrica es un fenómeno espacialmente poco variable. Sin embargo, las series y gráficas de las DUA sugieren que la vertiente hidrológica (Ver Figura 2.3) de la sequía tiende a ser más variable que la pluviométrica.

FIGURA 2.2: Desviaciones unitarias anuales acumuladas en la precipitación y sus medias móviles en 5 años. Periodo 1940-1996.



FUENTE: Libro Blanco del Agua en España (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000).

FIGURA 2.3: Desviaciones unitarias anuales acumuladas en la aportación y sus medias móviles en 5 años. Comparación con las precipitaciones. Periodo 1940-1996.



FUENTE: Libro Blanco del Agua en España (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000).

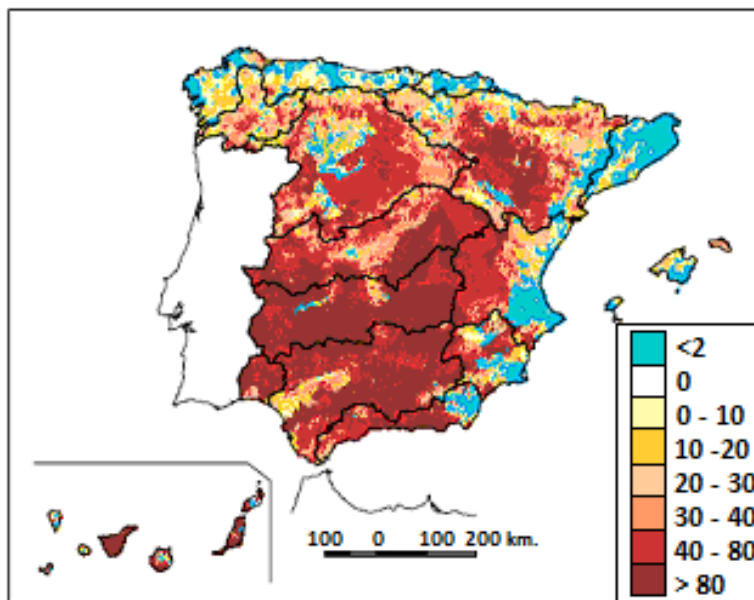
Asimismo será este documento el primero que considere absolutamente necesario el establecimiento de un sistema eficaz de detección de situaciones de sequía que permita

activar con suficiente antelación los planes de explotación prefijados para estas situaciones de emergencia. Es por ello por lo que, desde este momento, se hace patente la necesidad de desarrollar indicadores de sequía a escala espacial y temporal de mucho detalle, tanto de tipo retrospectivo, basados en las series históricas, para conocer la experiencia real de cada cuenca en situaciones pasadas de déficit y poder fijar umbrales, como de predicción, para identificar anticipadamente escenarios de alerta.

Particularmente, con respecto a la variedad hidrológica, el *Libro Blanco* es bastante más exhaustivo y concreto de lo que habitualmente resultan los documentos que hacen referencia al fenómeno de la sequía. Por primera vez se manifiesta que lo tenido en cuenta con relación a las precipitaciones no es directamente traducible a los caudales, ya que la relación lluvia-escorrentía no es siempre absolutamente lineal y, en ocasiones, reducciones de precipitación suelen producir disminuciones más acentuadas de las aportaciones, sin entrar en posibles retardos, etc. Alude a la necesidad de estudiar profundamente el funcionamiento de este sistema en cada cuenca particular antes de aplicar libremente los mismos procedimientos de detección y consideración de las secuencias secas que se utilizan en las series de precipitaciones.

Como aproximación al problema, a partir de los datos de aportaciones naturales simulados con el modelo SIMPA, en el *Libro Blanco* aparece también reflejada la distribución de la sequía hidrológica de los noventa en términos de reducción porcentual de las aportaciones totales con respecto a las medias de todo el periodo 1940-1996 (Ver Figura 2.4).

FIGURA 2.4: Mapa de disminución porcentual de la aportación media en el periodo 1990- 1995 respecto a la media del periodo 1940- 1996 para todo el territorio español.



FUENTE: Libro Blanco del Agua en España (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000).

En lo referente a la legislación de ámbito nacional que ha aludido al fenómeno de la sequía destacan: la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de *Aguas* (ESPAÑA. Jefatura del Estado, 1985) y sus modificaciones expresas en las Leyes 9/1996 y 46/1999; la *Ley del Plan Hidrológico Nacional* (ESPAÑA. Jefatura del Estado, 2001a) y por último el texto refundido de la *Ley de Aguas de 2001* (ESPAÑA. Jefatura del Estado, 2001b) con su modificación expresa en la Ley 62/2003. No obstante la mayoría de estas leyes se ciñen fundamentalmente al aspecto más socioeconómico del fenómeno, al desencadenamiento de situaciones extraordinarias de desabastecimiento de agua para la población, y son de escasa relevancia para el presente estudio, más orientado a la caracterización del recurso natural y de sus anomalías cuantitativas en el tiempo.

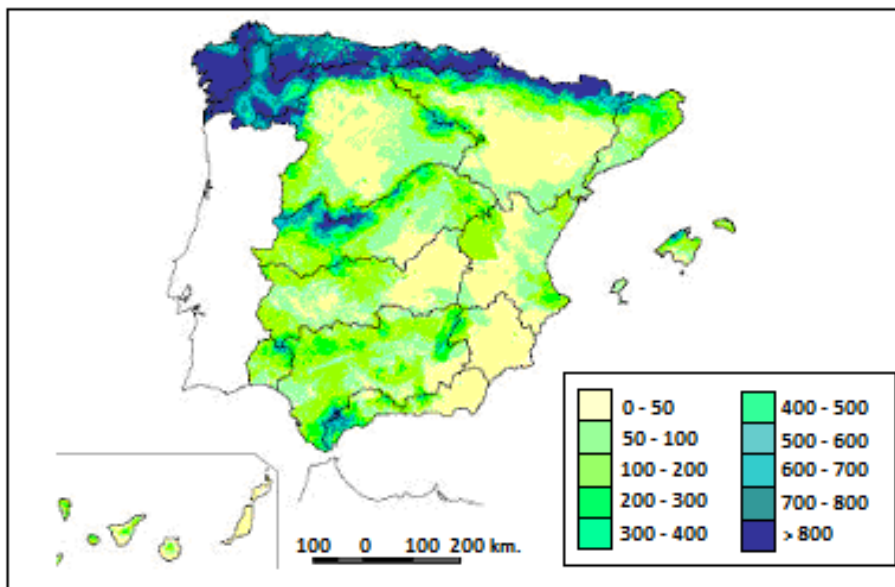
La excepción en este sentido es la *Ley del Plan Hidrológico Nacional*, dado que aborda expresamente en su artículo 6 la necesidad de revisión de los Planes Hidrológicos de Cuenca en lo relativo a mejorar la eficacia en la detección y gestión de las sequías, por medio de la

elaboración de un sistema global de indicadores hidrológicos que permita declarar las posibles situaciones alerta y eventual sequía.

Otra cuestión muy interesante que se incorpora en este Plan, con respecto al inventario de los recursos climáticos e hidrológicos y las sequías a ellos asociadas, es la agregación por cuencas de dichos recursos, dedicándole a cada Demarcación un capítulo en el que se pormenorizan los momentos de déficit y excedente, con mayor detalle del que se ofrecía en el *Libro Blanco del Agua*, efectuándose además comparaciones entre sí (Ver Figura 2.5 y Tabla 2.1).

Esta voluntad de disociar la información por Demarcaciones, emana de la visión que – como se menciona más arriba- introduce la Directiva Marco del Agua, y tiene también el objetivo de poner de manifiesto las notorias diferencias entre cada una de las cuencas que integran el territorio español. Estas disimilitudes justifican que, aunque necesariamente han de existir leyes y documentos de referencia a escala nacional, cada Demarcación deba desarrollar los instrumentos jurídicos para la gestión de la sequía más acordes con sus realidades hidrológicas propias.

FIGURA 2.5: Mapa de precipitaciones espacializadas para todo el territorio español.



FUENTE: Plan Hidrológico Nacional (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2001).

TABLA 2.1: Comparativa de las aportaciones totales anuales medias por Demarcación Hidrográfica.

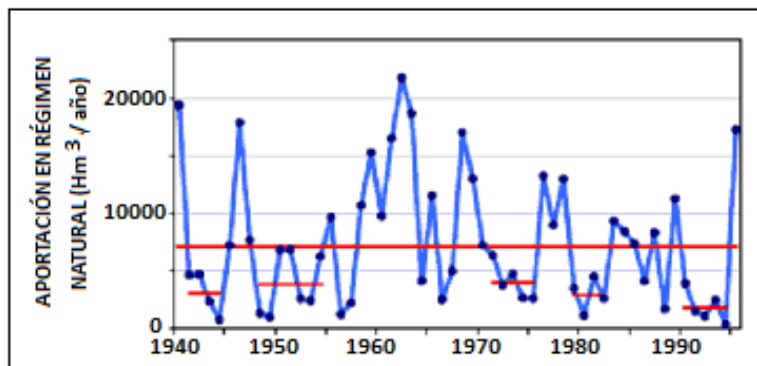
DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA	RECURSOS HÍDRICOS EN RÉGIMEN NATURAL (HM. ³ / AÑO)
Galicia Costa	12.250
Norte	31.907
Ebro	17.967
Duero	13.660
Tajo	10.883
Guadiana	5.475
Guadalquivir	8.601
Sur	2.351
Segura	803
Júcar	3.432
C.I. Cataluña	2.787
Total Península	110.116

FUENTE: *Plan Hidrológico Nacional (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2001).*

En los apartados de este documento dedicados a las Demarcaciones de los ámbitos climáticos mediterráneo y mediterráneo de transición - objeto del presente trabajo- se puntualiza en reiteradas ocasiones que las aportaciones se caracterizan por una notoria irregularidad, como se aprecia en sus series de salidas al mar en régimen natural. Se indica además que esta irregularidad es mucho más marcada en las subcuencas parciales que en el conjunto de la Demarcación, por lo que se abre el camino hacia posibles estudios de mayor detalle espacial, como el que nuestro caso llevamos a cabo.

En cuanto a la cuantificación de las sequías, en este documento, al igual que en el *Libro Blanco*, se identifican las sequías acaecidas en las distintas Demarcaciones mediante un método sencillo pero expresivo: la comparación de las aportaciones anuales en régimen natural (Ver Figura 2.6) con la media de la serie 1940- 1996 y su expresión en porcentajes con respecto a esta.

FIGURA 2.6: Aportaciones naturales anuales en la desembocadura del Guadalquivir.



FUENTE: Plan Hidrológico Nacional (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2001).

Paralelamente a estos dos grandes documentos de referencia, y en gran medida asociados a ellos, existen otras iniciativas y trabajos que parten de los organismos oficiales de gestión de los recursos hídricos a nivel nacional, los cuales estudian en profundidad la problemática de la cuantificación de los estados de déficit.

Un buen ejemplo es el *Sistema de Indicadores del Estado Hidrológico o SIEH*, que inicialmente parte del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, y que persigue la caracterización del estado hidrológico, sintetizando los elementos más importantes del ciclo por medio del tratamiento de variables sobre la cantidad y calidad del recurso hídrico (CEH CEDEX, 2012).

Ciertas variables que se usan en este sistema son las clásicamente utilizadas para la caracterización de sequías, también usadas en el presente trabajo, tales como la precipitación y los caudales registrados en sistemas con régimen hidrológico natural. Otras variables empleadas para elaborar el resto de indicadores son los caudales registrados en cuencas con regímenes alterados, los encharcamientos, las reservas en embalses, los desembalses, los niveles piezométricos, etc., así como otras tantas expresivas de la calidad del agua, si bien todas ellos reflejan cuestiones muy alejadas de los objetivos de este estudio.

La información hidrológica se trata con una frecuencia normalmente mensual mediante índices de estado preconcebidos, similares al utilizado en los Planes Especiales de

Sequía (a detallar más adelante), que representan la situación hidrológica y pretenden el estudio de las situaciones de sequías y las de escasez en tiempo real. Por lo tanto, no atiende a la identificación de secuencias en series históricas, como se acomete en el presente trabajo, pero incorpora un paso fundamental: el de la predicción del riesgo.

Las variables y cálculos que el sistema contempla son esencialmente los que aparecen en la Tabla 2.2, deduciéndose que se presta mucha atención a la variante pluviométrica del estado hidrológico, siendo esta la variable que mayor y más elaborado procesamiento de datos incluye. Existe un apartado detallado dedicado a la sequía en la propia web del SIEH, y en cuyo apartado relativo a la sequía pluviométrica se reflejan los cálculos con el índice de precipitación SPI; en lo relativo a sequía hidrológica, solamente se utilizan los volúmenes totales fluyentes a diferentes escalas temporales y, a lo sumo, la frecuencia de los caudales mínimos, sin introducir ningún índice.

TABLA 2.2: Comparativa de las variables que aparecen en el SEIH y los análisis estadísticos que las acompañan.

VARIABLES/ TRATAMIENTO	PRECIP.	CAUDAL MENSUAL. ENTRADAS EN EMBALSE. SALIDAS DE EMBALSE	RESERVAS DE EMBALSE O INCREMENTOS DE VOL. ALMACENADO	PIEZOMETRÍA. LECTURA DIARIA	NIEVE. VOLUMEN ALMACENADO	CALIDAD DE AGUAS	ESTADOS DE SEQUÍA PLUV.
Cuantil del dato mensual de la serie del mismo mes	SÍ	SÍ	SÍ	NO	NO	NO	NO
Ponderación media areal	SÍ	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Cuantil dato acumulado desde inicio año hidrológico hasta el mes	SÍ	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Ponderación media areal	SÍ	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Cuantil dato acumulado en los últimos 12 meses	SÍ	SÍ	NO	NO	NO	NO	NO
Ponderación media areal	SÍ	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Cuantil dato acumulado en los últimos 3 meses	SÍ	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Ponderación media areal	SÍ	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Evolución medias móviles	NO	NO	NO	SÍ	NO	NO	NO
Gráficos de evolución	NO	NO	NO	NO	NO	SÍ	NO

FUENTE: Página web del CEDEX (CEH CEDEX, 2012).

Otro paquete de indicadores interesante con relación al presente estudio, es el creado junto al Sistema Integrado de Información del Agua (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012c) y el Libro Digital del Agua, al que se le llama *Sistema Global de Indicadores del Agua*, publicados todos ellos a través de la web del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente con objeto de facilitar la consulta de la información del agua (Ver Figura 2.7).

FIGURA 2.7: Gráfico de las variables- factores antrópicos y factores naturales- que aparecen en el SIA.



FUENTE: Página web del S. I. A. (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012b).

Esta recopilación es bastante similar al SIEH y en esencia proviene de un esfuerzo de síntesis de la información más relevante contenida en los datos ambientales y antrópicos recogidos por el Ministerio, siendo además una herramienta de carácter dinámico, pues pretende el seguimiento continuo de los recursos.

Este Sistema surge del interés de que se unifiquen los criterios en los diferentes Organismos de cuenca a la hora de declarar formalmente situaciones de alerta y eventual

sequía, si bien, como se comprobará al analizar los distintos Planes Especiales de Sequía, esto no siempre se consigue y predomina cierta heterogeneidad entre las cuencas.

Formalmente, pese a su riqueza, este Sistema también muestra valores brutos en la mayor parte de los casos, es decir, adolece de insuficiencia de cálculos – anomalías y porcentajes, a lo sumo- que permitan que los valores que se muestren sean por sí mismos reveladores de una circunstancia o una coyuntura de déficit o superávit, dado que en prácticamente todos los indicadores las cuantías mostradas están influidas por la estacionalidad y además no reflejan de ninguna manera las situaciones precedentes en el tiempo. Este hecho implica que los indicadores expuestos no sean del todo eficaces ni fácilmente interpretables.

La información de la que se nutren ambos sistemas de indicadores está vinculada a las bases de datos del Sistema Integrado de Información del Agua (SIA) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, banco del cual también se han extraído los datos reales de caudales históricos a los embalses de cabecera para nuestro trabajo.

Es de destacar otra labor confiada al CEDEX desde la Dirección General del Agua del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, al igual que el SIEH analizado más arriba, consistente en la futura elaboración de un *Catálogo de Sequías históricas en España* (CATSE), que combine la estimación del riesgo y la recuperación de documentación sobre los impactos que se generaron en sequías pasadas (CEH CEDEX, 2012).

Para este propósito se utilizaría la modelización hidrológica ya usada en otros planes y estudios, con las múltiples ventajas e inconvenientes a los que ya se ha hecho referencia.

Resulta muy interesante la afirmación que aparece en la propia página del CEDEX: “*Los criterios básicos y la identificación y caracterización sistemática de sequías en España una vez estén disponibles las series temporales que describen la circulación del agua en el ciclo hidrológico, constituye en sí otro problema técnico no definitivamente resuelto*”, dado que esta realidad es una de las razones fundamentales que sustentan este estudio.

A *escala de cada Demarcación Hidrográfica*, existe una amplia variedad de documentos que enfocan extensamente la temática de los recursos hídricos y la sequía: por un lado están los antiguos *Planes Hidrológicos de Cuenca* en vigor, los *Esquemas Provisionales de Temas Importantes* y otros documentos previos concebidos recientemente para la inminente

actualización de dichos Planes y por otro, más específicos, los *Protocolos de Actuación en Sequía* y los posteriores *Planes Especiales de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía*.

Se ha realizado una comparativa de las cuestiones tratadas en cada uno de dichos documentos, para cada Demarcación Hidrográfica, siempre atendiendo a los aspectos relacionados con este estudio, fundamentalmente: cómo se cuantifican los recursos, cómo se aborda el estudio de la sequía, qué variedades de sequías se evalúan y cómo se trata la sequía hidrológica (Ver Tablas 2.1 y 2.2 del Anexo). La mayor evidencia extraída al respecto es la gran heterogeneidad de las interpretaciones que cada Organismo de Cuenca ha hecho de las directrices establecidas a escala nacional y supranacional y, por consiguiente, de la información incorporada a los mismos, pese a los esfuerzos de unificación. Esto en cierto modo resulta lógico, puesto que no siempre son las mismas cuestiones las que resultan importantes en unas y otras Demarcaciones.

En primer lugar consideraremos los *Planes Hidrológicos de Cuenca* surgidos a finales de los noventa en las diferentes Demarcaciones Hidrográficas del ámbito mediterráneo español.

Normalmente, en estos planes la sequía solamente se enfoca en términos de los impactos que cada secuencia seca causó sobre los cultivos, volúmenes embalsados, etc., y de hecho en ellos se define frecuentemente la sequía como una situación en la que los recursos acumulados no son suficientes para atender a las demandas de la sociedad, mezclando así procesos antrópicos y realidades naturales, de manera imprecisa, e induciendo a mayor confusión con respecto al término.

Sin embargo, en algunos de ellos sí se aborda la problemática más extensa, correcta y profundamente, siendo el caso del *Plan Hidrológico del Ebro* (Confederación Hidrográfica del Ebro, 1996), en el cual -de forma pionera- se incorporó más a fondo el fenómeno de la sequía como riesgo natural fundamental a tener en cuenta y estudiar y no simplemente como un obstáculo en el balance recursos/ demandas; además, se llegó a definir el concepto en términos de anomalías en los recursos hídricos y se establecieron también sus umbrales de aparición.

No obstante, no es habitual que se encuentren en estos primeros Planes Hidrológicos de cuenca reflexiones sobre cuestiones más específicas del fenómeno, tales como los tipos de

sequía, los indicadores que permiten evaluarla cuantitativamente, el seguimiento, etc. En cambio, la razón por la cual estos textos nos resultarán útiles e interesantes será la caracterización de los recursos hídricos a modo de inventario que en ellos se hace, tanto actual como histórica, en algunos casos a partir de documentos y estudios de recursos previos concebidos como base de información para los propios planes. Un ejemplo de este caso es el *Estudio de Recursos Hidráulicos de la Cuenca del Guadalquivir* (Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, 1993).

Estos documentos, al ser anteriores al *Libro Blanco del Agua*, utilizan otras metodologías de cálculo de las aportaciones superficiales y subterráneas diferentes al SIMPA, en ocasiones también a partir de modelos matemáticos informatizados que trabajan con series climáticas. Un buen ejemplo de esta forma de evaluar los recursos naturales es el modelo SACRAMENTO, utilizado en la cuenca del Guadalquivir o en las cuencas Internas de Cataluña.

La ventaja del uso de esta clase de modelos con respecto a la mera utilización de las series medidas en los aforos es la misma que más tarde ofrecería SIMPA, consistente en la posibilidad de evaluar los recursos hidráulicos superficiales en régimen natural en todas las áreas hidrográficas de la cuenca y no solo en las de cabecera (Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, DGOH y MOTPMA, 1995).

La adaptación a la Directiva Marco de Aguas añade a la perspectiva de satisfacción de las demandas un nuevo enfoque que persigue el buen estado ecológico de las masas de agua. La entrada en vigor de dicha ley supone cambios conceptuales y jurídicos por los que ha sido necesario introducir reformas en la legislación de cuenca para cumplir con estas nuevas metas, y es por ello que nacen los *nuevos Planes Hidrológicos de Cuenca* (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012a).

Es importante señalar que en los documentos ligados a estos nuevos Planes Hidrológicos de Cuenca se aprecia una mayor voluntad de unificación en las formas y contenidos, así como una mayor incorporación de los modelos matemáticos de simulación hidrológica a los inventarios de recursos. Acorde con la temática de este trabajo, resultan particularmente interesantes dos variedades de documentos precursores del Plan: los *Estudios Generales de las Demarcaciones*, y los *Esquemas Provisionales de Temas Importantes* de cada cuenca, dado que en ellos se expresa la necesidad de una correcta evaluación de los recursos hídricos y también de la sequía en las cuencas, si bien existen diferencias en la forma de

abordarse dichas materias entre unas y otras Demarcaciones de acuerdo con las distintas problemáticas identificadas en cada una de ellas (Ver Tabla 2.1 del Anexo).

Los Planes Hidrológicos de cuenca necesitan una correcta evaluación previa de los recursos hídricos circulantes para la eficaz valoración de los temas a tratarse en el propio Plan, y es esta necesidad la que ha favorecido el desarrollo tanto de sofisticadas técnicas como de muy detallados y completos estudios.

No sucede así con el fenómeno de la sequía, comprobándose una vez más que es un tema tratado de manera generalmente laxa por estas figuras de planificación, referido escuetamente en función de los efectos de escasez de agua disponible que puede provocar – o que ha provocado históricamente- en la sociedad en la que se manifieste.

No obstante, para superar este vacío en la planificación, la *Ley 10/2001*, de 5 de julio, del *Plan Hidrológico Nacional*, estableció en su artículo 27 el deber de los Organismos de cuenca de elaborar, en los ámbitos de los Planes Hidrológicos de cuenca correspondientes, *Planes Especiales de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía* (P. E. S.), incluyendo las reglas de explotación de los sistemas y las medidas a aplicar en relación con el uso del dominio público hidráulico (CEH CEDEX, 2012). Mientras estos textos fueron elaborados, gran parte de los Organismos de Cuenca promulgaron los *Protocolos de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía*, con carácter provisional, dado que en la etapa en que salieron a la luz, en torno a 2005, se atravesaba un episodio de fuerte sequía y se precisaba una base teórica y técnica con carácter urgente. Es de señalar que esta medida se llevó a cabo debido a que no estaban listos los Planes Especiales en ninguna cuenca intercomunitaria, a pesar de que ya deberían haberse aprobado un par de años atrás, de acuerdo con *la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional o Ley del Plan Hidrológico*.

Por norma general, la estructura de todos estos documentos -Planes y Protocolos- es bastante similar entre sí, pero justamente muestran ciertas disparidades en las cuestiones en las que este trabajo pretende profundizar: no solo en la forma de afrontar la caracterización de los recursos de la cuenca, sino también en la selección y utilización de los indicadores de sequía que se aplicarán sobre ellos, tanto en los históricos como en los de seguimiento del fenómeno en tiempo real, por ello resulta especialmente interesante compararlos todos entre sí (Ver Tabla 2.2 del Anexo).

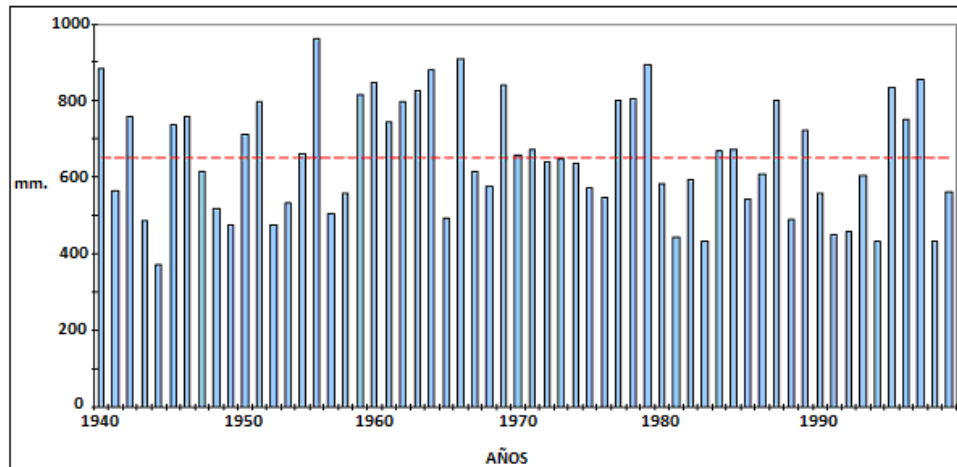
Así, nuevamente se advierten diferencias en la forma de realizar el inventario de recursos circulantes en régimen natural entre los textos sometidos a comparativa, existiendo algunos Planes que simplemente utilizan las series de caudales aforados medidos por el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) correspondientes a puntos donde el régimen hídrico no se halle significativamente alterado. Este es el caso del *P.E.S. de las Islas Baleares* (Govern De Les Illes Ballears, 2009), o del inventario realizado para la caracterización histórica de las sequías hidrológicas en el *P.E.S. del Ebro* (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2007), siendo este último el que inspiró el criterio de selección de las fuentes de datos hidrológicos para la evaluación de la sequía de este trabajo.

Cuando se comprueba que la utilización de estos datos es inviable, en los Planes se ha optado por las otras dos clásicas modalidades de inventariado de los recursos ya mencionadas por el *Libro Blanco del Agua*: la restitución al régimen natural, realizada por ejemplo para la cuenca del Segura, y la modelización hidrológica de las aportaciones. Esta última se erige como una metodología cada vez más popular, si comparamos los Protocolos de Actuación iniciales con los P.E.S.; dentro de los modelos utilizados, el SACRAMENTO y el SIMPA son los más frecuentes.

Por otro lado, en cuanto a los análisis de sequías históricas que se realizan en Planes y Protocolos, resulta interesante observar que en prácticamente todos se utiliza el promedio de la variable a escala anual, sea cual sea esta, como valor expresivo de la situación normal. Acorde con este criterio, en la mayoría de los gráficos utilizados en estos documentos para evidenciar las sequías, se muestra la línea de dicho valor y se establece visualmente qué años están por encima de la media y cuales están por debajo, estableciéndose así una estimación de las etapas secas y húmedas (Ver Figuras 2.8 y 2.9).

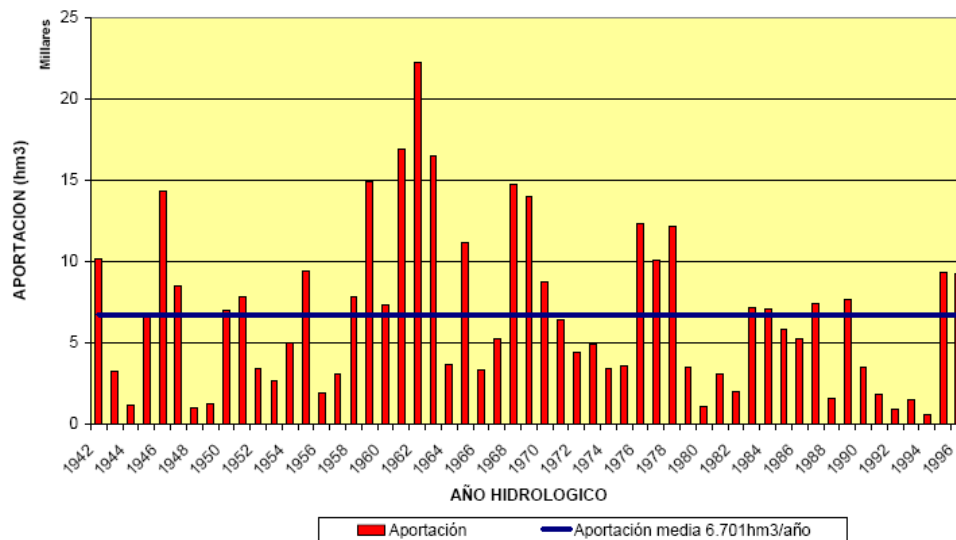
En los propios gráficos puede apreciarse la gran irregularidad de las variables, tanto las precipitaciones, como en las aportaciones, observándose además unos valores positivos muy altos, hecho que desprovee a la media de significación, puesto que se trata de una medida muy sesgada por los valores extremos.

FIGURA 2.8: Precipitaciones totales anuales en la Cuenca Hidrográfica del Tajo 1940- 2000.



FUENTE: P. E. S. de la cuenca hidrográfica del Tajo (Confederación Hidrográfica del Tajo., 2007).

FIGURA 2.9: Aportaciones totales anuales en la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir 1942-1996.



FUENTE: P. E. S. de la cuenca hidrográfica del Guadalquivir (Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, 2007).

Teniendo en cuenta esta determinación, podría interpretarse que cualquier índice basado en esta medida de tendencia central, califica como secos muchos más años de los que

realmente fueron anómalos en este sentido. No obstante, el índice SPI anual (McKee, T. B.; Doesken, N. J. y Kleist, J., 1993), utilizado casi en la totalidad de los P.E.S. para la caracterización de la sequía histórica, palia esta carencia con otras ventajas tales como la sencillez en su cálculo o en su interpretación, percibiéndose mucho mejor la intensidad de un episodio que si se usaran los valores de la variable en bruto para ello.

Este índice usado a escala anual, simplemente consiste en la estandarización de la variable en cuestión utilizando la media y la desviación típica de la serie completa, de manera que cada valor anual queda transformado sencillamente en desviaciones típicas establecidas con respecto a la media de la distribución. De estos valores se deduce su probabilidad de ocurrencia y por tanto –en el caso de los valores negativos- la intensidad de la sequía en cada momento concreto.

De este modo, los valores calculados con la estandarización sí son ahora comparables entre diferentes variables, bien pluviométricas o bien hidrológicas, entre uno o diversos ámbitos geográficos y Planes, siempre y cuando la longitud e intervalo considerados por las series sean los mismos. Lamentablemente, aunque gran parte de los planes cumplen con creces con la longitud adecuada para obtenerse consideraciones estadísticas significativas, en pocos casos coincide que se considere el mismo periodo, con lo cual las comparaciones resultan menos representativas. Esta falta de homogeneización entre los Planes Especiales a la hora de establecer un intervalo temporal estándar de estudio para evaluar los recursos o establecer periodos de sequía es una de las mermas detectadas en la comparativa realizada.

Por otra parte, los estudios de sequía histórica que aparecen en Planes y Protocolos se ciñen al nivel anual de medición. Sin embargo, esto limita ligeramente su eficacia puesto que en la actualidad se tiende a considerar la escala mensual de detalle temporal como óptima para la detección de los periodos secos en una serie, sobre todo en el ámbito mediterráneo. Utilizar los totales anuales puede conducir a enmascarar posibles fenómenos intercalados entre el final de un año y el inicio de otro, o incluso secuencias secas muy intensas que no llegan a trascender de unos pocos meses pero que no conviene pasar por alto (Pita López, M. F., 1995).

No obstante existen algunas excepciones. Por ejemplo, para la identificación de las sequías en el *P.E.S. de la cuenca del Segura* (Confederación Hidrográfica del Segura, 2007b) se basan también en el periodo anual, pero con la particularidad de que una vez detectado el año

seco se desciende a la escala mensual en esas secuencias, y es en esta escala en la que se realizan balances entre existencias, desagües y aportaciones para identificar los peores momentos de escasez (inexactamente denominada “sequía” en el Plan).

Relacionado con esto, consideramos muy importante indicar que no es correcto utilizar la denominación de indicadores de sequía a cálculos sobre variables que realmente están expresando la escasez de agua existente en un determinado sistema de explotación (Pita López, M. F., 2007) –y se incurre en ello en prácticamente todos los P. E. S.- porque no se refieren a valores en régimen natural o seminatural, sino muy influidos por la actividad socioeconómica. Ejemplos de este caso son magnitudes tales como el volumen almacenado en embalses superficiales, cuyos desembalses no tienen necesariamente que ver con situaciones secas o húmedas, o- en mucha menor medida- los niveles piezométricos en acuíferos, sometidos a explotación, cuyos índices derivados son a menudo más indicativos de cambio en la demanda que de situaciones de más o menos disponibilidad natural del agua. Los caudales, si no están medidos en embalses de cabecera, también estarán en mayor o menor medida influidos por el uso humano de los recursos de la cuenca.

En cuanto a los indicadores de seguimiento en tiempo real de la situación hidrológica que utilizan, de nuevo confusamente apelados como indicadores de sequía, se puede afirmar que se trata de una batería de variables muy completa y diferente según la realidad de cada cuenca –dentro incluso de una misma Demarcación Hidrográfica- si bien por ello mismo se percibe una nueva falta de uniformidad en los procedimientos que dificulta las interpretaciones globales.

Para intentar solventar esta deficiencia, y poder obtener un único valor numérico adimensional capaz de cuantificar la situación de cada instante con respecto a la histórica, y también así posibilitar una comparación entre los distintos indicadores seleccionados, se ha consensuado a nivel nacional una fórmula, desarrollada por la Oficina de Planificación de la Confederación Hidrográfica del Júcar (de acuerdo con las citas que aparecen en todos los P.E.S.), en la que se define el índice de estado (I. e.) cuyos valores están comprendidos entre 0 (mínimo valor histórico) y 1 (máximo valor histórico).

El índice tiene la siguiente formulación:

$$- \quad \text{Si } V_i \geq V_{\text{med}} \rightarrow I_e = 0,5 [1 + (V_i - V_{\text{med}} / V_{\text{max}} - V_{\text{med}})] \quad (\text{Fórmula 2.1})$$

$$- \quad \text{Si } V_i < V_{\text{med}} \rightarrow I_e = 0,5 [V_i - V_{\text{min}} / V_{\text{med}} - V_{\text{min}}] \quad (\text{Fórmula 2.2})$$

donde:

V_i = Valor medio de la variable en el mes/ año de seguimiento.

V_{med} = Valor medio en el periodo histórico.

V_{max} = Valor máximo en el periodo histórico.

V_{min} = Valor mínimo en el periodo histórico.

Su formulación es sencilla y los resultados son fácilmente interpretables, con la ventaja adicional de que introduce los rangos inferior y superior al promedio en el cálculo, corrigiendo razonablemente el efecto de distorsión que los valores extremos introducen en la media, hecho que suele ponerla en duda como una medida de tendencia central útil para las variables hidrológicas en el ámbito mediterráneo y que cuestiona la viabilidad de los índices -como el SPI- que en ella se basan. Se trata de un indicador que en general se usa para elaborar informes a escalas anuales, nivel temporal en el cual aporta resultados bastante representativos, si bien se puede reformular de manera sencilla para la escala mensual, tomando como promedios y extremos los correspondientes al mes en concreto.

Cada Demarcación establece sus propios umbrales, siempre clasificando en cuatro niveles correspondientes a cuatro intervalos de valores del índice de estado. El más bajo corresponde a una situación de emergencia, establecida normalmente por debajo del I. e.= 0,2, mientras que los dos umbrales consecutivos indican respectivamente estados de alerta y pre-alerta, los cuales terminan con el valor I. e. = 0,5, expresivo del promedio de la serie. Solo a los momentos en los que supere este valor, y a la media, se los considera estado de normalidad hidrológica. A cada nivel posteriormente se le asignan medidas específicas a llevar a cabo por parte del Organismo de Cuenca.

En relación con todo lo explicado, se percibe que los P. E. S. no cubren eficazmente la perspectiva preventiva y tienden a ordenar y a prestar más interés en las situaciones de sequía una vez están implantadas (Paneque Salgado, P., 2012), con prioridad con respecto a gestionar las situaciones de normalidad y anticiparse al riesgo.

A lo largo de la revisión tanto de la bibliografía básica, como de los principales documentos ofrecidos por los Organismos de Cuenca y entidades medioambientales de mayor relevancia, se ha puesto de manifiesto que la modalidad hidrológica de la sequía aún recibe un menor interés que otras variantes del fenómeno, pero la tendencia más reciente apunta hacia el perfeccionamiento de los índices y los métodos para abordarla. Esta nueva situación deriva de la comprensión, tanto por parte de la comunidad científica como de los organismos de gestión, de que la variedad pluviométrica de la sequía es la que dispara el déficit hídrico y puede entenderse como precursora del resto, pero sin duda el estudio de la variante hidrológica proporciona una visión más cercana al recurso disponible y a la virtual escasez de agua.

Capítulo 3

Caracterización de las cuencas hidrológicas de estudio

3.1. ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO.

Para controlar la producción de aportaciones a partir de un determinado volumen de precipitación es necesario profundizar en las características de la cuenca en la que se circunscriban.

Los objetivos de este trabajo no requieren una descripción profunda y detallada tal y como sería necesario establecer, por ejemplo, para implementar un modelo de escorrentía, sino más bien unas nociones fundamentales y precisas que por sí solas permitan explicar gran parte de las singularidades que se reflejen en el comportamiento de las aportaciones, bien sea en las series de datos brutos o en los índices de sequía calculados. A tenor de esta reflexión, hemos decidido ceñirnos a determinar *el área, los parámetros asociados al relieve, las medidas de forma, de drenaje, de usos del suelo* de las cuencas y los *rasgos hidrogeológicos básicos* de las mismas.

Primero se detallará en qué consisten las magnitudes y parámetros considerados para las 29 cuencas de estudio. En la primera parte del Anexo que acompaña a este documento, se incorporan fichas individuales en las que se pormenorizan todos estos rasgos para cada una de las cuencas.

- *Superficie.*

Es la magnitud que más ha de tenerse en cuenta en tanto que condiciona el volumen de agua que recibe la propia cuenca a partir de la precipitación. Su cálculo lo realiza el

programa SIG ARC GIS 10 directamente a partir del *shapefile* que contiene digitalizadas las divisorias de las cuencas que drenan hacia los embalses seleccionados. Este archivo se obtiene de la página web de descargas del Sistema Integrado del Agua (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012c), dependiente del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Los resultados de los cálculos aparecen plasmados en la Tabla 3.1.

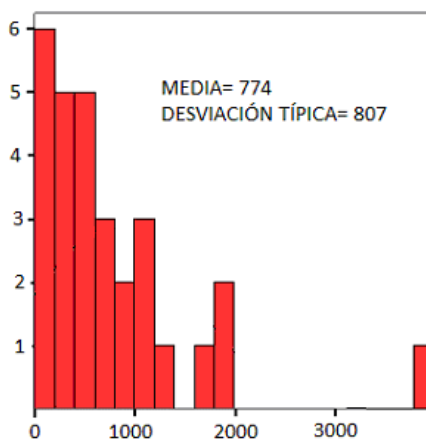
TABLA 3.1: Área en Km.² de las cuencas seleccionadas.

NOMBRE	AREA (KM. ²)
ALFONSO XIII	838,59
ALLOZ	141,02
ARLANZON	104,71
BARRIOS DE LUNA	492,18
BERMEJALES	290,07
BURGOMILLODO	806,96
CAMPORREDONDO	230,34
CERVERA RUESGA	53,91
CUBILLAS	633,12
CUERDA DEL POZO	545,34
EBRO	463,18
EL BURGUILLO	1.064,61
EL PINTADO	1.119,60
EL VADO	378,01
ENTREPEÑAS	3.983,31
FUENSANTA	1.207,38
GABRIEL Y GALAN	1.848,24
GASSET	170,30
GUADALMELLATO	1.190,70
LA CIERVA	169,61
LA PEÑA	1.717,12
LA TOBA	365,96
LINARES DEL ARROYO	758,18
PALMACES	272,94
RIUDECANYES	28,98
SANTA TERESA	1.848,55
TALAVE	754,19
TORRE DEL AGUILA	441,48
TRANCO DE BEAS	525,11

FUENTE: *Elaboración propia.*

Como se desprende de la tabla, existe muy poca similitud en lo referente al tamaño de las cuencas de cabecera utilizadas, lo cual ha de proporcionar una visión mucho más amplia de lo que realmente sucede en el comportamiento de la sequía hidrológica. Así, si se observa el gráfico de la superficie total de las cuencas- mostrado en la Figura 3.1- se aprecia la gran variabilidad que reflejan los 29 totales.

FIGURA 3.1: Tamaño de las 29 cuencas en Km².



*El eje vertical indica la frecuencia del intervalo.
FUENTE: Elaboración propia.

Por otra parte, la cuenca de Entrepeñas, en la Confederación Hidrográfica del Tajo, constituye un dato extraordinariamente alejado del resto, con casi 4000 Km.² de superficie, y será de mucha ayuda a la hora de evaluar si esta variable tiene una incidencia especial en la respuesta hidrológica a la sequía pluviométrica, al igual que las cuencas más pequeñas- Cervera Ruesga y Riudecanyes fundamentalmente, al no alcanzar siquiera los 100 Km.²- actuarán en el sentido inverso.

- *Forma de la cuenca.*

Está comprobado que esta característica condiciona fuertemente la respuesta hidrológica a la precipitación, si bien suele asociarse al corto plazo, a escala temporal del evento, por lo que resulta de interés comprobar si la respuesta ante un episodio de sequía puede en alguna medida depender de esta magnitud (Ver Tabla 3.2). Se ha utilizado para la

definición de la forma de las cuencas el mismo enfoque que en Ibisate, 2004 y en Docampo *et al.*, 1989.

Si bien el *perímetro* es una medida que no indica nada por si sola, sirve para el cálculo de muchos de los parámetros de forma de la cuenca, sobre todo, porque su relación con el área da una medida directa de la circularidad de la misma, ya que, a igual perímetro, aquella cuenca de mayor área será la más circular y por ello la más torrencial en sus caudales (Convenio Cortolima, 2006). El perímetro también sirve en los cálculos sobre la compacidad (regularidad) del contorno dibujado por las divisorias, otra medida de forma que también influye marcadamente en la escorrentía.

Para la primera de las consideraciones, la circularidad, se suele utilizar el *Factor de Forma*, que se calcula dividiendo el cuadrado de la longitud de la cuenca medida desde la desembocadura hasta el punto más alejado de la divisoria, entre su área. Valores próximos al 1 reflejan cuencas muy redondeadas en las que, como se ha señalado, la escorrentía es más repentina y concentrada, mientras que valores mayores corresponden a cuencas alargadas, que tienen mayor capacidad para escalonar las aportaciones.

Otro parámetro a medir es el *Índice de Alargamiento*, que relaciona la longitud máxima computada entre los dos puntos de la divisoria de la cuenca más distantes (eje mayor) con el ancho máximo medido perpendicularmente a la dimensión anterior (eje menor). Índices de Alargamiento superiores indican generalmente que la cuenca tendrá un sistema de drenaje muy evolucionado y en forma de espiga, capaz de distribuir mejor la escorrentía.

La compacidad, por su parte, también influye en la regularidad de la respuesta de la escorrentía. Suele medirse con el coeficiente *de Gravelius*, que pone en relación el perímetro de la cuenca con el que tendría un círculo que poseyera la misma área que ésta. Su cálculo, más complejo que los anteriores, tiene la siguiente expresión:

$$\text{Coeficiente de Gravelius} = \frac{0,282 \times \text{Perímetro de la cuenca}}{\sqrt{\text{Área de la cuenca}}} \quad (\text{Fórmula 3.1})$$

y será tanto mayor cuanto más irregular sea el contorno dibujado por las divisorias de la cuenca, y más próximo a 1 en caso contrario. Cuanto menor es Gravelius, mayor la compacidad y la torrencialidad de la cuenca.

También puede utilizarse otra proporción similar para captar los matices de la compacidad: la *Razón Circular de Miller*, que es la proporción entre el área de la cuenca y el de un círculo que tendría el mismo perímetro que la misma. Valores próximos a 1 indicarían una gran compacidad.

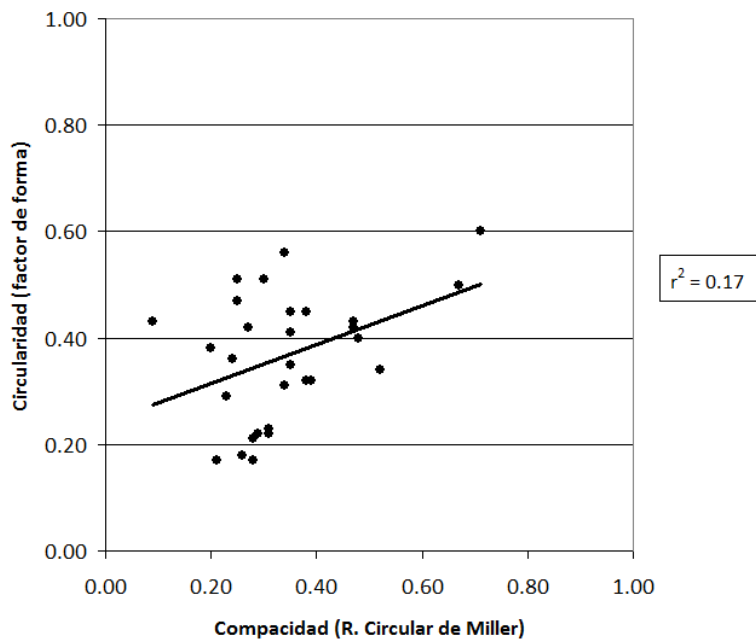
Su formulación es:

$$\text{Razón circular de Miller} = \frac{\text{Área de la cuenca}}{0,0796 \times (\text{Perímetro de la cuenca})^2} \quad (\text{Fórmula 3.2})$$

En este estudio se calcularán ambas medidas de compacidad para cada cuenca, pero se tendrá en cuenta que una y otra proporción están matemáticamente relacionadas de manera potencial e inversa.

Centrando la atención en las columnas relativas a la forma, podemos observar que todas las situaciones posibles están bien representadas por los casos de estudio, existiendo multitud de combinaciones: cuencas circulares y compactas, cuencas ni circulares ni compactas y cuencas que presentan solo una de las características (Ver Figura 3.2).

FIGURA 3.2: Diagrama de dispersión de la compacidad y la circularidad de las cuencas mostrando que existe poca correlación entre ambos parámetros.



FUENTE: *Elaboración propia.*

TABLA 3.2: Parámetros de forma de las cuencas de estudio.

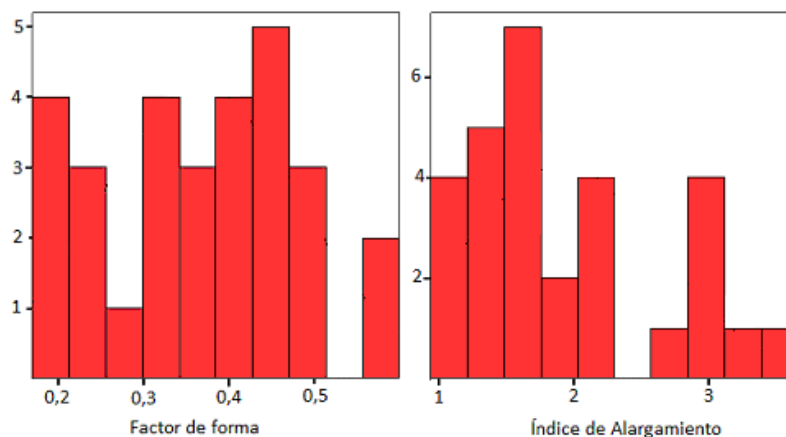
NOMBRE	PERÍMETRO (KM.)	EJE MAYOR (KM.)	EJE MENOR (KM.)	FACT. DE FORMA	ÍNDICE ALARGAMIENTO	COEF. GRAVELIUS	RZ. CIRCULAR MILLER
ALFONSO XIII	224,00	70,10	23,30	0,17	3,01	2,18	0,21
ALLOZ	61,00	18,70	12,50	0,40	1,50	1,44	0,48
ARLANZON	59,00	15,30	9,10	0,45	1,68	1,62	0,38
BARRIOS DE LUNA	175,00	36,20	21,00	0,38	1,72	2,23	0,20
BERMEJALES	72,00	22,00	20,00	0,60	1,10	1,19	0,71
BURGOMILLODO	203,00	41,30	27,00	0,47	1,53	2,01	0,25
CAMPORREDONDO	92,00	20,30	18,10	0,56	1,12	1,71	0,34
CERVERA RUESGA	44,00	11,50	7,10	0,41	1,62	1,69	0,35
CUBILLAS	130,00	39,00	28,30	0,42	1,38	1,45	0,47
CUERDA DEL POZO	151,00	32,70	26,70	0,51	1,22	1,82	0,30
EBRO	137,00	46,30	16,00	0,22	2,89	1,80	0,31
EL BURGUILLO	213,00	69,60	24,30	0,22	2,86	1,85	0,29
EL PINTADO	165,00	57,30	26,00	0,34	2,20	1,39	0,52
EL VADO	84,00	27,40	29,20	0,50	1	1,22	0,67
ENTREPEÑAS	466,00	117,00	54,20	0,29	2,16	2,08	0,23
FUENSANTA	220,00	72,50	24,50	0,23	2,96	1,79	0,31
GABRIEL Y GALAN	262,00	77,30	37,40	0,31	2,07	1,72	0,34
GASSET	74,00	23,10	13,00	0,32	1,78	1,61	0,39
GUADALMELLATO	178,00	52,50	34,70	0,43	1,51	1,45	0,47
LA CIERVA	91,00	31,00	11,00	0,18	2,82	1,98	0,26
LA PEÑA	281,00	68,00	64,00	0,42	1,06	1,91	0,27
LA TOBA	115,00	28,50	21,30	0,45	1,34	1,70	0,35
L. DEL ARROYO	198,00	45,70	25,00	0,36	1,83	2,02	0,24
PALMACES	95,00	29,30	14,20	0,32	2,06	1,63	0,38
RIUDECANYES	30,00	8,20	5,80	0,43	1,41	3,33	0,09
SANTA TERESA	305,00	60,40	48,50	0,51	1,25	2,00	0,25
TALAVE	183,00	60,00	16,40	0,21	3,66	1,88	0,28
TORRE DEL AGUILA	125,00	35,70	24,00	0,35	1,49	1,68	0,35
TRANCO DE BEAS	155,00	55,90	17,50	0,17	3,19	1,89	0,28

FUENTE: Elaboración propia

Teniendo en cuenta además que a ambas características, circularidad y compacidad, se les atribuye una relación similar con las diferencias en la velocidad en la evacuación y en la distribución del flujo en la cuenca, la existencia de estas múltiples posibilidades puede por un lado dificultar la interpretación final de las causas que fomentan un tipo de respuesta hidrológica en concreto, pero por otra parte también demuestra que no es suficiente con medir solamente uno de los dos rasgos morfométricos porque podría perderse gran parte de la información, al no estar estrechamente vinculados.

Abordando cada uno de ellos por separado, podemos ver en primer lugar que los distintos grados de circularidad están muy bien representados por los 29 casos utilizados y existen ejemplos de todo tipo de cuencas, desde las que registran una longitud más de dos veces superior a su anchura (Índices de Alargamiento superiores a 2) y en las que se espera el desarrollo de un drenaje en espiga, moderado y poco torrencial, tales como Ebro, Alfonso XIII o La Cierva; hasta las que registran formas prácticamente redondeadas y valores del Índice de Alargamiento muy bajo (y por lo tanto muy elevado el Factor de Forma), como Camporredondo, Bermejales o El Vado; pasando de manera prácticamente uniforme por todos los valores intermedios (Ver Figura 3.3).

FIGURA 3.3: Forma y circularidad de las 29 cuencas.

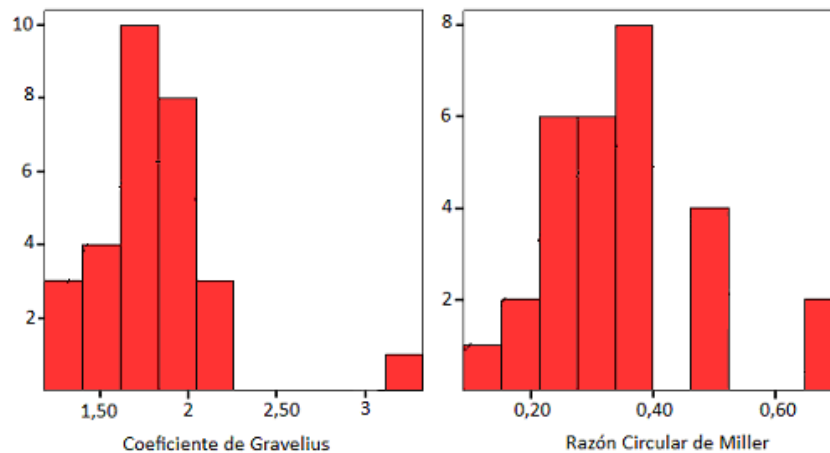


** Valores elevados del Índice de Alargamiento y reducidos del Factor de Forma indican cuencas oblongas y viceversa.
El eje vertical indica frecuencias del intervalo.
FUENTE: Elaboración propia.*

Se espera que, gracias al hecho de que esta característica esté representada en prácticamente todas sus expresiones posibles, sea factible comprobar si introduce algún efecto interesante, al igual que la compacidad.

Efectivamente esta segunda característica también se encuentra cubierta en todo su rango por las 29 cuencas de estudio, si bien no tan gradual y homogéneamente como la circularidad (Ver Figura 3.4).

FIGURA 3.4: Compacidad de las 29 cuencas.



** Valores elevados de la R. C. De Miller y bajos del C. De Gravelius indican una elevada compacidad y torrencialidad.
El eje vertical indica frecuencias del intervalo.
FUENTE: Elaboración propia.*

Mientras que los valores intermedios se encuentran ampliamente cubiertos, solo encontramos tres datos de compacidad muy extremos. Por exceso aparecen la cuenca de Bermejales y la de El Vado, en las que se espera una descarga inmediata del flujo de agua, pudiendo tener repercusión en la escorrentía de la cuenca a largo plazo, de ahí que valga la pena ver si estos dos casos destacan en adelante. Asimismo, por defecto sobresale la cuenca de Riudecanyes, a la que necesariamente se le atribuye una escorrentía más gradual y regulada de la que le correspondería, por ejemplo, por su reducido tamaño o por la inexistencia en dicha cuenca de una Unidad Hidrogeológica definida.

Por último, es importante señalar que no se ha identificado un patrón geográfico en concreto para ninguno de los parámetros relativos a la forma de las cuencas más allá del hecho de que estas tiendan a ser algo más alargadas en las cuencas del Prebético, tales como Tranco de Beas, Alfonso XIII y Talave. Esto se debe al relieve Jurásico de las Prebéticas, de abigarrados pliegues cuyos ejes dominantes tienen una dirección ENE – WSW (Universidad Politécnica de Valencia, 200?) y que condicionan que las cuencas fluviales se hayan excavado en su mayoría siguiendo esta dirección y configurándose de forma bastante oblonga.

- *Orografía.*

Se trata de otra de las cuestiones que más directamente afectan a la escurritía, tanto por medio de la distribución de las alturas en la cuenca, como sobre todo a través del grado de pendiente que ésta tenga, condicionando la velocidad del flujo y la propia respuesta a la precipitación (Ver Tabla 3.3).

Las *pendientes* se calculan fácilmente con ayuda de un SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) a partir del Modelo Digital de Elevaciones, siendo lo más acertado calcular posteriormente un promedio de las mismas en cada cuenca, así como de las de sus cauces.

Por otro lado, el factor orográfico es responsable directo de la presencia de nieves en la superficie de las cuencas y como esta variable influye mucho en la distribución del régimen de aportaciones, se la ha incluido en la caracterización física de las cuencas. Por supuesto, existen muchas formas más precisas de analizar el volumen de aportación nival que participa en el sistema hidrológico, pero por cuestiones de eficacia se restringirá el estudio al simple cálculo de las *ratios de superficie nevada en las cuencas* seleccionadas, computándolas a partir del *shapefile* poligonal de cuencas nivales obtenido también de la página web de descargas del Sistema Integrado del Agua (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012c). En el caso de percibirse una importante relación entre la presencia de nieves en las cuencas y el comportamiento de la sequía hidrológica en estas, el análisis se puede profundizar incluyendo un método de evaluación del volumen de nieves más detallado.

TABLA 3.3: Parámetros orográficos de las cuencas de estudio.

NOMBRE	MÁXIMA COTA DE ALTITUD (M.)	MÍNIMA COTA DE ALTITUD (M.)	DESNIVEL MÁXIMO DE LA CUENCA (M.)	ALTITUD PROMEDIO (M.)	PENDIENTE PROMEDIO (%)	% DE LA SUPERFICIE DE LA CUENCA QUE PERTENECE A UNA CUENCA NIVAL REGISTRADA EN EL S.I.A.
ALFONSO XIII	1.847	267	1.580	832,12	4,51	0
ALLOZ	1.197	406	791	759,75	7,50	0
ARLANZON	1.975	1123	852	1.463,88	10,11	0
BARRIOS DE LUNA	2.128	1055	1.073	1.479,08	11,67	100
BERMEJALES	1.821	795	1.026	1.156,40	8,74	0
BURGOMILLODO	2.119	942	1.177	1.109,26	4,02	0
CAMPORREDONDO	2.351	1270	1.081	1.637,28	12,95	100
CERVERA RUESGA	1.870	1016	854	1.300,24	10,01	100
CUBILLAS	1.949	630	1.319	1.041,15	8,06	0
CUERDA DEL POZO	2.054	1053	1.001	1.286,65	6,89	0
EBRO	2.006	830	1.176	1.045,62	7,00	100
EL BURGUILLO	2.120	652	1.468	1.264,40	10,26	1
EL PINTADO	900	294	606	548,82	4,38	0
EL VADO	2.119	909	1.210	1.362,20	9,99	100
ENTREPEÑAS	1.820	647	1.173	1.211,58	4,29	4
FUENSANTA	1.977	582	1.395	1.268,13	10,16	0
GABRIEL Y GALAN	2.373	359	2.014	813,87	8,03	100
GASSET	994	600	394	716,73	4,21	0
GUADALMELLATO	906	132	774	589,64	4,55	0
LA CIERVA	1.425	386	1.039	734,98	6,28	0
LA PEÑA	2.825	519	2.306	1.192,99	12,02	36
LA TOBA	1.788	1159	629	1.474,84	7,07	0
LINARES DEL ARROYO	1.903	904	999	1.112,03	3,47	0
PALMACES	1.363	878	485	1.086,35	4,26	0
RIUDECANYES	549	227	322	362,75	7,83	0
SANTA TERESA	2.421	870	1.551	1.335,62	8,98	100
TALAVE	1.699	476	1.223	1.041,00	7,59	0
TORRE DEL AGUILA	522	35	487	150,26	3,22	0
TRANCO DE BEAS	2.067	579	1.488	1.198,49	14,90	0

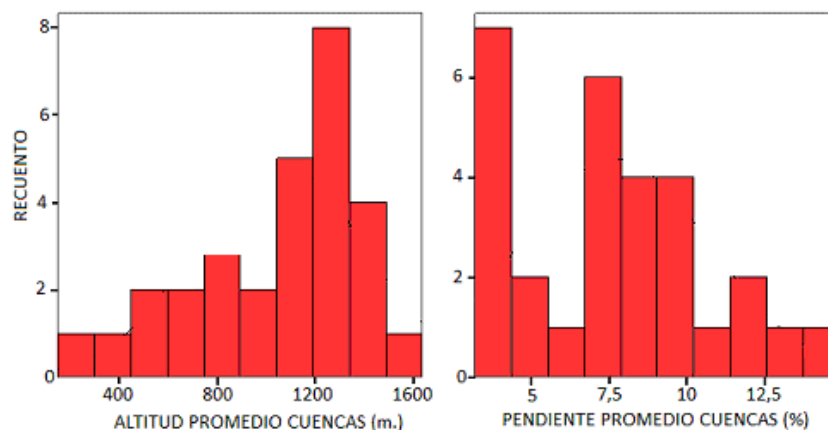
FUENTE: *Elaboración propia.*

De la observación de la tabla se desprende que de nuevo las cuencas de estudio reflejan multitud de realidades diferentes. Existe una gran variedad en los valores tanto de altitudes como de pendientes medias en las cuencas.

Curiosamente en las altitudes hay una serie de cuencas muy llanas y bajas que arrastran la media hacia un valor (1.050 metros) muy por debajo de la mediana, y en cambio un tercio de las cuencas se concentra en el intervalo entre 1.200 y 1.400 metros (Ver Figura 3.5); el resto de intervalos engloban menos casos y más uniformemente distribuidos, lo cual garantiza cubrir eficazmente todo el rango altimétrico de la Península, a excepción de sus extremos.

En las pendientes se distinguen máximas frecuencias en los valores bajos y en los medios y menores casos que representen a las cuencas de fuerte pendiente, si bien una vez más se cubre pertinentemente todos el rango de valores de la variable en la Península, dado que la cuenca de Tranco de Beas y la cabecera pirenaica de La Peña son dos de las áreas más escarpadas de la geografía española.

FIGURA 3.5: 29 valores de altitud y pendiente promedio.



FUENTE: *Elaboración propia.*

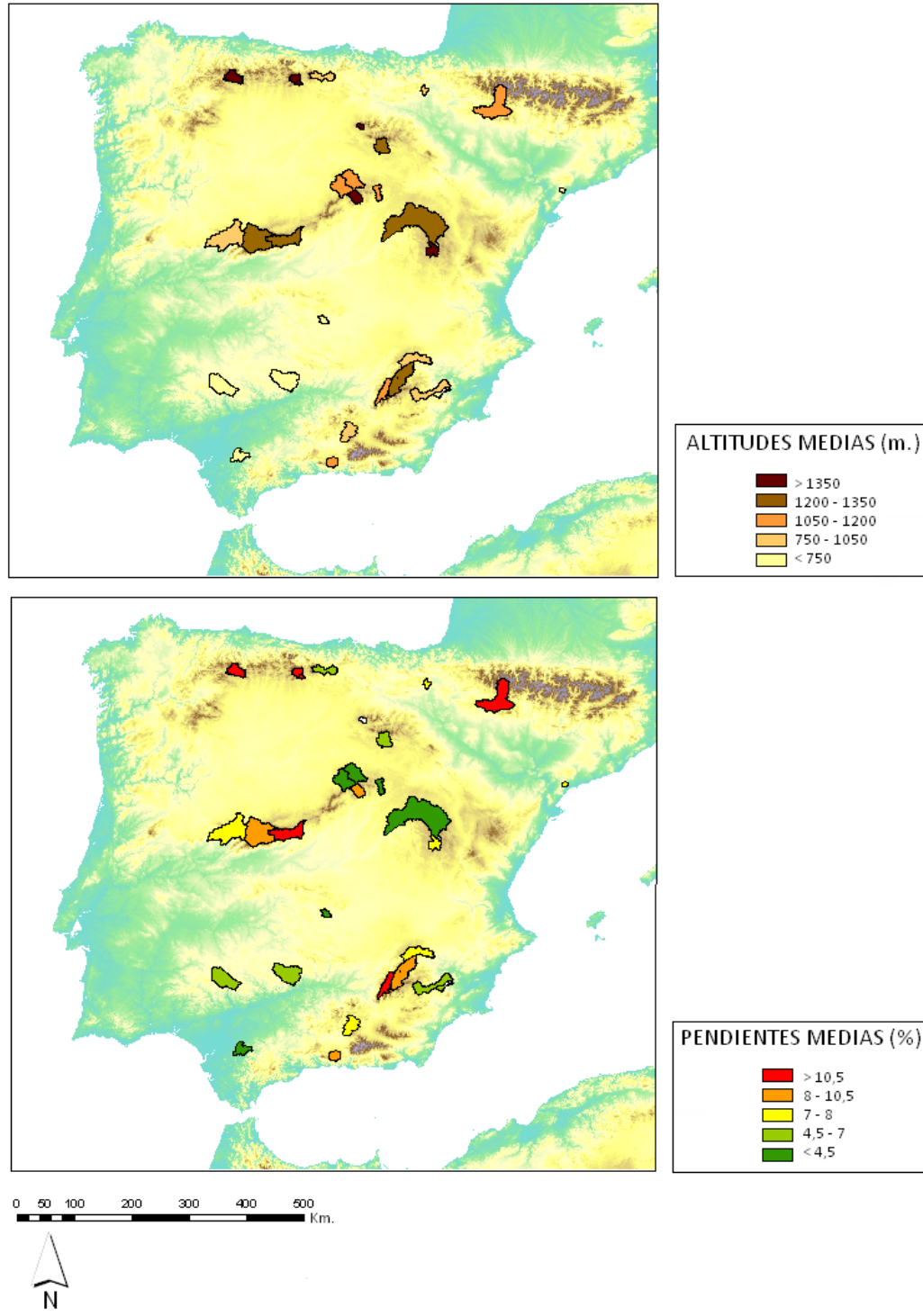
Además, no solo los valores promedio por cuenca son variados, sino que la distribución de las altitudes mostrada a partir de las curvas hipsométricas también lo es, de manera que a lo largo del trabajo posiblemente se reconozcan multitud de respuestas asociadas a la gran variedad orográfica de las cuencas de estudio.

Como es lógico, estas variables tienen una fuerte componente geográfica y como tal siguen un patrón espacial concreto condicionado por los accidentes geográficos en los que

cada cuenca se inserte y por tanto las cuencas adyacentes o próximas tienden a compartir valores similares de pendiente y altitud media (Ver Figura 3.6). Las mayores altitudes y pendientes encontradas corresponden a cuencas nivales en su totalidad y se encuentran en los casos de estudio de la Cordillera Cantábrica y Pirineos; los menores valores por su parte se localizan en las cuencas pertenecientes al tramo bajo y medio del Guadalquivir, el Segura, el Guadiana y también en Riudecanyes.

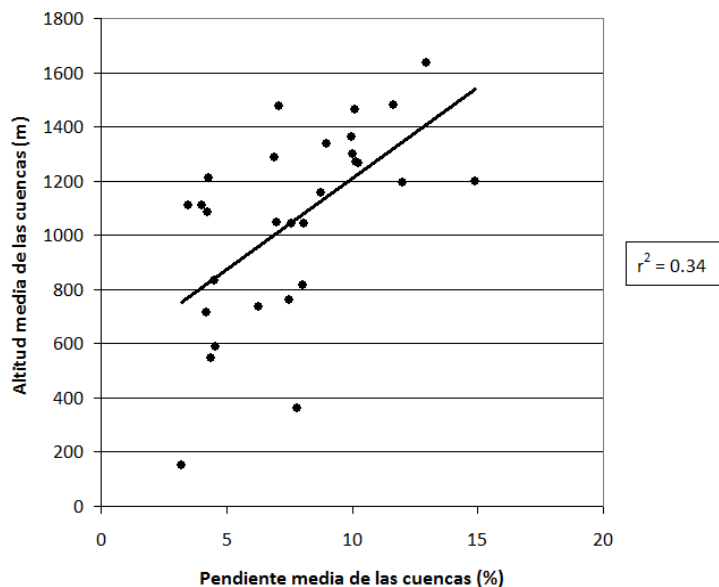
Cabe añadir que estas variables y todas las que tienen relación con la orografía se encuentran vinculadas estadísticamente, si bien no es una relación tan estrecha como *a priori* puede parecer y es importante medirlas y considerarlas por separado en la medida de lo posible. Por seguir con el ejemplo de estas dos variables en concreto por ser las más ilustrativas, de la sola observación del diagrama de dispersión que las relaciona (Ver Figura 3.7) se evidencia que la correlación no es total y que incluso cuencas de poca altitud pueden registrar una pendiente moderada o alta y, lo que es más frecuente, que puede haber cuencas elevadas que no sean excesivamente abruptas (como por ejemplo Entrepeñas).

FIGURA 3.6: Mapa de las altitudes (msnm.) y pendientes (%) medias en las 29 cuencas de estudio utilizadas.



* Simbología de gradación de color por quintiles.
FUENTE: Elaboración propia.

FIGURA 3.7: Diagrama de dispersión de las altitudes y pendientes en las cuencas.



FUENTE: Elaboración propia.

- *Red de drenaje.*

En este punto se señalarán no solo la *longitud* y la *pendiente* de los cauces que componen la red hidrográfica de cada cuenca, sino también la proporción que suponen con respecto al área total de la misma, para cuantificar lo mejor o peor drenada que se encuentra. Una mayor *densidad de drenaje* implica por lo general mayor efectividad de la lluvia para formar escorrentía: menores tiempos de acumulación, caudales punta más acusados y velocidades de flujo mayores, puesto que la arroyada no encauzada encuentra una mayor resistencia a fluir que el agua que sí circula por un cauce. En un contexto temporal más amplio, es muy frecuente que un mayor drenaje relativo implique una infiltración menos acusada y que por ello la recarga acuífera sea sensiblemente menor, condicionando que de forma global el ciclo de las aportaciones sea menos regular y más dependiente del comportamiento de la pluviometría.

El último parámetro medido con respecto al drenaje es el *tiempo de concentración*, siendo éste la estimación del tiempo que tardaría una gota de agua desde la parte más alta del cauce hasta la desembocadura en el embalse. Su formulación es:

$$\text{Tiempo de concentración} = \left[\frac{0.87 \times \text{Longitud del cauce}^3}{\text{Desnivel en metros}} \right]^{0,385} \quad (\text{Fórmula 3.3})$$

Para todas estas consideraciones y cálculos se han usado los *shapefiles* de los cauces cartografiados a escala 1: 25.000, aportados también por el S. I. A. (Ver Tabla 3.4).

TABLA 3.4: Parámetros referentes al drenaje en las cuencas.

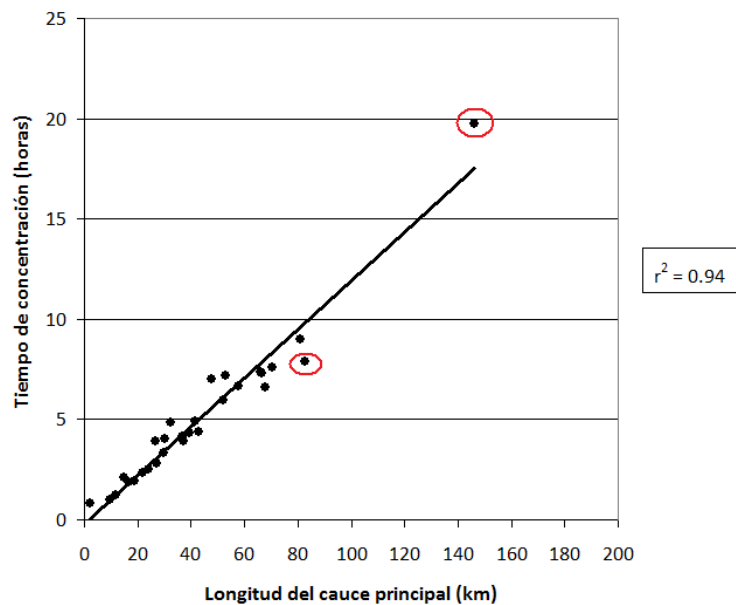
NOMBRE	LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (KM.)	MÁXIMA ALTITUD DEL RÍO (M.)	DESNIVEL TOTAL DEL CAUCE (M.)	PENDIENTE PROMEDIO DEL RÍO (%)	DENSIDAD DEL DRENAJE	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (HORAS)
ALFONSO XIII	70,60	1.112	845	1,20	0,08	7,60
ALLOZ	16,50	1.084	678	4,11	0,12	1,85
ARLANZON	11,70	1.376	253	2,16	0,11	1,21
BARRIOS DE LUNA	36,70	1.486	431	1,17	0,07	4,14
BERMEJALES	18,80	1.200	405	2,15	0,06	1,95
BURGOMILLODO	39,30	1.300	358	0,91	0,05	4,33
CAMPORREDONDO	24,10	1.766	496	2,06	0,10	2,54
CERVERA RUESGA	9,80	1.268	252	2,57	0,18	0,98
CUBILLAS	37,40	1.060	430	1,15	0,06	3,91
CUERDA DEL POZO	29,80	1.622	569	1,91	0,05	3,34
EBRO	52,00	1.594	764	1,47	0,11	5,98
EL BURGUILLO	66,70	1.570	918	1,38	0,06	7,32
EL PINTADO	47,90	652	358	0,75	0,04	7,02
EL VADO	27,10	1.470	561	2,07	0,07	2,79
ENTREPEÑAS	146,30	1.602	955	0,65	0,04	19,76
FUENSANTA	65,90	1.690	1.108	1,68	0,05	7,36
GABRIEL Y GALAN	67,90	961	602	0,89	0,04	6,61
GASSET	14,80	630	30	0,20	0,09	2,13
GUADALMELLATO	53,00	600	468	0,88	0,04	7,18
LA CIERVA	22,10	724	338	1,53	0,13	2,33
LA PEÑA	82,50	2.300	1.781	2,16	0,05	7,86
LA TOBA	30,00	1.657	498	1,66	0,08	4,03
LINARES DEL ARROYO	41,60	1.370	466	1,12	0,05	4,92
PALMACES	26,70	1.090	212	0,79	0,10	3,89
RIUDECANYES	2,00	280	53	2,65	0,07	0,81
SANTA TERESA	81,00	1.650	780	0,96	0,04	8,97
TALAVE	57,70	1.006	530	0,92	0,08	6,64
TORRE DEL AGUILA	32,20	200	165	0,51	0,07	4,83
TRANCO DE BEAS	42,80	1.300	721	1,68	0,08	4,36

FUENTE: *Elaboración propia.*

Analicemos en primer lugar de manera conjunta tanto la longitud del cauce como el tiempo de concentración de las cuencas, ya que como se ha indicado más arriba son dos parámetros matemáticamente conectados. La relación entre ambas magnitudes solamente

está levemente mediada por el desnivel que el curso fluvial salva desde su cabecera hasta su desembocadura en el embalse, pero entre los 29 casos de estudio este último parámetro resulta ser bastante proporcional a la propia longitud del cauce, por lo que el tiempo de concentración del flujo no aporta mucha más información de la que de por sí introduce la longitud del cauce principal (Ver Figura 3.8).

FIGURA 3.8: Diagrama de dispersión de la longitud de cauce y el tiempo de concentración en las cuencas.



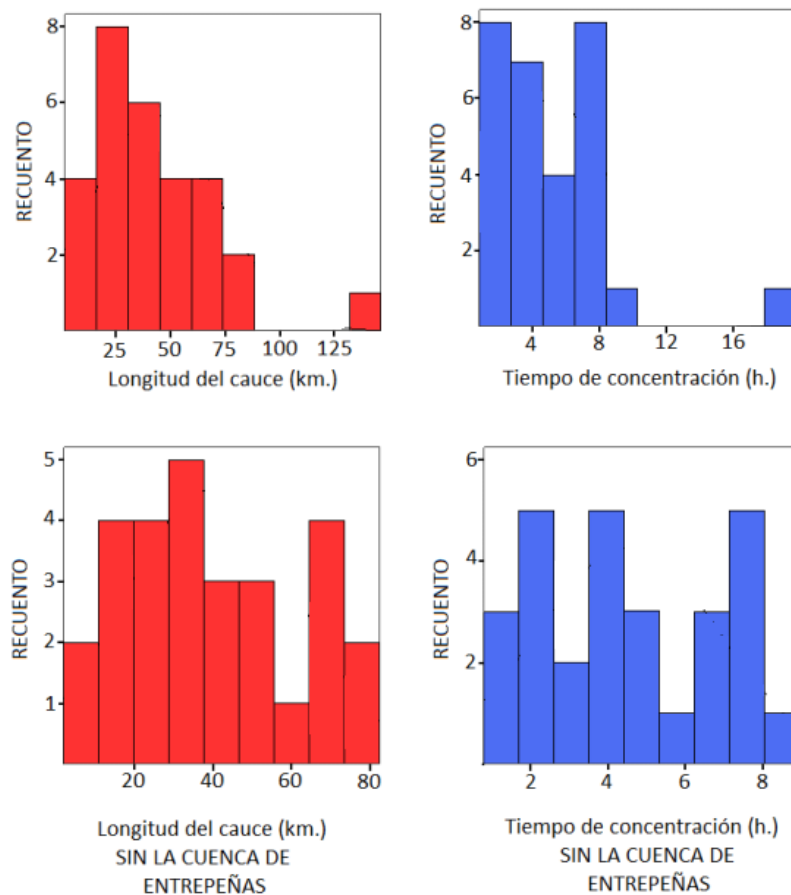
FUENTE: *Elaboración propia.*

En cualquier caso, la cuenca de Entrepeñas refleja un tiempo de concentración ostensiblemente mayor de lo que indica longitud de su curso principal, por lo que resulta uno de los pocos casos de estudio en los que vale la pena examinar qué ocurre. Efectivamente en Entrepeñas, tal y como se señaló en el apartado anterior, tanto las pendientes de la cuenca en general como el desnivel absoluto que salva el río (en torno a 1000 metros) son muy leves- máxime para una cuenca tan larga- y por ello el flujo se presume bastante lento. En la situación contraria- aunque destacando bastante menos- aparece la cuenca de La Peña, la cual tiene la misma longitud que la de Santa Teresa, pero necesita una hora menos para evacuar su agua en

función del importante desnivel que salva, concentrado además en su tramo de cabecera pirenaico.

Incluso obviando el caso atípico de Entrepeñas, ambas variables cubren uniformemente un amplio rango de valores - hasta los 100 kilómetros de longitud del cauce y las 10 horas de concentración del caudal- que permitirán evaluar si a largo plazo se trata de una característica que module en algún sentido la respuesta hidrológica a la sequía (Ver Figura 3.9). Es interesante contar no solo con casos de estudio que cubran homogéneamente un amplio rango de valores, sino también con casos extremos.

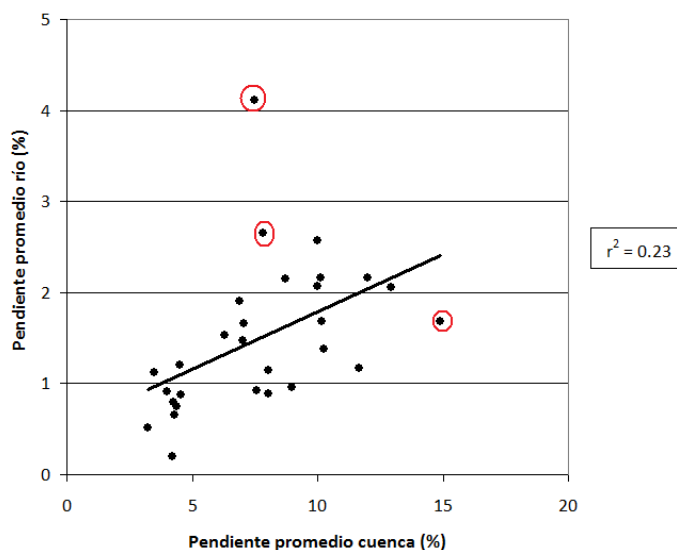
FIGURA 3.9: Longitud del cauce y tiempo de concentración con y sin la cuenca de Entrepeñas.



FUENTE: Elaboración propia.

Por último, se ha testado la vinculación entre las pendientes de la cuenca evaluadas anteriormente y las pendientes del cauce, encontrando que curiosamente no es tanta y hay varias cuencas que contravienen la relación directa (Ver Figura 3.10). Esto motiva que en lo sucesivo se tienda a considerar ambas variables y no solamente una de ella.

FIGURA 3.10: Diagrama de dispersión entre las pendientes de los ríos y las de la propia cuenca en sí.



FUENTE: Elaboración propia.

- *Hidrogeología.*

En este caso se hará fundamentalmente referencia al *porcentaje de superficie total de la cuenca que está catalogado como Unidad Hidrogeológica* y al tipo de formación que lo constituye. No obstante, también se tendrá en cuenta la litología de la que se trate y el número de manantiales de importante caudal identificados en la cuenca, como distintivo de un importante potencial en lo relativo a la fase subterránea de la escorrentía.

Este rasgo es uno de los más importantes a la hora de caracterizar la aportación de una cuenca, ya que cuanto más permeable sea la superficie más peso tendrá la componente subterránea y menos inmediata y más homogénea será la escorrentía. Es un elemento que tiene probada repercusión a largo plazo y no solo a nivel del episodio de lluvia, hasta tal punto que el hecho de que exista un acuífero suele garantizar el mantenimiento de forma continua

de un determinado volumen fluyente, con lo que en este tipo de cuencas la sequía hidrológica estará previsiblemente más desvinculada temporalmente de la meteorológica.

Ambos tipos de datos provienen también del Sistema Integrado del Agua y se han cotejado con los WMS del Instituto Geológico y Minero Español (IGME) (Ver Tabla 3.5).

TABLA 3.5: Datos referentes a la hidrogeología de las cuencas.

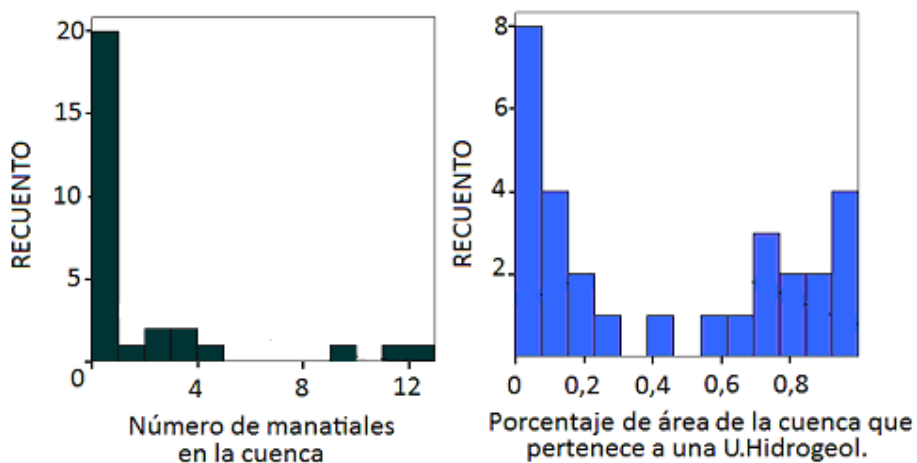
CUENCA	ÁREA PERTENECIENTE A UNIDAD HIDROGEOLÓGICA (KM. ²)	PROPORCIÓN CON RESPECTO A LA SUPERFICIE TOTAL	NÚMERO DE SURGENCIAS (POR TRAMO EN CUENCAS GRANDES)			UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS
			CABEC.	MEDIO	BAJO	
ALFONSO XIII	629,62	0,74	-	3	-	- LA ZARZA y CARAVACA. → Ambos son acuíferos que mezclan rocas sedimentarias y calizas. - ALTO QUIPAR → Roca caliza y margosa. - BAJO QUIPAR → Conglomerados. - BULLAS → Areniscas.
ALLOZ	86,59	0,61	2			- SIERRA DE URBASA → Conglomerados, areniscas, arcillas y calizas. Evaporitas.
ARLANZON	0,00	0,00	-			-
BARRIOS DE LUNA	0,00	0,00	-			-
BERMEJALES	221,38	0,74	-			- TEJEDA – ALMIJARA- LAS GUÁJARAS → Areniscas, conglomerados, arcillas; calizas y evaporitas.
BURGOMILLODO	694,32	0,86	-	1	-	- SEGOVIA → Algunos gneises, litología caliza. - ARLANZA → Areniscas y conglomerados. Algo de caliza.
CAMPORREDONDO	0,27	0,00	-			- LA ROBLA- GUARDO-- Conglomerados, areniscas, pizarras y calizas.
CERVERA RUESGA	5,52	0,10	-			- LA ROBLA- GUARDO → Conglomerados, areniscas, pizarras y calizas. Algo de carbón.
CUBILLAS	432,33	0,68	1	1	1	- MONTES ORIENTALES - SIERRA COLOMERA - SIERRA ARAÑA - DEPRESIÓN DE GRANADA → Todos son acuíferos sedimentarios. - PADUL → Acuífero metamórfico: Mármoles, filitas, micaesquistos, etc.
CUERDA DEL POZO	91,48	0,17	-			- ARLANZA – UCERO – AVIÓN → Calizas, areniscas, dolomías y margas.
EBRO	109,04	0,24	-	4	-	- FONTIBRE → Conglomerados, areniscas, calizas, yesos y arcillas versicolores.
EL BURGUILLO	0,00	0,00	-			-
EL PINTADO	456,36	0,41	-			- SIERRA MORENA → Metamórfico fundamentalmente: Cuarzitas, pizarras, algunas areniscas y calizas.
EL VADO	2,27	0,01	-			- TORRE LAGUNA- JADRAQUE → Metamórfico fundamentalmente: Cuarzitas, pizarras, algunas areniscas y calizas.

CUENCA	ÁREA PERTENECIENTE A UNIDAD HIDROGEOLÓGICA (KM. ²)	PROPORCIÓN CON RESPECTO A LA SUPERFICIE TOTAL	NÚMERO DE SURGENCIAS (POR TRAMO EN CUENCAS GRANDES)			UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS
ENTREPEÑAS	2.933,88	0,74	4	4	2	- LA ALCARRIA - ENTREPEÑAS TAJUÑA -MONTES UNIVERSALES - ALBARRACÍN- CELLA → Todos son similares: Conglomerados, areniscas, arcillas y calizas. Evaporitas.
FUENSANTA	1.197,29	0,99	7	2	3	- CASTRIL. - FUENTE SEGURA – FUENSANTA. - SEGURA – MADERA – TUS - CALAR DEL MUNDO. → Todos similares: Conglomerados, dolomías, areniscas, arcillas y calizas.
GABRIEL Y GALAN	11,25	0,01	-			-ZARZA DE GRANADILLA → Metamórfico fundamentalmente: Pizarras, grauwackas, cuarcitas y conglomerados.
GASSET	135,7	0,7	-			- BULLAQUE - CIUDAD REAL → Son similares, metamórficos fundamentalmente: Cuarzitas, pizarras, algunas areniscas, arcillas y calizas.
GUADALMELLATO	0,00	0,00	-			-
LA CIERVA	144,32	0,85	1			- BULLAS. - BAJO QUIPAR. - SIERRA ESPUÑA. → Todos tienen litología similar pese a ser formaciones independientes: Conglomerados detríticos, dolomías, areniscas, calcarenitas, arcillas y calizas.
LA PEÑA	218,04	0,15	5	-	-	-PEÑA EZCURRI. - TENDEÑERA – MONTE PERDIDO. → Estos dos primeros son similares: Calizas detríticas, calcarenitas, margas y calizas. - SANTO DOMINGO- GUARA. → Conglomerados, areniscas, calizas, yesos y arcillas versicolores.
LA TOBA	365,96	1,00	-			-SERRANÍAS DE CUENCA → Calizas, dolomías y margas. Areniscas y conglomerados. - MONTES UNIVERSALES. → Conglomerados, areniscas, calizas, yesos y arcillas versicolores.
LINARES DEL ARROYO	599,05	0,79	1			- SEGOVIA → Dolomías, calizas y margas. Areniscas - ARLANZA → Areniscas, conglomerados, arcillas; calizas y evaporitas.
PALMACES	39,77	0,15	-			- TORRELAGUNA- JADRAQUE → Conglomerados, areniscas, calizas, yesos y arcillas versicolores. - GUADALAJARA → Dolomías, calizas y margas. Areniscas
RIUDECANYES	0,00	0,00	-			-
SANTA TERESA	184,72	0,10	-			- C. RODRIGO – SALAMANCA → Areniscas, conglomerados, arcillas; calizas y evaporitas - CORNEJA → Granitoides.
TALAVE	720,80	0,96	4	-	-	- ALCALDOZO. - PLIEGUES JURÁSICOS DEL MUNDO → Los dos son similares: Calizas, dolomías y margas. Areniscas y conglomerados.
TORRE DEL AGUILA	102,46	0,23	1			- ARAHAL- EL CORONIL – MORÓN → Areniscas, conglomerados, arcillas; calizas y evaporitas.
TRANCO DE BEAS	523,18	1,00	4	3	6	- SIERRA DE CAZORLA → Calizas, dolomías y margas.. - QUESADA- CASTRIL → Dolomías, calizas y margas.

FUENTE: Elaboración propia a partir de servicios WMS del S. I. A. y el Instituto Geológico y Minero Español.

De la tabla puede deducirse la enorme variabilidad que existe entre unas cuencas y otras, desde las completamente carentes de potencial acuífero a las que muestran multitud de fuentes y no solo presentan litologías muy permeables sino que el IGME las identifica como pertenecientes a una Unidad Hidrogeológica catalogada, pero lo que resulta más curioso es que esta diversidad no es tan homogénea como otras variables examinadas y las cuencas o son muy permeables o lo son poco, por lo general. Si observamos los gráficos de la ratio de la cuenca que pertenece a una Unidad Hidrogeológica del catálogo IGME (Ver Figura 3.11), se observa cierta dominancia de cuencas que no pertenecen a las áreas identificadas en este catálogo y que a lo sumo- examinando su cartografía geológica al detalle- muestran vetas permeables aisladas o acuíferos locales de importancia moderada o baja. Algo similar ocurre si se traza esta gráfica para el número de surgencias de la cuenca, ya que en los casos de estudio ambas variables están bastante vinculadas, como cabría esperarse.

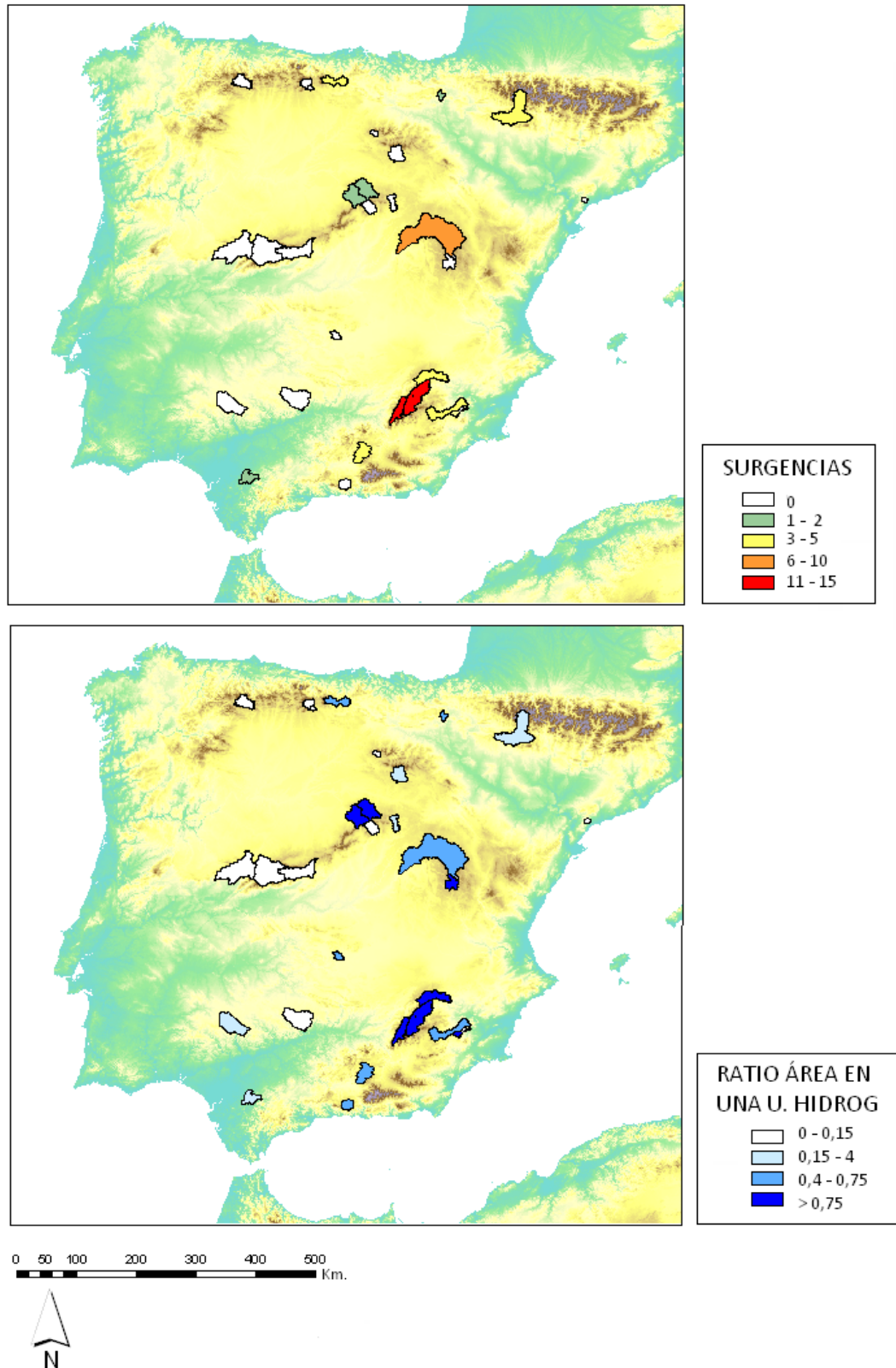
FIGURA 3.11: Variables sobre hidrogeología.



FUENTE: Elaboración propia.

Lógicamente, estas variables muestran patrones geográficos muy marcados correspondientes con la naturaleza geológica de las áreas en las que se ubican (Ver Figura 3.12).

FIGURA 3.12: Mapas del número de manantiales identificados por cuenca y de la proporción del área de estas que pertenece a una Unidad Hidrogeológica del inventario del IGME.



FUENTE: *Elaboración propia.*

Destacan por su elevada permeabilidad y presencia de fuentes las cuencas de la vertiente norte (cantábrica y pirenaica) del Ebro, las cuencas de las cordilleras Béticas, especialmente el Prebético, los montes Universales/ Serranía de Cuenca y las dos cuencas de la Sierra de Ayllón en el Sistema Central (Burgomillodo y sobre todo Linares del Arroyo). En cambio, las cuencas de la meseta, de Sierra Morena, las de las sierras del Sistema Central occidental y las de la vertiente norte del Duero se caracterizan por una marcada impermeabilidad.

- *Usos del suelo y vegetación.*

No se puede pasar por alto que a escala de cuenca la cobertura vegetal resulta de vital importancia para explicar las relaciones entre precipitaciones y aportaciones, no solo porque al caer la lluvia sobre una masa forestal se produce una intercepción de la misma mucho más efectiva que sobre una vegetación rala, sino porque a lo largo de un cierto período de tiempo, el desarrollo de una cubierta forestal frondosa crea condiciones óptimas para la penetración y almacenamiento del agua, generando una escorrentía muy regulada en la cuenca (Mariano, J., 1991). Por el contrario, su eliminación total e incluso su sustitución por cobertura agrícola expone a la materia orgánica del suelo a una mayor oxidación y destrucción, y al propio sustrato al efecto mecánico de las lluvias que lo apelmazan y lo desplazan. La escorrentía, llegado este punto de regresión vegetal, es mucho más torrencial, menos regulada y por tanto más ligada al episodio de lluvia.

Para las cuencas de estudio se han obtenido las *coberturas del año 2000* producidas para el proyecto *CORINE Land Cover* (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2000), de cuyas 44 categorías específicas se ha realizado una simplificación en las cinco jerarquías generales establecidas en el propio documento *shapefile*, dado que teóricamente se corresponden adecuadamente con diferentes modos de regulación de la escorrentía: áreas agrícolas (*agricultural areas*), áreas artificiales (*artificial surfaces*), bosques y áreas seminaturales (*forest and semi natural areas*), masas de agua (*water bodies*) y humedales (*wetlands*).

Finalmente, se ha comprobado que los usos distintos de áreas agrícolas y forestales son insignificantes en comparación con estos dos, claramente predominantes, por lo que son los que se han mantenido en el estudio (Ver Tabla 3.6). La única excepción en la que hay algún

otro uso que supere el 5% de la cuenca es la de Ebro, cuyo embalse es muy grande en comparación con el pequeño tamaño de la cuenca, teniendo un 15% de su área sumergida.

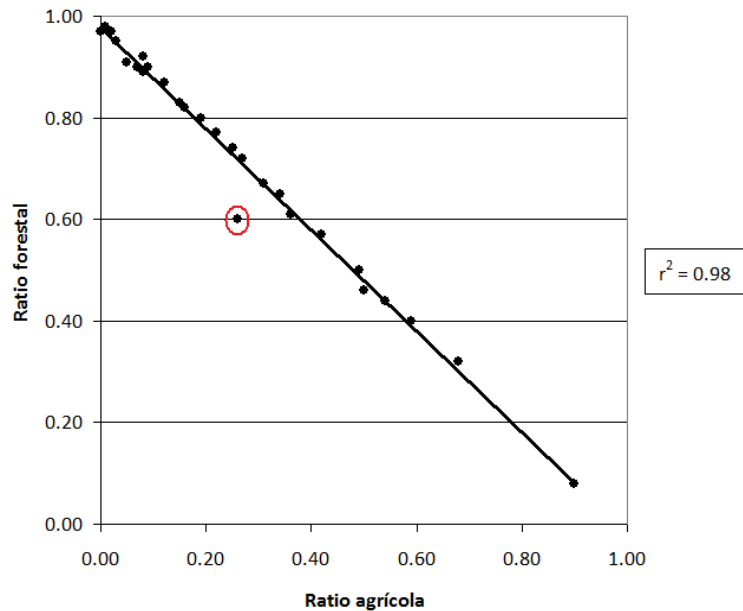
TABLA 3.6: Parámetros de usos del suelo predominantes en las cuencas de estudio.

CUENCA	AREA AGRÍCOLA (KM.²)	ÁREA FORESTAL (KM.²)	PROPORCIÓN ÁREA AGRÍCOLA	PROPORCIÓN ÁREA FORESTAL
ALFONSO XIII	494,93	335,66	0,59	0,40
ALLOZ	50,86	85,82	0,36	0,61
ARLANZON	1,69	101,36	0,02	0,97
BARRIOS DE LUNA	40,45	437,20	0,08	0,89
BERMEJALES	88,98	195,76	0,31	0,67
BURGOMILLODO	339,59	462,62	0,42	0,57
CAMPORREDONDO	1,10	224,57	0,00	0,97
CERVERA RUESGA	1,38	51,32	0,03	0,95
CUBILLAS	422,33	207,47	0,68	0,32
CUERDA DEL POZO	28,56	496,34	0,05	0,91
EBRO	120,64	276,82	0,26	0,60
EL BURGUILLO	93,84	957,15	0,09	0,90
EL PINTADO	218,29	891,42	0,19	0,80
EL VADO	4,00	370,64	0,01	0,98
ENTREPEÑAS	990,44	2.944,35	0,25	0,74
FUENSANTA	144,56	1.055,34	0,12	0,87
GABRIEL Y GALAN	271,09	1.533,50	0,15	0,83
GASSET	85,81	77,89	0,50	0,46
GUADALMELLATO	326,31	855,22	0,27	0,72
LA CIERVA	82,41	85,17	0,49	0,50
LA PEÑA	205,34	1.494,90	0,12	0,87
LA TOBA	28,51	335,23	0,08	0,92
LINARES DEL ARROYO	412,56	336,44	0,54	0,44
PALMACES	91,59	178,26	0,34	0,65
RIUDECANYES	2,07	26,12	0,07	0,90
SANTA TERESA	303,43	1.516,45	0,16	0,82
TALAVE	168,14	581,08	0,22	0,77
TORRE DEL AGUILA	396,55	34,81	0,90	0,08
TRANCO DE BEAS	34,26	473,48	0,07	0,90

FUENTE: Elaboración propia.

Dado que la agrícola y la forestal son las dos únicas coberturas que tienen peso en las cuencas, su proporción dentro de las mismas es matemáticamente inversa (Ver Figura 3.13). La única cuenca que se dispersa de la recta de regresión es Ebro (rojo) debido a que, como hemos señalado, gran parte de su superficie está ocupada por el propio embalse.

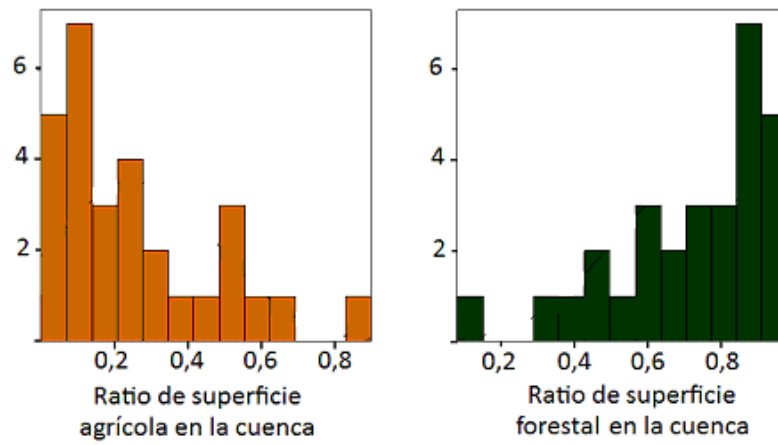
FIGURA 3.13: Diagrama de dispersión entre la ratio de superficie agrícola y la de superficie forestal en las cuencas de estudio.



FUENTE: *Elaboración propia.*

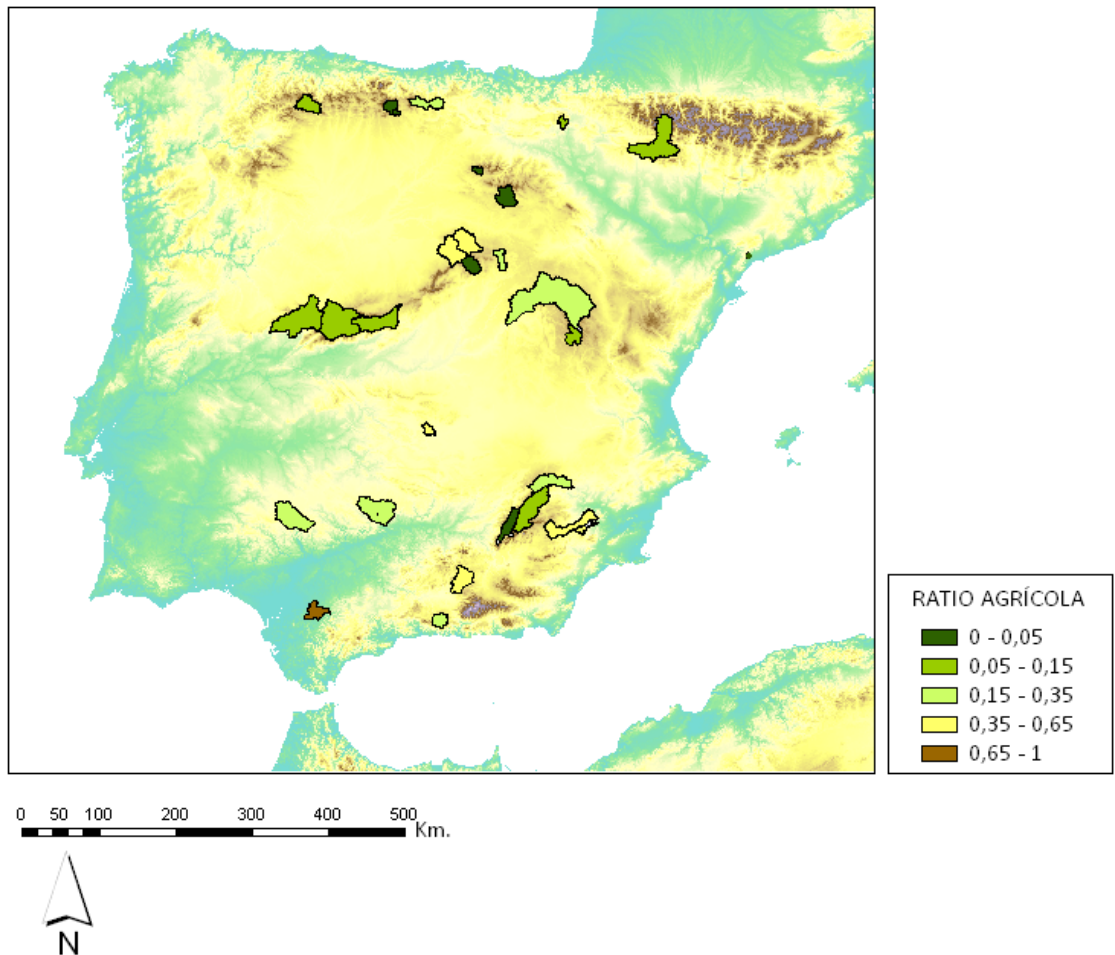
En cualquier caso, lo más interesante a nivel general es que se dispone de una representatividad suficiente con las 29 cuencas seleccionadas, y aunque estas tienden a ser de carácter predominantemente forestal (Ver Figura 3.14) - existiendo 15 cuencas por encima del 0,8 en este ratio- apareciendo casos como el de Cubillas y, sobre todo, Torre del Águila, en los que se puede probar cómo funciona la escorrentía en una cuenca agrícola (Ver Figura 3.15).

FIGURA 3.14: Superficies agrícolas y forestales en las cuencas de estudio.



* El eje vertical refleja las frecuencias de los intervalos.
FUENTE: Elaboración propia.

FIGURA 3.15: Mapa de la proporción agrícola en la cuenca.



* En verde se aprecian las cuencas más forestales, en ocre las agrícolas.
FUENTE: Elaboración propia.

Como es lógico, las cuencas de mayor altitud y pendiente promedio cuentan con una elevada proporción de su área ocupada por bosques y al contrario, las cuencas más agrícolas son las más bajas y llanas, por razones tanto climáticas como de accesibilidad y estabilidad de los suelos de cultivo. Así, la altitud promedio está conectada con estas ratios a un nivel de correlación muy significativo (r de Pearson = $\pm 0,67$) y la pendiente promedio también aunque en menor medida ($\pm 0,6$).

Para un análisis más detallado de cada cuenca en cuanto a los valores de todos los parámetros hasta aquí desarrollados y las coberturas utilizadas para extraerlos mediante análisis SIG, consultar las 29 fichas del Anexo.

3.2. CLASIFICACIÓN DE LAS CUENCAS SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS.

Las anteriores características medidas en las cuencas de estudio intentan englobar la mayor cantidad posible de información sobre las mismas, si bien- como ya se ha adelantado en los apartados anteriores- no todas son independientes entre sí (Ver Tabla 3.7).

TABLA 3.7: Correlaciones bivariadas entre las variables morfométricas estudiadas. r de Pearson.

R DE PEARSON	AREA	FAC. FORMA	R. CIRC. MILLER	C. GRAVELIUS	I. ALARGAMIENTO	LONG. CAUCE	DESNIVEL CUENCA	T. DE CONCENTRACIÓN	RATIO AGRICOLA	RATIO FORESTAL	RATIO NIVAL	RATIO ACUÍFERO	DENSIDAD DRENAJE	ALTITUD MEDIA
AREA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FAC. FORMA	-0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R. CIRC. MILLER	-0,21	0,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C. GRAVELIUS	0,09	-0,22	0,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I. ALARGAMIENTO	0,11	0,92	-0,35	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LONG. CAUCE	0,95	-0,34	-0,28	0,10	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DESNIVEL CUENCA	0,48	-0,18	-0,15	-0,01	0,19	0,59	-	-	-	-	-	-	-	-
T. DE CONCENTRACIÓN	0,95	-0,32	-0,25	0,10	0,28	0,97	0,39	-	-	-	-	-	-	-
RATIO AGRICOLA	-0,05	-0,23	0,03	-0,09	0,07	0,00	-0,19	0,04	-	-	-	-	-	-
RATIO FORESTAL	0,07	0,25	-0,02	0,08	-0,09	0,01	0,20	-0,03	-0,99	-	-	-	-	-
RATIO NIVAL	0,04	0,23	0,01	-0,04	-0,23	0,04	0,33	-0,04	-0,41	0,37	-	-	-	-
RATIO ACUÍFERO	0,09	-0,32	-0,08	0,00	0,41	0,17	0,09	0,17	0,32	-0,29	-0,51	-	-	-
DENSIDAD DRENAJE	-0,62	-0,11	0,02	-0,08	0,11	-0,56	-0,32	-0,55	-0,06	0,03	0,21	-0,09	-	-
ALTITUD MEDIA	-0,14	0,12	0,00	0,01	-0,02	-0,09	0,46	-0,21	-0,67	0,67	0,5	-0,18	0,19	-
PENDIENTE MEDIA	0,06	0,28	0,01	-0,16	-0,11	0,12	0,36	0,04	-0,60	0,61	0,39	0,03	0,12	0,59

* Valores altamente significativos sombreados.
FUENTE: Elaboración propia.

Ciertamente hay determinadas características o parámetros que se vinculan con otros -simplemente debido a su cálculo o porque su naturaleza impone esa vinculación- y que por ello muestran una gran correlación, como por ejemplo la superficie de la cuenca y la longitud del cauce principal, o la altitud y el porcentaje del área que se considera cuenca nival; si bien existen otras relaciones que no son tan sencillamente identificables. Así, para intentar resumir estas variables en menos factores que aglutinen gran parte de la variabilidad y que, si es posible, sean de algún modo interpretables, puede utilizarse el procedimiento exploratorio de análisis factorial, concretamente usando el método de *extracción de componentes principales*.

Posteriormente, y como objetivo final de este epígrafe, se utilizarán técnicas estadísticas multivariantes para clasificar las 29 cuencas en un número de grupos más reducido, dentro de los cuales se compartan características similares y definitorias. Para ello se empleará la técnica de los *conglomerados jerárquicos*.

Al aplicar la primera de las técnicas sobre las variables estandarizadas, se obtienen los componentes principales cuyo autovalor supera 1, acumulando más del 85% de la varianza total de la estructura interna de las variables, una proporción bastante satisfactoria, extrayéndose cuatro factores solamente (Ver Tablas 3.8 y 3.9).

TABLA 3.8: Varianza total explicada por los factores extraídos.

COMPONENTE	AUTOVALORES INICIALES			SUMA DE LAS SATURACIONES AL CUADRADO DE LA ROTACIÓN		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	4,791	34,224	34,224	4,312	30,798	30,798
2	3,194	22,816	57,040	3,076	21,971	52,768
3	2,224	15,884	72,924	2,325	16,610	69,379
4	1,492	10,658	83,582	1,988	14,203	83,582

FUENTE: *Elaboración propia.*

TABLA 3.9: Matriz de Componentes Principales rotados con Varimax.

PARÁMETROS DE CUENCA (ESTANDARIZADOS)	COMPONENTE PRINCIPAL (FACTOR)			
	1	2	3	4
AREA	0,97	0,03	0,05	-0,06
PERIMETRO	0,96	0,03	0,17	-0,13
FACTOR DE FORMA	-0,10	0,15	-0,88	0,27
RAZÓN CIRCULAR DE MILLER	-0,15	-0,03	-0,22	0,9
COEFICIENTE DE GRAVELIUS	0,05	-0,01	0,01	-0,96
ÍNDICE DE ALARGAMIENTO	0,08	0,02	0,93	-0,19
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	0,94	-0,03	0,23	-0,07
DENSIDAD DEL DRENAJE	-0,76	0,16	0,19	-0,03
RATIO DE SUPERFICIE FORESTAL	0	0,92	-0,20	-0,11
RATIO DE SUPERFICIE SOBRE UNA U. HIDROGEOL.	0,15	-0,19	0,43	0,18
RATIO DE SUPERFICIE AGRÍCOLA	0,02	-0,92	0,19	0,13
PENDIENTE MEDIA	-0,12	0,81	0,03	0,01
ALTITUD MEDIA	0,090	0,8	-0,02	0,19
PENDIENTE MEDIA DE LOS CAUCES	-0,60	0,40	-0,20	0,05
LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL	0,95	0,05	0,26	-0,07

* *Valores significativos en cursiva.*

FUENTE: *Elaboración propia.*

De la Tabla 3.9 se desprende que dentro del total de las variables existen dos factores claramente interpretables, por un lado, el factor relativo al *tamaño de la cuenca* (1) y por otro el que se asocia a variables ligadas al *carácter montañoso* de las mismas, puesto que engloba características como el porcentaje de superficie forestal, la pendiente de la cuenca y la altitud media (2). Los otros dos factores extraídos por el análisis son menos evidentes, pero tienen la particularidad de englobar y corresponderse perfectamente con los parámetros más puramente morfométricos, de manera que el factor 3 se relaciona inversamente con el Factor de Forma y directamente con el Índice de Alargamiento, por lo que es un factor asociado a la *circularidad* de la cuenca; y el cuarto se relaciona con el coeficiente de Gravelius y la Razón Circular de Miller -estos últimos son proporcionales entre sí- siendo entonces un factor ligado a la *compacidad*.

Un hecho curioso es que la variable correspondiente a la pendiente media de los cauces no se englobe directamente en el mismo grupo que las pendientes medias de las cuencas, sino que esté más correlacionada, y de manera inversa, con el factor tamaño. Esto denota que los casos de estudio más pequeños tienden a mostrar una mayor torrencialidad en sus cauces a pesar de que el global de la cuenca no sea muy escarpado; en las cuencas más grandes la dinámica fluvial permite el desarrollo de tramos medios y bajos donde los cauces se acomodan a un perfil mucho más suave. Aún así, esta variable posee también cierta correlación con el factor 2 relativo al carácter montañoso, pero con una carga factorial mucho menor (0,4) que, no obstante, provoca que sea la única variable correlacionada significativamente con dos factores a la vez y cuya variabilidad por tanto quede definida parcialmente por cada uno de ellos. Esto dificulta levemente la interpretación.

Por otra parte, la hidrogeología (ratio de superficie acuífera) ha quedado poco definida por el modelo extraído, lo cual no solo indica que es una variable cuyo comportamiento no puede ser fácilmente relacionado con el del resto, sino que por esta misma razón no se debe rechazar, dado que añade mucha información distinta por sí misma.

La mejor decisión en este caso resulta extraer dicha variable (ratio de superficie acuífera) del conjunto del análisis factorial y repetirlo, de forma que en ellos solo intervengan las magnitudes que verdaderamente pueden ser bien definidas por los componentes extraídos. Este segundo análisis factorial recoge una varianza del 90% con los primeros cuatro factores y arroja, como es lógico, unas cargas factoriales de cada magnitud y unas

puntuaciones factoriales de cada cuenca superiores aunque muy similares a las anteriores, siendo todas estas las que se usarán en lo sucesivo. La variable hidrogeológica por su parte, será estandarizada y utilizada independientemente, sin ser incluida entre los factores (Ver Tabla 3.10).

Llegado a este punto, es preciso llevar a cabo la clasificación de las cuencas en grupos dentro de los cuales estas compartan propiedades comunes, para lo cual se han seguido dos metodologías diferentes:

- Por un lado se realizará un análisis de conglomerados jerárquicos donde se incluyan los factores obtenidos en el paso anterior.
- Después, dado que el factor correspondiente al tamaño se ha destacado como el que aún a gran parte de la variabilidad del sistema de parámetros medidos en las cuencas, va a probarse a dejarlo fuera en un segundo análisis de conglomerados de forma que adquieran importancia los demás y se establezca una clasificación que valore fundamentalmente otros parámetros no dependientes de lo grande o pequeña que sea una cuenca, sino relativos a la hidrología, la fisiografía y usos asociados, o los parámetros de forma.

Tal y como se ha indicado más arriba, además de los factores extraídos se añadirá en las exploraciones la variable correspondiente a la superficie permeable con respecto al total de la cuenca, ya que puede añadir matices muy diferentes e interesantes en la clasificación de los casos de estudio. Es importante puntualizar que esta metodología no resta valor al propio análisis factorial en sí, pues este ha logrado englobar con precisión al resto de magnitudes en solo cuatro componentes; sino que lo complementa, ya que usando solamente una variable más- de carácter muy distinto al resto y por ello difícil de incluir en un resumen por factores- conseguiremos una clasificación de las cuencas mucho más completa e interpretable.

TABLA 3.10: Puntuaciones factoriales de cada cuenca en los cuatro factores extraídos.

CUENCA	FACTOR 1 (TAMAÑO)	FACTOR 2 (CARÁCTER MONTAÑOSO)	FACTOR 3 (CIRCULARIDAD)	FACTOR 4 (COMPACIDAD)	% SUPERFICIE SOBRE UNA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA (VARIABLE ESTANDARIZADA)
ALFONSO XIII	0,29	-1,17	1,50	-0,81	0,87
ALLOZ	-0,95	-0,54	0,07	0,95	0,53
ARLANZON	-0,97	1,15	-0,40	0,24	-0,97
BARRIOS DE LUNA	-0,11	1,05	-0,41	-1,13	-0,97
BERMEJALES	-0,36	-0,09	-0,78	2,39	0,90
BURGOMILLODO	0,34	-0,85	-0,39	-0,27	1,48
CAMPORREDONDO	-0,57	1,50	-1,01	0,13	-0,97
CERVERA RUESGA	-1,50	1,11	0,05	-0,04	-0,72
CUBILLAS	0,00	-1,12	-0,12	1,27	0,70
CUERDA DEL POZO	0,04	0,44	-1,21	-0,25	-0,56
EBRO	-0,35	-0,05	1,18	-0,20	-0,39
EL BURGUILLO	0,49	0,97	0,81	-0,36	-0,97
EL PINTADO	0,52	-0,52	0,02	0,95	0,03
EL VADO	-0,24	0,99	-1,07	1,82	-0,96
ENTREPEÑAS	3,53	0,00	0,37	-0,39	0,83
FUENSANTA	0,59	0,88	1,54	0,22	1,46
GABRIEL Y GALAN	1,06	0,12	-0,26	-0,16	-0,96
GASSET	-0,77	-1,29	-0,23	0,15	1,43
GUADALMELLATO	0,69	-0,75	-0,96	0,63	-0,97
LA CIERVA	-1,14	-0,82	1,66	-0,49	1,16
LA PEÑA	1,28	0,78	-0,90	-0,39	-0,66
LA TOBA	-0,23	0,66	-0,08	0,48	1,48
LINARES DEL ARROYO	0,25	-1,17	0,21	-0,27	1,48
PALMACES	-0,56	-0,45	0,15	0,23	-0,61
RIUDECANYES	-1,18	-0,41	-1,56	-3,51	-0,97
SANTA TERESA	1,52	0,49	-1,21	-0,52	-0,73
TALAVE	0,06	0,28	1,98	-0,12	1,37
TORRE DEL AGUILA	-0,23	-2,87	-0,44	0,04	-0,40
TRANCO DE BEAS	-0,39	1,38	2,09	-0,12	1,48

FUENTE: *Elaboración propia.*

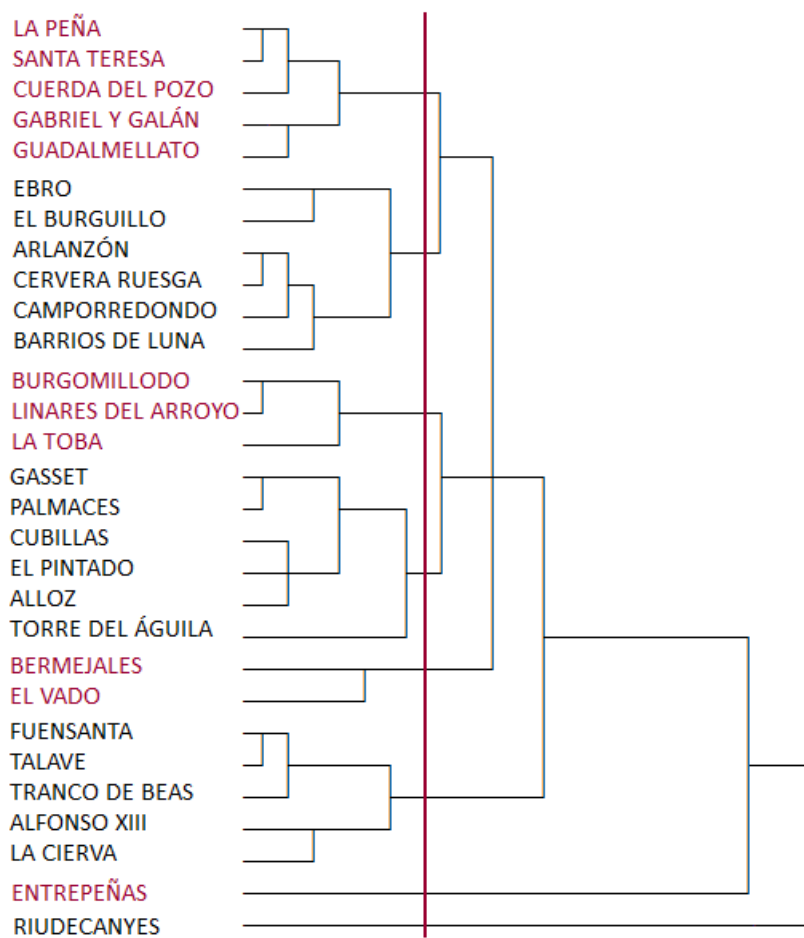
Lo más expresivo de la técnica de conglomerados es la revisión gráfica del dendrograma, dado que en él se pueden equiparar las medidas de sus barras en términos de distancia entre las características de unas y otras cuencas. Cuando dos cuencas o dos grupos

de cuencas se unen no solo importará con qué otras lo hacen, sino cuanta distancia necesitan para converger, porque esto implicará la mayor o menor similitud entre ellas.

El método seleccionado en ambos análisis es la vinculación intergrupos, en la cual se usan los promedios de las características todas las cuencas que pertenecen al grupo para compararlos con los de otro, utilizando la distancia euclídea al cuadrado para la creación de las agrupaciones. Como se utilizan variables y factores estandarizados, en la distancia euclídea entre las cuencas no interviene la dimensionalidad de estos, de forma que la agrupación resulta más significativa de las diferencias y similitudes que realmente existen entre los casos de estudio.

En el primer análisis, que incluye el tamaño de las cuencas (Ver Figura 3.16), sobresalen las cuencas de Entrepeñas – la más grande de las cuencas, con diferencia- y Riudecanyes como diferentes al resto y difícilmente agrupables.

FIGURA 3.16: Dendrograma de la agrupación por cuencas.



FUENTE: Elaboración propia.

Si se establecen 8 grupos, como un número conveniente de conglomerados, teniendo en cuenta que las distancias de unión empiezan a ser mucho más amplias a partir de este número, los grupos formados serían los siguientes:

- Grupo 1: La Peña, Santa Teresa, Cuerda del Pozo, Gabriel y Galán y Guadalmellato.
- Grupo 2: Ebro, El Burguillo, Arlanzón, Cervera Ruesga, Camporredondo y Barrios de Luna.
- Grupo 3: Burgomillodo, Linares del Arroyo y La Toba.
- Grupo 4: Gasset, Palmaces, Cubillas, El Pintado, Alloz y Torre del Águila.
- Grupo 5: Bermejales y El Vado.

- Grupo 6: Fuensanta, Talave, Tranco de Beas, Alfonso XIII y La Cierva.
- Grupo 7: Entrepeñas.
- Grupo 8: Riudecanyes.

Las características promedio de dichos grupos se pueden apreciar en la Tabla 3.11.

TABLA 3.11: Promedio de los factores y variables consideradas para la agrupación en los 8 conjuntos identificados.

VARIABLES Y FACTORES PARA LA CONGLOMERACIÓN	GRUPOS DE CUENCAS							
	1	2	3	4	5	6	7 (ENTREPEÑAS)	8 (RIUDECANYES)
FACTOR 1 (TAMAÑO)	0,88	-0,49	0,10	-0,33	-0,32	-0,06	3,53	-1,18
FACTOR 2 (CARÁCTER MONTAÑOSO)	0,25	1,1	-0,42	-1,14	0,48	0,04	0	-0,41
FACTOR 3 (CIRCULARIDAD)	-0,8	0,30	-0,7	-0,06	-1,16	1,61	0,37	-1,36
FACTOR 4 (COMPACIDAD)	-0,10	-0,08	-0,42	0,65	1,97	-0,24	-0,39	-3,51
RATIO DE SUP. ACUÍFERA (ESTD.)	-0,77	-0,80	1,6	-0,12	-0,03	1,3	0,83	-0,97

FUENTE: Elaboración propia.

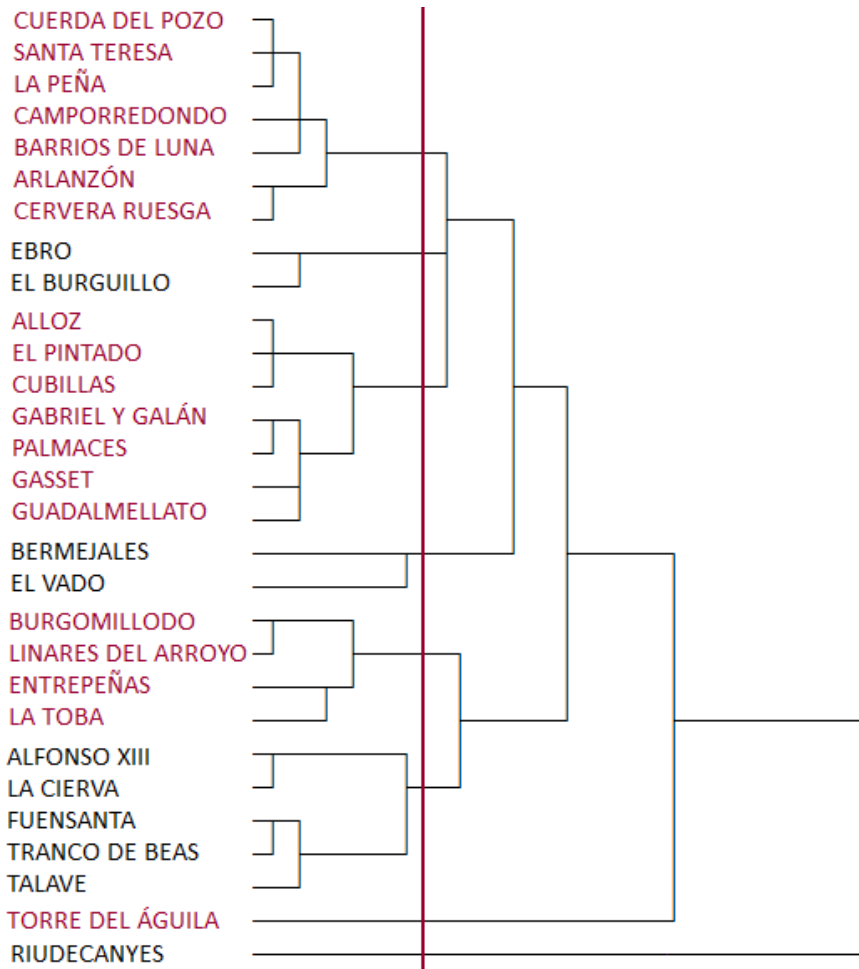
De este modo:

- Las cuencas del grupo 1 son bastante grandes, circulares y relativamente poco permeables, lo que supuestamente las lleva hacia unos caudales más rápidamente evacuados;
- Las cuencas del grupo 2 son poco permeables y las más montañosas, por lo cual podría suponerseles una rápida evacuación, pero también una importante intercepción forestal y una retención nival que decelera y desacopla el proceso en determinadas estaciones del año;
- Las del grupo 3 son muy permeables y redondeadas;
- Las cuencas del grupo 4 son de carácter mucho menos montañoso que el resto, con las evidentes implicaciones que esto tiene sobre la escorrentía;
- En el grupo 5 se engloban cuencas compactas y por ello más tendentes a la torrencialidad;

- Por último, en el 6 son alargadas y muy permeables, lo cual apunta sin duda a una importante regulación del flujo por ambas razones.
- Las dos cuencas independientes (o grupos 7 y 8) destacan fundamentalmente por su tamaño, aunque Riudecanyes lo hace también por su reducida compacidad.

Ahora bien, si el análisis se realiza excluyendo el factor 1, correspondiente al tamaño de los casos de estudio, los resultados son menos diferentes de lo que pudiera suponerse, sobresaliendo las cuencas de Riudecanyes y Torre del Águila como muy distintas entre sí y con respecto a las otras 27 (Ver Figura 3.17).

FIGURA 3.17: Dendrograma de la agrupación por cuencas sin incluir el factor 1 (tamaño).



FUENTE: Elaboración propia.

Si se forman 8 grupos de nuevo, teniendo en cuenta que las distancias de unión vuelven a ser mayores a partir de este número, los conjuntos formados serían los siguientes:

- Grupo 1: La Peña, Santa Teresa, Cuerda del Pozo, Camporredondo, Barrios de Luna, Arlanzón y Cervera Ruesga.
- Grupo 2: Ebro y El Burguillo.
- Grupo 3: Alloz, El Pintado, Cubillas, Gabriel y Galán, Palmaces, Gasset, y Guadalmellato.
- Grupo 4: Bermejales y El Vado.
- Grupo 5: Burgomillodo, Linares del Arroyo, Entrepeñas y La Toba.
- Grupo 6: Alfonso XIII, La Cierva, Fuensanta, Tranco de Beas y Talave.
- Grupo 7: Torre del Águila.
- Grupo 8: Riudecanyes.

Efectivamente, los grupos son esencialmente similares, con leves matices, lo cual lleva a pensar que realmente existe una verdadera ligazón intergrupo, más allá del tamaño de cuenca. Las características medias de los conjuntos formados se pueden apreciar en la Tabla 3.12.

TABLA 3.12: Promedio de los factores y variables consideradas para la agrupación en los 8 conjuntos identificados.

VARIABLES Y FACTORES PARA LA CONGLOMERACIÓN	GRUPOS DE CUENCAS							
	1	2	3	4	5	6	7 (TORRE DEL ÁGUILA)	8 (RIUDECANYES)
FACTOR 2 (CARÁCTER MONTAÑOSO)	1,01	0,38	-0,7	0,48	-0,31	0,04	-2,87	-0,41
FACTOR 3 (CIRCULARIDAD)	-0,6	1,41	-0,09	-1,16	-0,43	1,6	-0,44	-1,36
FACTOR 4 (COMPACIDAD)	-0,28	0	0,7	1,97	-0,41	-0,23	0,04	-3,51
RATIO DE SUP. ACUÍFERA (ESTD.)	-0,8	-0,6	-0,32	-0,03	1,31	1,26	-0,4	0,97

FUENTE: *Elaboración propia.*

La cuenca de Torre del Águila destaca ahora esencialmente por ser muy llana y agrícola, siendo el caso de estudio de carácter menos montañoso y resultando por ello difícilmente comparable al resto en términos hidrológicos.

En cambio Entrepeñas, que sobresalía en el primero de los análisis de conglomerados debido a su gran superficie, queda bien definida por el conjunto 5 en la nueva clasificación, fundamentalmente debido a que como el resto de este grupo posee una elevada permeabilidad. Este es un caso de estudio que nos ayudará a confirmar posteriormente la importancia de aislar el factor tamaño, ya que a escalas temporales tan amplias como aquellas en las que se estudia la sequía, la propia escala espacial de la cuenca no debería pesar tanto como otros rasgos. Es importante que comprobemos cual de las dos clasificaciones concuerda mejor con los resultados finales, si es que alguna lo hace.

En cualquier caso, se espera que en los análisis a desarrollar en los capítulos sucesivos se perciban matices diferentes e identificables en la respuesta precipitación- escorrentía entre unos y otros grupos definidos en este epígrafe, de ahí la importancia que se le otorga a estas caracterizaciones y clasificaciones previas.

Capítulo 4

Las precipitaciones y las aportaciones en el estudio de la sequía

4.1. REFLEXIONES INICIALES RELATIVAS A LA DISPONIBILIDAD, CALIDAD Y MANEJO DE LOS DATOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS.

4.1.1. Los datos de precipitación.

Como se adelantó en el capítulo de introducción, los datos de precipitaciones utilizados proceden de la base de datos MOPREDAS (Monthly Precipitation Dataset), creada y cedida por el Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza, a partir de la información de las estaciones oficiales de la red de AEMET.

La disponibilidad de esta base de datos ha facilitado enormemente los trabajos de recopilación, selección y tratamiento estadístico previo de las series de observación, evitándose además la necesidad de rellenar lagunas, puesto que MOPREDAS surge precisamente para la reconstrucción total de más de 2.600 series del AEMET de todo el territorio nacional, usando para ello todas aquellas que hubieran registrado precipitación durante al menos 10 años.

Además para el trabajo se seleccionaron las estaciones que estaban completas para el periodo 1957-2005 en cada cuenca piloto incluso antes de su calibrado para formar parte de MOPREDAS, con la finalidad de avalar una información más verosímil.

Después, se ha realizado un promedio de la precipitación de todos los observatorios dentro de cada subcuenca para representarla en su conjunto por medio de una sola serie y así

simplificar los cálculos posteriores. Esto es posible y conveniente en función de tres premisas básicas:

- En primer lugar, la fuerte correlación espacial que se registra –tal y como se mostrará en adelante- entre la precipitación de las estaciones pertenecientes a un mismo ámbito hidrográfico, pese al relieve complejo y escarpado de muchas de las cuencas y a la gran extensión de otras.
- En segundo lugar, el hecho de que la variabilidad espacial del fenómeno de la sequía pluviométrica sea previsiblemente inferior a la que caracteriza a la propia precipitación.
- En tercer lugar, el hecho de que la sequía se defina a partir de anomalías acumuladas de la variable respecto a los valores normales, es decir, a partir de valores relativos, con lo cual carecen de demasiada relevancia las diferencias entre los valores absolutos registrados entre unos observatorios y otros. En cualquier caso, estas diferencias se diluyen parcialmente al promediar.

4.1.2. Los datos de aportación.

Utilizar datos reales observados siempre es la situación óptima para llevar a cabo un estudio estadístico de cualquier tipo, pero requiere una calidad suficiente en la red de medición, sobre todo en lo relativo a distribución de los puntos de medida y la antigüedad hasta la que se retrotrae la serie de datos en cuestión.

Si a esta dificultad se añade la propia naturaleza de los datos de aportaciones, cuya desnaturalización es mayor conforme nos alejamos de la cabecera de cualquier cuenca debido a la incidencia de la actividad humana sobre los caudales, no solo en volúmenes sino también en cuanto a régimen, aumentan los impedimentos para decidir qué series son las más adecuadas para caracterizar esta variable en un ámbito determinado.

Por ello, si se utilizan datos observados para caracterizar aportaciones naturales, solo podrá hacerse en las subcuencas de cabecera, no afectadas significativamente por volúmenes procedentes de desembalses o detracciones considerables aguas arriba.

Contra estos obstáculos que pudieran cuestionar el uso de los valores reales de caudales medidos, existen dos alternativas posibles, ya adelantadas en epígrafes anteriores:

- Por un lado, es posible llevar a cabo una restitución de estos mismos valores de aportaciones medidos en cualquier punto de la red a un estado natural hipotético mediante la suma y resta de todas las detracciones e imputs de caudal no atribuibles a la propia dinámica del ciclo hidrológico, sino derivados de la antropización del medio. Esta decisión, que podría ser la óptima, se ve muy condicionada por la existencia de información sobre la evolución en el tiempo de todas las intervenciones humanas significativas que se han producido en la cuenca, y verdaderamente no se conocen de forma suficientemente satisfactoria los usos y derivaciones del agua.

Indudablemente, este conocimiento es mayor en aquellas zonas donde la escasez ha exigido mayores controles e intervenciones públicas para la distribución de las aguas (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000), tales como las Demarcaciones del Júcar o el Segura, que de hecho tienen ya efectuadas satisfactoriamente tales restituciones y trabajan habitualmente a partir de los datos derivados de ellas.

A pesar de no poder usar sistemáticamente esta variedad de información por la carencia de los datos, más adelante se explicará la necesidad y la metodología utilizada en una sencilla restitución a los caudales naturales que hubo de ser aplicada en el seno de este trabajo para dos de las cuencas de estudio.

- Por otra parte, en otras zonas carentes de un inventario tan detallado de las intervenciones sobre los caudales, se pueden modelizar las aportaciones a partir de la previa parametrización de los factores del ciclo hidrológico que intervienen en ellas, fundamentalmente los elementos climáticos y las características físicas de la cuenca. Esta es la decisión que se ha tomado para la caracterización hidrológica en los documentos oficiales de planificación en gran parte de las Demarcaciones Hidrográficas desde que se pusiesen en marcha los preparativos para gran parte de los Planes Hidrológicos de Cuenca hace ya más de una década; pero no siempre se obtienen los resultados deseados, puesto que al comparar los datos provenientes de

algunos modelos utilizados con los datos reales del SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica) que sí corresponden a un régimen natural a menudo aparecen multitud de incoherencias recurrentes.

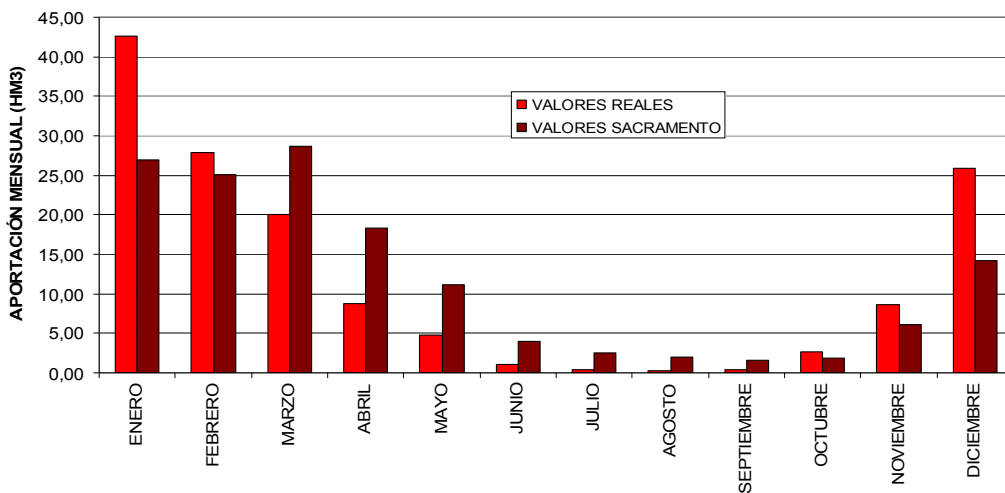
Es preciso incidir en que el cálculo y modelización de las aportaciones naturales de los ríos no es una tarea fácil, y prueba de ello es que en ocasiones estas estimaciones varían para un mismo ámbito según el organismo que las ofrece o las fechas de elaboración. En cualquier caso, se debe considerar que cuando los recursos hídricos no pueden medirse de forma directa y han de ser estimados, siempre se introduce un grado de incertidumbre que, no obstante, no debe ser desmedido. Estas disparidades e inexactitudes son lógicas teniendo en cuenta, en primer lugar, las diferentes series de datos de entrada sobre las que se aplica la estimación para hallar la esorrentía y, en segundo lugar, que aún empleando las mismas series pueden usarse diferentes modelos, por lo que sería exigible una homogeneidad en este sentido (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000).

Un ejemplo de ello es el caso de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, que trabajó con el modelo SACRAMENTO para hallar los inventarios de recursos hasta 1996, mientras que las estimaciones a nivel nacional fueron efectuadas con SIMPA - un modelo más reciente- que de hecho se ha usado para completar las series creadas por el primero en esta misma Demarcación (Argüelles Martín, A., 2007). La metodología de este tipo de modelos a menudo suele ser muy diferente entre sí; SACRAMENTO por ejemplo funciona estimando los valores a nivel de cuenca, y SIMPA es un modelo distribuido, donde el cálculo se realiza y acumula por píxeles en los que se divide el territorio.

Si se utilizan algunas de estas subcuencas de cabecera del Guadalquivir para evaluar la ejecución del modelo SACRAMENTO, se comprueba que aparece una enorme discrepancia entre los valores que devuelve dicho modelo y los valores reales de aportaciones a los embalses medidas por el SAIH para las mismas subcuencas. Obviando posibles errores puntuales de toma de datos en el punto de control, lo lógico es considerar que los valores de caudales reales medidos son correctos y expresivos de las aportaciones en régimen natural de las cuencas, siempre que estas no estén sometidas a desembalses/ detracciones aguas arriba, con lo que las diferencias demasiado grandes se pueden atribuir directamente a fallos de estimación del modelo.

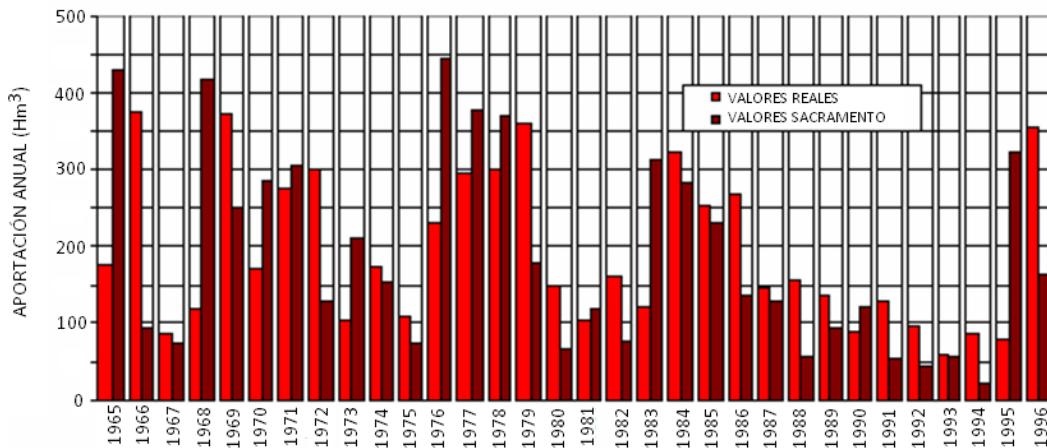
Se pone de manifiesto tanto la disparidad entre los regímenes hidrológicos medios que registran ambos tipos de datos en las diferentes cuencas (Ver Figura 4.1), como la que muestran los valores totales anuales en las mismas (Ver Figura 4.2). Asimismo, se reflejan estos contrastes en los diagramas de dispersión de los valores mensuales y anuales (Ver Figura 4.3), de los cuales se desprenden muy bajos coeficientes de correlación de Pearson (r) y determinación (r^2), siendo este hecho una constante en las cinco cuencas en que se testó.

FIGURA 4.1: Comparación de regímenes de aportaciones reales y estimadas mediante el modelo precipitación- escorrentía SACRAMENTO al embalse de Guadalmellato durante el periodo común 1965-1996.



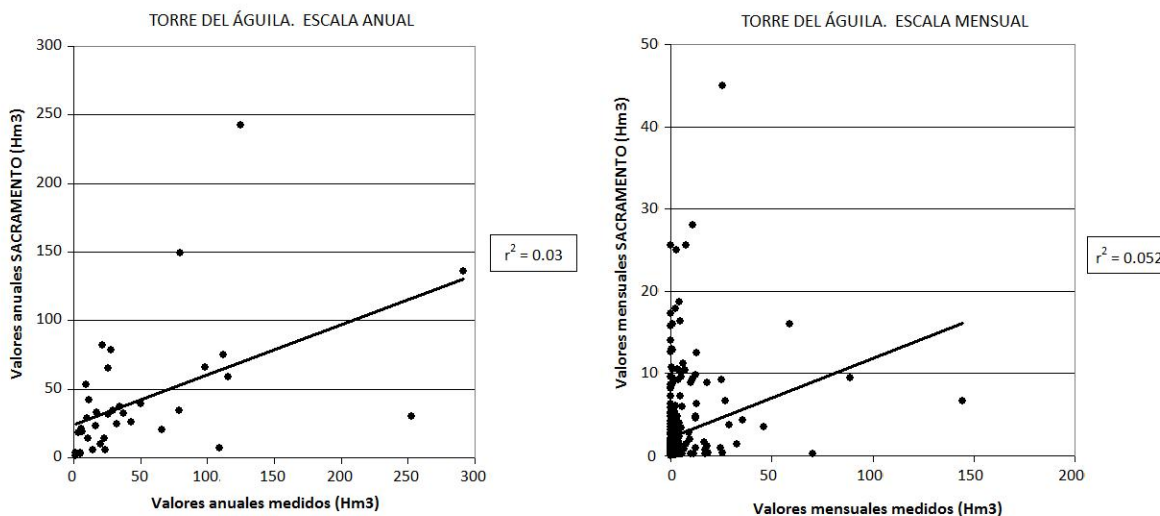
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 4.2: Comparación de los totales anuales de aportaciones reales y estimadas mediante el modelo precipitación- escorrentía SACRAMENTO al embalse de Tranco de Beas durante el periodo común 1965-1996.



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 4.3: Diagramas de dispersión de los valores reales frente a los estimados con el modelo SACRAMENTO a escala mensual (izquierda) y anual (derecha) en la cuenca de Torre del Águila.



Fuente: Elaboración propia.

Las pautas de diferenciación que se observan entre las aportaciones observadas y estimadas mediante el modelo SACRAMENTO pueden resumirse en las siguientes afirmaciones:

- Los años caracterizados como húmedos reflejan un caudal mucho más abundante en la realidad de lo que el modelo estima, mientras que con los secos sucede justo lo contrario. El modelo, por tanto, tiende a nivelar la fuerte variabilidad que registra la aportación en estos ámbitos.
- Por lo general, los gráficos de regímenes hidrológicos de las cuencas también se encuentran demasiado homogeneizados si se construyen a partir de los datos de aportaciones estimadas mediante el modelo SACRAMENTO; la variabilidad intermensual es generalmente mucho más acusada en la realidad y el estiaje de los cauces es mucho más acentuado de lo que se refleja.
- La estimación es peor en las cuencas con poca presencia de la componente hidrogeológica, y las que presentan cambios de pendiente, tales como Guadalmellato. Esto evidencia que la eficacia del modelo está probablemente sesgada por cuestiones de tipo físico relativas a la cuenca que no están completamente reflejadas por los

parámetros incluidos en él.

Además, se asume que los datos reales poseen mayor validez que los modelizados con SACRAMENTO a nivel de subcuenca, y no al contrario, simplemente porque se correlacionan mucho más con los de precipitaciones registradas en las áreas piloto (Ver Tabla 4.1) a diferentes escalas temporales, y la naturaleza de ambas variables impone que exista un nivel de conexión significativo. Además, todos los modelos de simulación de precipitación-escorrentía se basan en la precipitación, además de otras magnitudes climáticas y físicas en menor medida, como principales variables de entrada para el cálculo de la estimación, por lo que la relación debería ser bastante más estrecha de lo que es.

TABLA 4.1: Correlación entre las precipitaciones y las aportaciones mensuales; a la izquierda con los datos medidos de entrada a los embalses (SAIH, ROEA), a la derecha con los datos procedentes del modelo SACRAMENTO.

CUENCA	R DE PEARSON PRECIPITACIONES / APORTACIONES MEDIDAS	R DE PEARSON PRECIPITACIONES / APORTACIONES ESTIMADAS
TRANCO DE BEAS	0,709	0,212
GUADALMELLATO	0,703	0,273
BERMEJALES	0,704	0,287
EL PINTADO	0,623	0,370
TORRE DEL AGUILA	0,630	0,301

** Intervalo 1960- 1996.
Fuente: Elaboración propia.*

Todas estas cuestiones expuestas reflejan que, pese a que se ha demostrado que a nivel espacial de toda la Confederación del Guadalquivir las estimaciones tienen una calidad más que aceptable, no resulta así para las cinco subcuencas de cabecera revisadas y se deduce que probablemente tampoco para ninguna otra situación de tanto detalle espacial, por lo que no es lo suficientemente adecuado como para utilizar sus valores en los análisis posteriores.

Por ello, en adelante se usan las aportaciones observadas en los embalses hacia los que drenan las cuencas seleccionadas, pese a que haya que limitarse a usar aquellas que no posean detracciones importantes o caudal procedente de desembalses aguas arriba que distorsionen los valores en régimen natural.

Cabría realizar también una evaluación del ajuste a los datos medidos de los resultados devueltos por el modelo SIMPA, dado que es este el utilizado en la actualidad para la evaluación de la escorrentía en régimen natural en toda la Península, pero la información a nivel de subcuenca no se encuentra disponible libremente y desde luego resulta de menor interés la evaluación de la sequía hidrológica a escala de la Demarcación completa, dado que presumiblemente se enmascararían particularidades locales que nos interesa aclarar.

Todos estos inconvenientes mostrados por los datos estimados o restituidos, junto con la sencilla disponibilidad de los datos reales de aforo a la entrada de los embalses de la red ROEA, proporcionados directamente por la web del S.I.A. (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012c), han propiciado que finalmente se haya utilizado esta información para el presente trabajo.

4.2. LAS PRECIPITACIONES.

Tanto para comprender el significado de este concepto básico como para el caso de las aportaciones, es preciso que consideremos su definición en el *Libro Blanco del Agua* (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000), documento que- como ya se ha adelantado- usa datos técnicos fiables y actualizados de situaciones, así como criterios y problemas del agua frecuentemente desconocidos o no reunidos hasta entonces de una forma tan sistemática y crítica en un texto para el debate a nivel nacional.

Siguiendo este documento, entendemos por precipitación la cantidad de agua caída en una zona determinada, ya sea en forma de lluvia, nieve, granizo o rocío. Aplicado este concepto a una cuenca hidrológica, ésta sería el agua que cae dentro del territorio delimitado por sus divisorias de aguas.

4.2.1. Las series de observación de la precipitación. Características generales.

Los datos que se utilizarán en este trabajo son cedidos por AEMET originariamente a nivel temporal diario y expresados en litros por metro cuadrado o milímetros. A partir de ellos se confecciona la base de datos mensual MOPREDAS, de la cual emanan los datos usados aquí.

En el interior de las divisorias de las 29 subcuencas hay un total de 127 estaciones secundarias disponibles en MOPREDAS, pero solamente 70 de ellas poseían inicialmente datos para el total de los años considerados en este estudio (1957- 2005), con lo cual serán solamente estas las que se seleccionarán de la base de datos, con la pretensión de cuidar la precisión y originalidad de los datos.

Además, en lugar de finalmente usar todas las incluidas en una cuenca para la caracterización de la precipitación en la misma, se efectuó la media aritmética de los valores mensuales de estas para crear una sola serie promedio. La decisión estuvo motivada por la elevada correlación existente entre los observatorios pertenecientes a una misma cuenca y que desestima la idea de utilizar varias estaciones para una misma cuenca hidrográfica.

En el Anexo que se acompaña a este documento, concretamente en el apartado 2.3, se muestra una tabla con las características de las series que han sido usadas para la caracterización pluviométrica de las cuencas de estudio (mitad izquierda) y también las correlaciones que aparecen entre las pertenecientes al territorio de una misma cuenca (derecha).

Indudablemente, parte de la información de estas series ha sido rellenada y corregida por los autores de la base de datos con ayuda de las series más afines- coincidiendo en muchos casos con las más próximas y pertenecientes a una misma cuenca- por lo que al compararlas es posible que se detecten ciertas sobre correlaciones entre las series vecinas. No obstante, este fenómeno no se manifestará en exceso teniendo en cuenta que solamente incluimos series que antes de la calibración poseían ya una gran corrección y completación.

El hecho de que se perciban altas correlaciones entre las series válidas de una misma cuenca demuestra que haber prescindido de las que no están completas para el periodo de estudio no implicará un fuerte error a la hora de definir el comportamiento de la precipitación en las cuencas. Por lo tanto, se considera que los promedios confeccionados a partir de las series válidas poseen representatividad suficiente para caracterizar con ellos las precipitaciones.

De hecho, en las cuencas donde se aprecia una mayor variabilidad entre las series mensuales de las diferentes estaciones, el r de Pearson se encuentra siempre por encima del 0,55. Se trata en concreto de las cuencas que drenan hacia los embalses de Fuensanta y Talave, colindantes. En ambos casos, dicha variabilidad se debe a fenómenos de sombras

pluviométricas y de precipitaciones locales asociadas a la orientación SW- NE de los ejes de las cordilleras de la cabecera del Segura, que actúan como barrera parcial y dificultan la penetración de los vientos húmedos del oeste; estos vientos descargan importantes volúmenes de precipitación a barlovento de dichas sierras y en algunos valles encajados transversales, pero llegan muy secos a los sectores más orientales de las cuencas (Confederación Hidrográfica del Segura, 2012).

Como último paso, se ha testado la correlación entre todas las series promedio de precipitación por cuenca a nivel de detalle mensual, comprobándose que en líneas generales se aprecian unos coeficientes bastante elevados, existiendo en 28 de los 29 casos al menos otra cuenca con la que cada serie arroja un coeficiente de correlación de Pearson significativo (Ver Tabla 4.2).

Las series más discordantes bajo este enfoque son las de Alfonso XIII, La Cierva, Talave (si bien se ajustan las tres bien entre sí, con unos coeficientes de Pearson siempre superior a 0,7), Ebro y, sobre todo, la serie perteneciente a la cuenca de Riudecanyes, la cual muestra unos coeficientes por debajo de 0,4 con el resto de cuencas. Estas singularidades y sus correspondientes explicaciones climatológicas se examinarán y se aclararán pormenorizadamente en los apartados correspondientes a los regímenes pluviométricos.

TABLA 4.2: Correlaciones entre las series mensuales promedio de las cuencas de estudio.

	ALLOZ	ARLANZON	BARRIOS DE LUNA	BERMEJALES	BURGOMILLODO	CAMPORREDONDO	CERVERA RUESGA	CUBILLAS	CUERDA DEL POZO	EBRO	EL BURGUILLO	EL PINTADO	EL VADO	ENTREPEÑAS	FUENSANTA	GABRIEL Y GALÁN	GASSET	GUADALMELLATO	LA CIERVA	LA PEÑA	LA TOBA	LINARES DEL ARROYO	PALMACES	RIUDECANYES	SANTA TERESA	TALAVE	TORRE DEL ÁGUILA	TRANCO DE BEAS
ALFO. XIII	0,15	0,11	0,08	0,32	0,19	0,07	0,08	0,32	0,13	0,14	0,19	0,27	0,19	0,28	0,57	0,10	0,32	0,25	0,85	0,08	0,22	0,19	0,25	0,41	0,20	0,83	0,25	0,28
ALLOZ	-	0,61	0,56	0,41	0,61	0,53	0,52	0,47	0,65	0,59	0,46	0,44	0,58	0,62	0,45	0,45	0,49	0,46	0,11	0,71	0,58	0,63	0,62	0,40	0,51	0,32	0,48	0,50
ARLAN.	-	-	0,79	0,53	0,75	0,80	0,80	0,62	0,83	0,57	0,72	0,64	0,79	0,74	0,53	0,74	0,66	0,65	0,08	0,77	0,74	0,81	0,75	0,26	0,75	0,28	0,63	0,66
B. DE LUNA	-	-	-	0,54	0,67	0,91	0,87	0,59	0,77	0,63	0,74	0,63	0,75	0,67	0,53	0,78	0,61	0,63	0,05	0,69	0,69	0,71	0,64	0,16	0,77	0,22	0,61	0,63
BERMEJ.	-	-	-	-	0,47	0,58	0,52	0,84	0,51	0,35	0,75	0,83	0,71	0,63	0,68	0,68	0,78	0,88	0,26	0,46	0,68	0,50	0,58	0,31	0,71	0,48	0,89	0,72
BURGOMI.	-	-	-	-	-	0,66	0,63	0,61	0,78	0,46	0,63	0,59	0,75	0,76	0,57	0,64	0,64	0,60	0,15	0,69	0,75	0,91	0,78	0,30	0,71	0,36	0,58	0,67
CAMPORR.	-	-	-	-	-	-	0,94	0,60	0,76	0,54	0,81	0,70	0,79	0,68	0,49	0,85	0,67	0,69	0,04	0,71	0,71	0,71	0,68	0,16	0,81	0,22	0,66	0,62
CERVERA R.	-	-	-	-	-	-	-	0,56	0,75	0,55	0,78	0,66	0,77	0,66	0,47	0,83	0,64	0,63	0,06	0,71	0,69	0,70	0,67	0,18	0,76	0,21	0,60	0,59
CUBILLAS	-	-	-	-	-	-	-	-	0,62	0,39	0,71	0,81	0,74	0,72	0,79	0,71	0,82	0,85	0,27	0,53	0,78	0,64	0,65	0,29	0,72	0,52	0,87	0,88
CUERDA D. P.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,46	0,67	0,63	0,82	0,79	0,57	0,71	0,68	0,63	0,08	0,78	0,80	0,85	0,79	0,26	0,71	0,31	0,62	0,66
EBRO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,40	0,35	0,42	0,42	0,38	0,39	0,35	0,37	0,13	0,45	0,41	0,47	0,40	0,17	0,46	0,21	0,38	0,43
EL BURGUL.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,85	0,86	0,72	0,56	0,89	0,77	0,84	0,15	0,63	0,74	0,68	0,73	0,26	0,93	0,35	0,79	0,67
EL PINTADO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,82	0,69	0,65	0,82	0,85	0,91	0,23	0,55	0,74	0,62	0,69	0,29	0,82	0,45	0,89	0,74
EL VADO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,83	0,62	0,85	0,81	0,81	0,14	0,73	0,84	0,82	0,87	0,30	0,85	0,38	0,80	0,73
ENTREPE.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,70	0,70	0,80	0,72	0,22	0,75	0,91	0,83	0,87	0,43	0,75	0,51	0,70	0,76
FUENSAN.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,54	0,72	0,66	0,45	0,48	0,72	0,61	0,60	0,39	0,61	0,75	0,71	0,84
GABRIEL Y G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	0,81	0,08	0,64	0,75	0,69	0,69	0,21	0,88	0,26	0,77	0,70
GASSET	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,87	0,25	0,59	0,82	0,70	0,75	0,33	0,75	0,51	0,83	0,80
GUADALME	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,21	0,57	0,77	0,63	0,67	0,29	0,80	0,43	0,92	0,76
LA CIERVA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04	0,18	0,14	0,18	0,34	0,16	0,70	0,20	0,22
LA PEÑA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,73	0,75	0,73	0,41	0,65	0,28	0,56	0,58
LA TOBA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,80	0,80	0,36	0,76	0,46	0,77	0,81
LINARES D. A.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,86	0,33	0,76	0,38	0,62	0,71
PALMACES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,40	0,75	0,45	0,66	0,66
RIUDECA.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,30	0,47	0,31	0,26
SANTA TERESA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,38	0,77	0,72
TALAVE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,45	0,50
TORRE D. Á.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,80

* En rojo aparecen los r de Pearson superiores a 0,6.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Exploración de las precipitaciones en las cuencas de estudio.

Una vez examinadas las series que se usan en el estudio, se procede a establecer una primera aproximación al comportamiento de la precipitación en el ámbito de trabajo. Para identificar las diferencias entre las cuencas se ha utilizado no solo la comparación de los totales anuales, sino también la de los promedios mensuales de las mismas, ya que en ocasiones una mayor o menor regularidad de los regímenes puede enmascarar unos volúmenes muy extremos en algunas etapas del año que conviene también ser tenidos en cuenta.

En primer lugar, las *disimilitudes en los totales de precipitación* entre unas cuencas y otras es un factor diferenciador importante entre ellas que puede conducir a comportamientos hidrológicos dispares.

Por defecto, las cuencas más secas se corresponden con La Cierva, Alfonso XIII y Talave, de menor a mayor precipitación total respectivamente, presentando valores muy por debajo de los 500 mm. de precipitación anual promedio, anomalía propiciada por encontrarse al abrigo de los vientos húmedos atlánticos, siendo este un primer grupo muy diferenciado en cuanto a volúmenes.

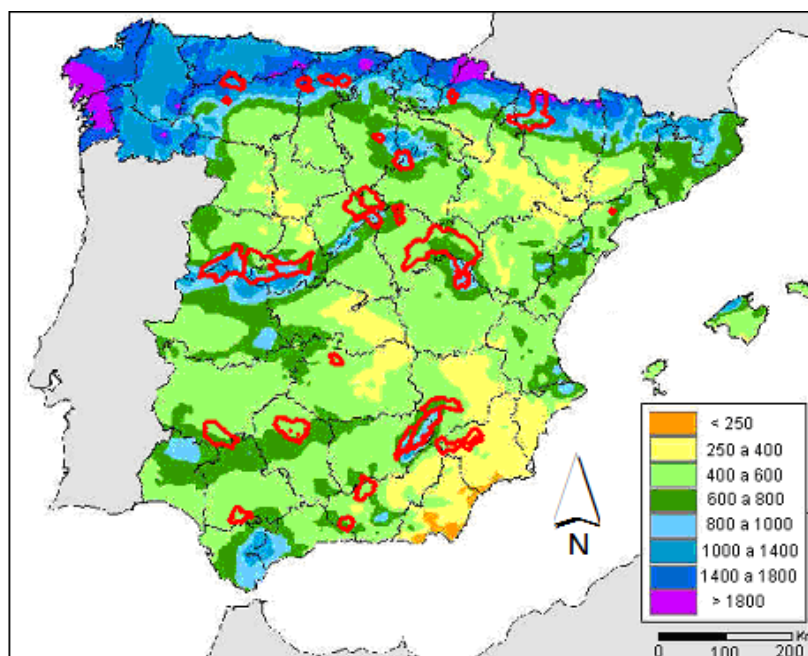
En segundo lugar aparece un número de cuencas bastante amplio y homogéneo cuyas precipitaciones totales anuales oscilan entre los 500 y los 800 mm., valores clasificables dentro de los estándares del dominio mediterráneo. Entran aquí las dieciocho siguientes cuencas: Alloz, Bermejales, Burgomillodo, Cubillas, Cuerda del Pozo, El Pintado, El Vado, Entrepeñas, Fuensanta, Gasset, Guadalmellato, La Toba, Linares del Arroyo, Palmaces, Riudecanyes, Santa Teresa, Torre del Águila y Tranco de Beas.

Por otro lado, aparece otro grupo de cuencas que oscila entre los 950 y los 1.150 mm., considerándose una humedad por encima de la media del clima mediterráneo. Estas son: Arlanzón, Barrios de Luna, Camporredondo, Cervera Ruesga, Ebro, El Burguillo y la Peña. Son las cuencas de montaña correspondientes a las latitudes más septentrionales del dominio mediterráneo en la Península Ibérica, donde se registran abundantes precipitaciones, asociadas también al hecho orográfico (Ver Figura 4.4).

Y finalmente destaca el caso particular de la cuenca de Gabriel y Galán donde aparecen volúmenes por encima de los 1.600 mm. anuales de media debido a la importancia del efecto Föhn en la Sierra de Francia (Sistema Central). Este total anual se explica porque los volúmenes de precipitación promedio no bajan de los 100 mm. desde septiembre hasta mayo.

Para mayor detalle sobre la ubicación y características de las cuencas acudir al Anexo.

FIGURA 4.4: Precipitaciones totales anuales en el entorno de las cuencas de estudio.



Fuente: Elaboración propia usando como fondo cartográfico el Mapa de precipitaciones totales anuales promedio en la Península y Baleares desde 1971- hasta 2001 (Agencia Española de Meteorología, 2012).

Como acompañamiento a este análisis también ha sido testada la *autocorrelación de los valores totales anuales* de precipitación en cada subcuenca, detectándose cierto nivel de dependencia temporal en algunas cuencas de la mitad norte peninsular, curiosamente no siempre directo (Ver Tabla 4.3), si bien la mayoría de las series se muestran como completamente aleatorias a esta escala y por tanto en ellas no puede mejorarse la predicción de la pluviometría del año siguiente considerando la de los anteriores (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000).

La autocorrelación parcial, que elimina los efectos producidos por retardos anteriores al considerado, introduce otras nuevas series en las que se percibe correlación significativa a retardos superiores al de un solo año, si bien también se desechan algunas otras que habían destacado en el análisis de autocorrelación simple. En conclusión, no puede asumirse directamente la hipótesis de total independencia temporal de los valores anuales de precipitación, lo que incentiva el interés en comprobar posteriormente qué sucede a esta escala temporal con la escorrentía en las cuencas donde se ha identificado esta autocorrelación significativa.

TABLA 4.3: Cuencas que presentan autocorrelaciones totales (arriba) y parciales (abajo), expresándose el retardo al que estas aparecen y su coeficiente de autocorrelación.

CUENCAS QUE PRESENTAN AUTOCORRELACIÓN ANUAL SIGNIFICATIVA (P-VALOR 0,01)	RETARDO (AÑOS)	COEFICIENTE DE AUTOCORRELACIÓN
ARLANZON	1	0,433
	2	0,116
BURGOMILLODO	6	0,247
RIUDECANYES	6	-0,283
EBRO	1	0,408
RIUDECANYES	6	-0,283
CUENCAS QUE PRESENTA AUTOCORRELACIÓN PARCIAL ANUAL	RETARDO (AÑOS)	COEFICIENTE DE AUTOCORRELACIÓN
ALFONSO XIII	6	-0,32
ARLANZON	1	0,43
BARRIOS DE LUNA	3	0,34
EBRO	1	0,41
EL BURGUILLO	5	-0,34
LA CIERVA	6	-0,33

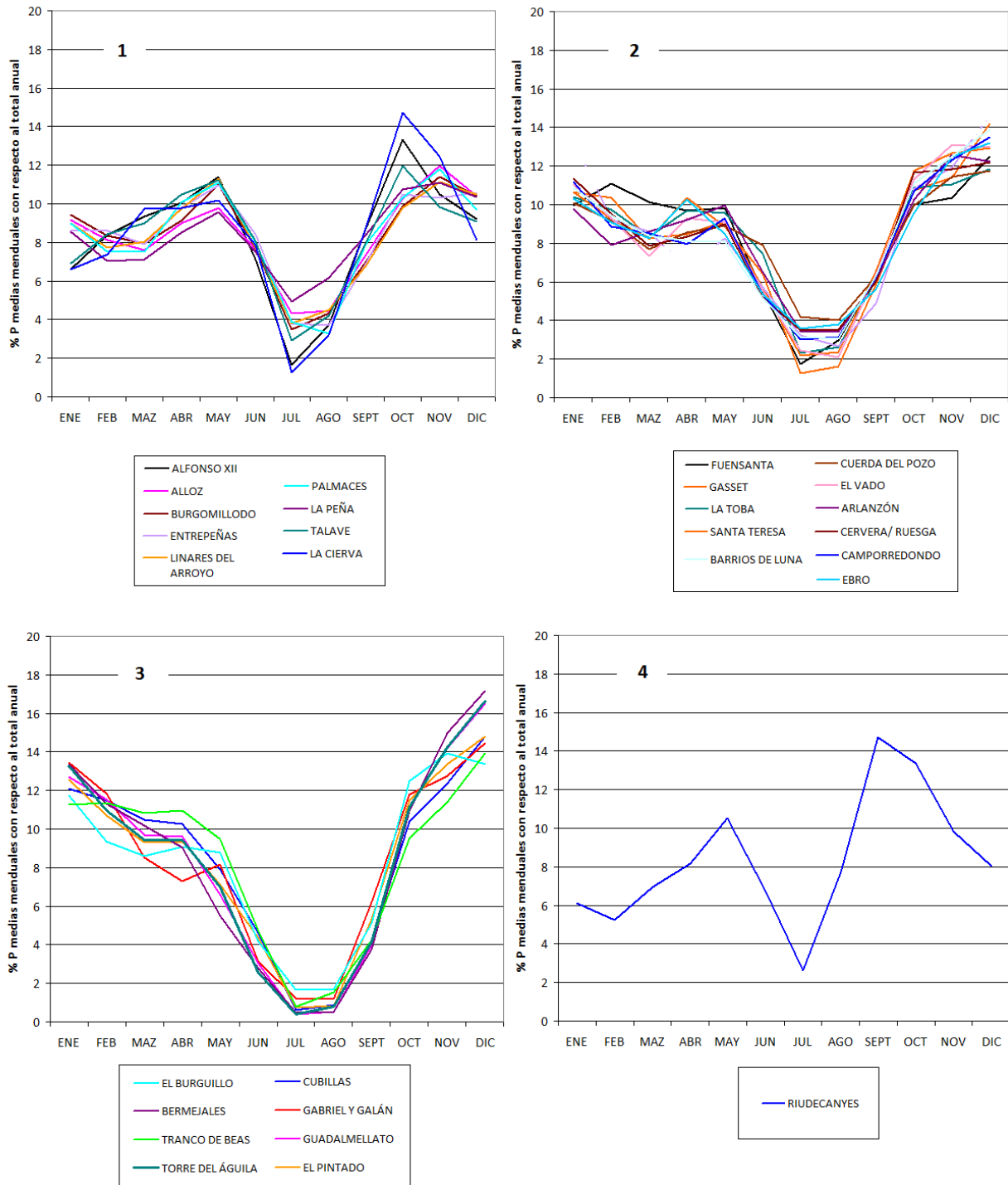
Fuente: Elaboración propia.

Una vez evaluado el fenómeno de las precipitaciones a escala anual, se procederá a una evaluación más detallada del mismo mediante la *observación del régimen pluviométrico* de las 29 cuencas piloto seleccionadas.

De dicho análisis se desprende que las mayores y más evidentes diferencias entre las cuencas aparecen en cuanto a los volúmenes totales y no tanto en lo relativo a los regímenes en sí, de ahí también las altas correlaciones entre las series mensuales de los 29 casos de estudio.

Pese a esto, para una primera aproximación, se han logrado separar mediante análisis de conglomerados jerárquicos 4 tipos de regímenes pluviométricos diferenciados, utilizando como variables el porcentaje de precipitación que supone cada mes con respecto al total anual (Ver Figura 4.5). Aunque son similares y concuerdan con los estándares del dominio mediterráneo, las diferencias entre ellos son matices asociados a distintas variedades dentro de esta clase.

FIGURA 4.5: Regímenes pluviométricos observados en las 29 cuencas de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Existe bastante continuidad territorial dentro de los regímenes delimitados, con muy limitadas excepciones.

El primero de los regímenes reconocidos se diferencia por una marcada sequedad invernal asociada a las altas presiones térmicas que se producen en estas fechas, atribuibles a la continentalidad y menor exposición a los vientos húmedos del oeste, ya que abarca- en su mayoría- cuencas a sotavento de los mismos. Le sigue un pico pluviométrico sostenido durante toda la primavera. Se aprecia la aridez estival propia del clima mediterráneo - si bien no es importante más que en julio y en mucha menor medida en agosto - y por último aparece el máximo absoluto en octubre o noviembre.

Los regímenes segundo y tercero tienen, por el contrario, sus máximos pluviométricos en invierno, diferenciándose entre sí por la intensidad y duración diferente de sus periodos de aridez estival. Así, en el tercero de los regímenes identificados – propio de las cuencas más al sur- este fenómeno es muy acusado y se prolonga desde mayo/ junio hasta septiembre, mientras que en el segundo régimen pluviométrico la aridez dura en torno a un mes menos y es menos intensa. Esto es debido a que la acción de las altas presiones subtropicales en torno al verano es más marcada al sur de la Península Ibérica, por razones meramente latitudinales.

Y por último, el cuarto de los regímenes identificados en los casos de estudio, apreciable solamente en la cuenca de Riudecanyes, destaca por una enorme variabilidad pluviométrica intermensual. En primer lugar, encontramos un mínimo de precipitaciones en invierno, tal y como ocurría en el primer régimen identificado. No obstante, este es aún más acentuado debido a que se trata de una cuenca ubicada en las laderas este de las Cordilleras Costeras Catalanas, al este de la Península, área en la que los *westerlies* llegan ya aún más secos porque han descargado un importante volumen en su largo recorrido continental y también al oeste de estas sierras. Seguidamente, se observa una recuperación primaveral e inmediatamente comienza a excavarse la esperable aridez estival mediterránea, si bien reviste poca importancia excepto en julio, puesto que agosto ya muestra un volumen importante de precipitaciones (registrando una media superior a 40 mm.). De hecho, el máximo absoluto aparece mucho antes que en el resto de regímenes, en septiembre, debido al enfriamiento diferencial del agua y la tierra al final del verano; este fenómeno a menudo origina en las costas del Mar Mediterráneo occidental intensas bajas presiones térmicas al llegar el otoño.

Este proceso se conoce como DANA y en el área del embalse de Riudecanyes además se ve acentuado por la importante orografía de la Cordillera Costera Catalana.

En el siguiente epígrafe podremos comprobar hasta qué punto estos mismos patrones se reproducen en la escorrentía de las cuencas.

4.3. LAS APORTACIONES HÍDRICAS.

Se puede definir como *aportación, caudal o escorrentía* en un punto de la red fluvial al volumen de agua que éste recibe, es decir, que pasa por dicho punto durante un periodo de tiempo. En el régimen natural esta aportación comprenderá la suma de escorrentía superficial directa de toda la cuenca situada aguas arriba, y la escorrentía subterránea que se incorpora a los cauces también aguas arriba de ese punto, normalmente más modesta en términos cuantitativos.

Todo esto conduce a pensar, siguiendo el *Libro Blanco del Agua* (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000), que la relación fundamental que la acopla con la magnitud precipitación de la que procede no es otra que la evaporación, cuyo porcentaje respecto de lo precipitado determinará las salidas del sistema, es decir, el agua que no se convertirá en ningún caso en aportación de la red fluvial. No obstante, otra magnitud principal que controla la escorrentía es la percolación a los acuíferos, si bien desde ellos se devolverá parte del agua a la red a posteriori en forma de aportación subterránea, con un retardo que dependerá del tiempo de residencia del acuífero en particular, y que a su vez es determinado por las características físicas del mismo.

4.3.1. Las series de observación de la aportación. Características generales.

Como ya se ha adelantado, para este trabajo se usan las series de aportaciones medidas por la ROEA (Red Oficial de Estaciones de Aforo) en las estaciones de entrada a los embalses a los cuales desembocan las cuencas. La red de medición de este sistema tiene más de 1.300 puntos de control de mediciones foronómicas en cauces, derivaciones y embalses cuyos datos se almacenan en la base de datos del Centro de Estudios y Experimentación de

Obras Públicas (CEDEX), remontándose hasta principios del siglo XX en algunas de las series históricas (CEH CEDEX, 2012).

La idea de partida consiste en disponer de un número significativo de series en cuencas de cabecera bien distribuidas geográficamente y que al mismo tiempo garanticen un periodo suficientemente largo de estudio, de ahí que se seleccionaran previamente todas aquellas cuyas estaciones y embalses en la desembocadura se hubiesen puesto en funcionamiento antes de 1957 -para cuyo muestreo se consultó también la base de datos web del estado de los embalses españoles (Embalses.net, 2012)- con la intención final de analizar las series temporales desde 1950, preferiblemente, o pocos después. Esto condujo a la consideración de 32 estaciones de embalses iniciales, de las cuales hubo que desechar dos por no cumplir con las condiciones mínimas de completación, habitualmente establecidas en un umbral máximo del 5% de los datos vacíos, si bien en multitud de trabajos se relaja esta cifra hasta el 10% en series de más de cuarenta años (Eischeid *et al.*, 2000).

En los datos de caudales, además, es preciso ser particularmente exigente con los criterios de límite de lagunas en las series porque no es recomendable abusar del relleno de las mismas por medio de inferencia basada en otras series o en los valores normales de la propia serie en sí, puesto que se corre un mayor riesgo de realizar inferencias erróneas que el asumido con las precipitaciones, al existir un mayor número de variables implicadas en el fenómeno de la escorrentía. Subestimar estos matices mediante excesivo relleno estadístico podría implicar no obtener buenos resultados en los análisis posteriores, muchos de ellos conducentes precisamente a identificar y valorar dichos detalles.

Como última cuestión relativa a la consistencia de los datos, se ha revisado exhaustivamente que estas cuencas de cabecera no registren grandes detracciones o introducciones de caudales aguas arriba del embalse ajenos a los que corresponden a la propia escorrentía superficial o subterránea natural con la finalidad de no desvirtuar los resultados. Es evidente que no puede controlarse este aspecto en su totalidad, pero es preciso eliminar del estudio aquellas cuencas que evidencien una intervención excesiva a pesar de tratarse de cuencas de cabecera.

Las detracciones suelen deberse a captaciones en el canal para regulación, riego y pequeños abastecimientos, y para los casos de las cuencas que pasaron los anteriores cortes se advierte una presencia poco significativa de los mismos. Exclusivamente el caso de La Peña

podiera resultar conflictivo al poseer dos presas regulando el Gállego en Biescas y Sabiñánigo, pero son recientes, de muy pequeña entidad (una de ellas apenas alcanza el 1 Hm.³), hacia ellas drena solamente una mínima parte de la cuenca receptora y se ha comprobado en las series que sus salidas de embalse respetan el régimen natural (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012c; SAIH Ebro, 2012); por lo tanto, conviene mantener esta cuenca para no perder el único caso de estudio perteneciente a la alta montaña pirenaica.

Por el contrario, existen tres cuencas que comportan conflicto en el sentido inverso, pues registran trasvases a su favor aguas arriba del aforo de entrada al embalse: Villameca, Talave y Riudecanyes. En principio esto podría suponer un motivo de eliminación, pero es preciso evaluar técnicamente los trasvases en sí para tomar la determinación más conveniente a efectos del estudio.

El primero de los casos de estudio, Villameca, tuvo que ser eliminado del estudio por encontrarse el punto de trasvase desde el río Valdesamario muy aguas arriba del aforo (Confederación Hidrográfica del Duero, 2011), lo cual puede implicar enormes inexactitudes si simplemente se detrae mensualmente el agua trasvasada de las entradas al embalse.

En cambio, tanto la cuenca de Riudecanyes (que recibe caudales del Ciurana) como la de Talave (receptora del trasvase Tajo- Segura) tienen sus respectivos canales de trasvase muy próximos al punto de aforo de entrada al embalse, siempre a menos de 500 m del mismo. Además, en ambos casos, los caudales trasvasados poseen un control a nivel diario, cuyos datos fueron cedidos para este estudio por la Agencia Catalana del Agua y la Confederación Hidrográfica del Segura respectivamente.

Una vez evaluada dicha información, se concluyó que resulta lo suficientemente fiable como para realizar sin lugar a equívocos la detección- simplemente restando- sin que esto afecte significativamente a la consistencia de los datos. Esto mantendría entre las cuencas de estudio a dos casos que revisten bastante interés: Riudecanyes por su localización muy diferente al resto de áreas piloto y Talave por la conveniencia de monitorizar densamente el cuadrante sureste del área de estudio al revestir una enorme vulnerabilidad asociada a la sequía. De hecho, según Gil Olcina, A. (2007) es “la zona más expuesta de la Península al riesgo natural de la sequía; muestra las frecuencias más elevadas y, por término medio, los episodios

de mayor intensidad y duración". Las cifras correspondientes a los trasvases aparecen detalladas en el Anexo a escala de medición mensual.

Finalmente, se cuenta con una base de datos de aportaciones naturales a 29 embalses que logran cumplir los preceptos establecidos. Las series originales poseen unas características muy heterogéneas, si bien el hecho de utilizar un periodo común de coincidencia (1957- 2005) reducirá dichas disparidades a las que simplemente impongan las propias características hidrológicas de las cuencas (Ver Tabla 4.4).

Tal y como se aprecia en la tabla, las series son bastante largas en todos los casos y por ello el reducir el periodo de estudio a la longitud de la menor (Gabriel y Galán) no supone una merma demasiado importante.

Se percibe alguna anomalía en el cálculo del coeficiente de escurrimiento para algunas cuencas, como por ejemplo las correspondientes a Barrios de Luna, Camporredondo y sobre todo Alloz y Cervera Ruesga (con coeficientes superiores al 100%) ya que físicamente es imposible que tales porcentajes de la precipitación se conviertan en escurrimiento; de hecho el porcentaje suele oscilar entre los valores que ofrecen el resto de áreas piloto, por lo que deducimos que se está subestimando ligeramente el volumen de precipitaciones que caen en la cuenca al estar usando solamente observatorios por debajo de la media altitudinal de la misma.

Una parte importante de los recursos hídricos se genera en las cabeceras de las cuencas, por encima de donde se sitúan los embalses, mientras que las estaciones pluviométricas se localizan preferentemente en los valles y junto a los cauces. La utilización directa de los datos registrados en estas estaciones a menudo da lugar a una infravaloración importante del volumen de precipitación, debido al fuerte gradiente de aumento de la lluvia con la altitud (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000). No obstante, dicha subestimación no influirá en la representación de la sequía porque este fenómeno se detecta midiendo anomalías significativas con respecto a valores normales y no datos absolutos, y al haberse manifestado muy buenas correlaciones en los comportamientos de la diferentes series de la cuenca, estas anomalías también covariarán fuertemente.

TABLA 4.4: Características fundamentales de las series observadas de aportaciones a los embalses de las 29 cuencas piloto.

CUENCA	NÚMERO DE AÑOS COMPLETOS TOTALES (DENTRO DE 1957–2005)	APORTACIÓN MEDIA ANUAL (DAM. ³)	PREC. MEDIA ANUAL DE LA ESTACIÓN PROMEDIO (MM O DAM. ³ /KM. ²)	UPERFICE DE LA CUENCA (KM. ²)	APORTACIÓN ESPECÍFICA MEDIA ANUAL (DAM. ³ /KM. ²)	COEF. ESCORRENTÍA APROXIMADO (AP.ESP./PREC.)
ALFONSO XIII	47	7.360	365,10	838,59	8,78	0,02
ALLOZ	46	105.060	687,12	141,02	745,00	1,08
ARLANZON	46	75.330	1.024,41	104,71	719,42	0,70
BARRIOS DE LUNA	47	448.870	1.056,52	492,18	912,00	0,86
BERMEJALES	49	50.380	762,12	290,07	173,68	0,23
BURGOMI LLODO	46	97.340	666,72	806,96	120,63	0,18
CAMPORREDONDO	47	243.220	1.125,69	230,34	1.055,92	0,94
CERVERA / RUESGA	47	83.660	966,12	53,91	1.551,85	1,61
CUBILLAS	47	48.840	592,92	633,12	77,14	0,13
CUERDA DEL POZO	47	202.030	689,53	545,34	370,47	0,54
EBRO	45	329.200	1.002,09	463,18	710,74	0,71
EL BURGUILLO	49	411.710	991,47	1.064,61	386,72	0,39
EL PINTADO	49	122.390	613,49	1.119,60	109,32	0,18
EL VADO	48	176.700	799,33	378,01	467,45	0,58
ENTREPEÑAS	49	576.050	665,39	3983,31	144,62	0,22
FUENSANTA	47	232.520	601,96	1207,38	192,58	0,32
GABRIEL Y GALAN	49	907.180	1.640,69	1.848,24	490,83	0,30
GASSET	46	28.690	500,43	170,30	168,47	0,34
GUADALMELLATO	49	160.110	674,74	1.190,70	134,47	0,20
LA CIERVA	47	4.490	306,78	169,61	26,47	0,09
LA PEÑA	37	685.430	1.061,99	1.717,12	399,17	0,38
LA TOBA	49	111.820	831,28	365,96	305,55	0,37
LINARES DEL ARROYO	47	78.190	555,65	758,18	103,13	0,19
PALMACES	46	40.670	566,72	272,94	149,01	0,26
RIUDECANYES	42	8.520	542,82	28,98	293,83	0,54
SANTA TERESA	47	826.020	747,44	1.848,55	446,85	0,60
TALAVE	47	100.400	416,99	754,19	133,12	0,32
TORRE DEL AGUILA	49	47.940	588,01	441,48	108,59	0,18
TRANCO DE BEAS	49	194.000	780,46	525,11	369,45	0,47

**En rojo aparecen las incongruencias, que se detallan en el texto.
Fuente: Elaboración propia.*

Por otro lado, las cuencas de Alfonso XIII y La Cierva registran unos coeficientes de escorrentía muy bajos, por debajo del 10%, los cuales nos sugieren que, además de una importante evapotranspiración, pueden existir detracciones significativas del caudal no reflejadas expresamente en la planificación consultada previamente a la realización del presente trabajo (P. Hidrológicos de Cuenca, P. E. S., etc.) o quizás las que sí se expresan son más ostensibles de lo que inicialmente se supuso.

En ambos casos, el P. E. S. de la Cuenca del Segura (Confederación Hidrográfica del Segura, 2007b) refleja funciones de regadío y retorno intermitente que, si bien no suelen tener una gran importancia en términos de volumen, pueden estar influyendo de manera perceptible en los totales de entrada al embalse en el caso particular de estas dos cuencas, al ser de por sí bastante secas. En el capítulo correspondiente a la relación entre ambas variables estas dos cuencas habrán de examinarse para dilucidar qué está sucediendo.

En cualquier caso, se aprecia una relación directa entre la pluviometría total de las cuencas y los coeficientes de escorrentías obtenidos, fenómeno que también tendrá que ser explorado en el capítulo sucesivo. Previsiblemente puede deberse a que en las más secas cualquier leve detracción de agua resulta relativamente más perceptible en términos de proporción de precipitación que se convierte en escorrentía. Además, las cuencas de menores volúmenes de precipitación se asocian a la mitad sur del área de estudio, en la cual la componente evaporativa del ciclo es sensiblemente más importante.

Por otra parte, previamente a la homogeneización de las series, se han evaluado comparativamente las correlaciones de Pearson medidas a escala mensual (Ver Tabla 4.5), encontrándose que son por lo general bastante altas y sugieren un comportamiento aproximadamente parejo. Cada cuenca siempre arroja valores superiores a 0,6 (por ende, suficientemente significativas) con alguna otra cuenca, excepto en los casos de Alfonso XII, La Cierva y Riudecanyes; presumiblemente serán estas cuencas en las que se distingan en lo sucesivo comportamientos y/o regímenes hidrológicos muy diferenciados.

TABLA 4.5: Correlaciones entre las series mensuales promedio de las 29 cuencas de estudio.

	ALLOZ	ARLANZON	BARRIOS DE LUNA	BERMEJALES	BURGOMILLODO	CAMPORREDONDO	CERVERA RUESGA	CUBILLAS	CUERDA DEL POZO	EBRO	EL BURGUILLO	EL PINTADO	EL VADO	ENTREPEÑAS	FUENSANTA	GABRIEL Y GALÁN	GASSET	GUADALMELLAT	LA CIERVA	LA PEÑA	LA TOBA	LINARES DEL ARROYO	PALMACES	RIUDECANYES	SANTA TERESA	TALAVE	TORRE DEL ÁGUILA	TRANCO DE BEAS	
ALFO. XIII	0,02	-0,02	0,04	0,06	0,03	0,03	0,03	-0,01	-0,01	0,05	0,07	0,1	0,06	-0,03	0,02	0,02	-0,01	0,05	0,57	-0,07	-0,03	-0,01	0,03	0,05	0,08	0,11	-0,01	-0,02	
ALLOZ	-	0,44	0,58	0,46	0,51	0,44	0,49	0,31	0,52	0,74	0,34	0,35	0,56	0,43	0,37	0,39	0,38	0,42	0,00	0,29	0,47	0,39	0,42	0,18	0,40	0,40	0,38	0,42	
ARLAN.	-	-	0,55	0,49	0,52	0,52	0,58	0,37	0,64	0,46	0,41	0,27	0,59	0,52	0,45	0,60	0,48	0,61	-0,01	0,19	0,57	0,45	0,50	0,09	0,55	0,41	0,47	0,48	
B. DE LUNA	-	-	-	0,52	0,70	0,89	0,85	0,41	0,78	0,69	0,53	0,47	0,79	0,65	0,56	0,72	0,51	0,49	0,01	0,49	0,70	0,62	0,58	0,12	0,77	0,58	0,38	0,60	
BERMEJ.	-	-	-	-	0,55	0,45	0,49	0,71	0,55	0,36	0,56	0,72	0,69	0,65	0,63	0,63	0,76	0,78	0,11	0,35	0,71	0,52	0,65	0,19	0,65	0,66	0,77	0,64	
BURGOMI.	-	-	-	-	-	0,61	0,72	0,51	0,79	0,55	0,55	0,49	0,87	0,83	0,76	0,75	0,65	0,59	0,05	0,57	0,85	0,91	0,84	0,18	0,74	0,75	0,52	0,79	
CAMPORR.	-	-	-	-	-	-	0,84	0,33	0,71	0,57	0,51	0,43	0,72	0,61	0,46	0,70	0,43	0,44	-0,02	0,55	0,62	0,54	0,53	0,12	0,82	0,46	0,32	0,49	
CERVERA R.	-	-	-	-	-	-	-	0,36	0,79	0,58	0,56	0,49	0,79	0,68	0,54	0,84	0,54	0,56	0,02	0,52	0,73	0,64	0,65	0,15	0,81	0,56	0,42	0,59	
CUBILLAS	-	-	-	-	-	-	-	-	0,45	0,26	0,38	0,44	0,53	0,60	0,70	0,45	0,65	0,57	0,05	0,45	0,64	0,54	0,59	0,15	0,47	0,68	0,65	0,67	
CUERDA D. P.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,55	0,51	0,49	0,84	0,79	0,70	0,77	0,64	0,62	-0,01	0,56	0,85	0,77	0,73	0,20	0,74	0,65	0,50	0,74	
EBRO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,35	0,29	0,55	0,45	0,39	0,45	0,32	0,35	-0,04	0,30	0,48	0,47	0,44	0,11	0,47	0,41	0,26	0,41	
EL BURGUL.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,59	0,66	0,54	0,45	0,65	0,56	0,61	0,08	0,33	0,57	0,48	0,57	0,14	0,70	0,49	0,52	0,47	
EL PINTADO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,66	0,47	0,44	0,68	0,70	0,79	0,09	0,30	0,58	0,46	0,57	0,13	0,66	0,49	0,69	0,49	
EL VADO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,84	0,72	0,82	0,73	0,73	0,07	0,57	0,88	0,79	0,84	0,24	0,85	0,73	0,61	0,75	
ENTREPE.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,80	0,71	0,74	0,64	0,04	0,65	0,93	0,80	0,83	0,21	0,72	0,74	0,58	0,78	
FUENSAN.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,63	0,73	0,61	0,06	0,51	0,85	0,78	0,71	0,22	0,61	0,91	0,60	0,95	
GABRIEL Y G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,70	0,76	0,05	0,41	0,80	0,70	0,76	0,14	0,90	0,65	0,61	0,68	
GASSET	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,81	0,11	0,40	0,79	0,63	0,74	0,16	0,64	0,70	0,77	0,73	
GUADALME.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,10	0,33	0,73	0,58	0,70	0,21	0,70	0,62	0,85	0,62	
LA CIERVA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,04	0,03	0,01	0,05	0,01	0,07	0,12	0,09	0,03	
LA PEÑA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,61	0,58	0,55	0,35	0,52	0,47	0,32	0,46
LA TOBA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,83	0,84	0,22	0,76	0,81	0,66	0,86
LINARES D. A.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,81	0,19	0,67	0,78	0,50	0,80	
PALMACES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,22	0,72	0,71	0,63	0,71	
RIUDECA.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,25	0,17	0,20	
SANTA TERESA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,63	0,57	0,64	
TALAVE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,59	0,89	
TORRE D. Á.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,61	

* En rojo aparecen los r de Pearson superiores a 0,6.

Fuente: Elaboración propia.

En lo referente al *relleno de lagunas* en las series, teniendo en cuenta que todas las series poseen considerablemente menos de un 5% de valores vacíos excepto Riudecanyes y La Peña donde los valores oscilan en torno al 9%, aún aceptables (Eischeid *et al.*, 2000), se ha utilizado para la imputación la regresión lineal simple con aquellas series de los embalses de cabecera próximos a la cuenca objetivo que arrojaran unos coeficientes de determinación (r^2) con la misma por encima del 0,7, estuvieran estas o no incluidas entre las otras 28 cuencas piloto. Este procedimiento, teniendo en cuenta las condiciones de escasez de lagunas con las que se cuenta, se considera apto y conveniente para variables asociadas a la meteorología (Eischeid, J. K. *et al.*, 1995; Eischeid, J. K. *et al.*, 2000; Young, K. C., 1992); de hecho, sus buenos resultados han sido probados también concretamente para bases de datos de escorrentía a diferentes escalas temporales (Gyau-Boakye, P., 1993).

Sin embargo, para el *análisis de la calidad* de las mismas, en este caso se ha considerado preferible no establecer test de homogeneidad relativos para detectar posibles valores *outliers* de las series de los embalses, ya que, pese a las buenas correlaciones existentes entre unas y otras y pese a que para hallar lagunas dispersas puede resultar útil, los regímenes de escorrentía no son completamente iguales y se pueden considerar como inválidos por comparación datos que no lo son, o realizar inferencias incorrectas, y este es un estudio en el que los valores extremos revisten demasiado interés como para correr el riesgo de tomar por válido un valor erróneo y viceversa. Por tanto, para localización de los *outliers* en este caso se utiliza un test más sencillo y de carácter absoluto.

El test parte de la tipificación de los valores de aportaciones agregados a nivel mensual con respecto a un valor de aportación medio mensual calculado para todo el periodo, y se resaltan como posibles *outliers* aquellos datos que se alejen más de 5 desviaciones típicas de la media. Es evidente que se trata de un test poco preciso puesto que los caudales en el dominio mediterráneo tienen una enorme variabilidad estacional, pero el uso de esta técnica está bastante extendido como método eficaz y rápido de detección, y aparece incluso en estudios específicos sobre técnicas de homogeneidad en series climáticas, siendo estas aún más variables en muchos casos (Saladie, O. *et al.*, 2002). Además, se encuentran en Eischeid, J. K. *et al.* (1995) y en algunos documentos del Water Resources Council de Estados Unidos (U.S. Water Resources Council, 1981) similares pruebas de detección de valores erróneos para series temporales de escorrentías.

Los datos de aportación que se manifiesten como *outliers* según este método deben ser estrictamente cotejados con el valor de precipitación registrado para esa cuenca y mes, sin obviar lo sucedido en meses anteriores, así como con los caudales de otras cuencas en el mismo momento. Si el valor en cuestión continua resultando anómalo frente a estos debe considerarse su rechazo.

Es importante destacar que el hecho de haber forzado el periodo de estudio de manera que todos los embalses tuviesen suficientes datos medidos, y tratarse éste de un periodo en el que la toma de datos se ha llevado a cabo de forma bastante automatizada, ha supuesto el disponer de unos datos originales de gran calidad.

4.3.2. Exploración de las aportaciones en las cuencas de estudio.

Como primera aproximación se ha testado la *autocorrelación de los valores totales anuales* de aportación en cada subcuenca, hallándose mayor nivel de dependencia temporal de los valores que el identificado en las precipitaciones, casi en todos los casos de estudio (Ver Tabla 4.6- mitad superior). Esto tiene sentido de acuerdo con la naturaleza del fenómeno de la aportación, sobre todo contando con la fase subterránea del mismo, la cual actúa como reservorio y permite la regulación del caudal circulante y la persistencia en el tiempo de las condiciones de mayor o menor humedad en la cuenca.

La autocorrelación parcial, que elimina los efectos producidos por retardos anteriores al considerado, introduce otras dos series - Tranco de Beas y El Vado- entre las series en las que se percibe correlación significativa a retardos superiores al de un solo año, si bien también se desechan parte de las otras que habían destacado en el análisis de autocorrelación simple (Ver Tabla 4.6- mitad inferior).

Dado el gran número de cuencas que presentan esta característica estadística en sus datos, se ha tomado la determinación de hallar una correspondencia entre los coeficientes de autocorrelación y los rasgos físicos de las cuencas mediante análisis de regresión. El mejor modelo extraído de dicho análisis, con un *r* de Pearson de 0,5, pone en relación directa la autocorrelación anual de las aportaciones con la altitud media de las cuencas y el área total que la cuenca presenta una litología permeable. Este resultado es muy interesante y tiene pleno sentido dado que, tanto la acumulación nival (asociada lógicamente al carácter

montañoso y la altitud) como la subsuperficial, implican una amortiguación de la respuesta a la precipitación y una mayor regulación de la escorrentía en el tiempo, tal y como se sugirió precedentemente.

TABLA 4.6: Cuencas que presentan autocorrelaciones totales (arriba) y parciales (abajo), expresándose el retardo al que estas aparecen y su coeficiente de autocorrelación.

CASOS DE ESTUDIO CON AUTOCORRELACIÓN ANUAL SIGNIFICATIVA (P-valor 0,01)	RETARDO (AÑOS)	COEFICIENTE DE AUTOCORRELACIÓN	
ALFONSO XIII	1	0,478	
	2	0,287	
	5	-0,270	
	6	-0,369	
	7	-0,261	
	8	-0,263	
	9	-0,332	
	10	-0,332	
	11	-0,276	
	12	-0,286	
	ALLOZ	1	0,313
		4	0,293
BARRIOS DE LUNA	1	0,283	
BERMEJALES	1	0,283	
BURGOMILLODO	1	0,340	
	6	0,443	
CAMPORREDONDO	1	0,242	
CERVERARUESGA	1	0,401	
CUBILLAS	1	0,353	
CUERDA DEL POZO	6	0,225	
EBRO	1	0,623	
	2	0,360	
	3	0,310	
	4	0,345	
	5	0,270	
	11	-0,252	
EL BURGUILLO	1	0,255	
EL PINTADO	1	0,391	
ENTREPEÑAS	1	0,372	
	3	0,335	
	6	0,298	
FUENSANTA	1	0,394	
	3	0,329	
	6	0,356	
	7	0,290	

CASOS DE ESTUDIO CON AUTOCORRELACIÓN ANUAL SIGNIFICATIVA (P-valor 0,01)	RETARDO (AÑOS)	COEFICIENTE DE AUTOCORRELACIÓN
GABRIEL Y GALÁN	1	0,268
GUADALMELLATO	1	0,295
LA CIERVA	2	0,265
	6	-0,289
LA PEÑA	1	0,709
	2	0,614
	3	0,636
	4	0,484
	5	0,462
	6	0,458
	7	0,293
LINARES DEL ARROYO	1	0,421
	2	0,280
	3	0,282
	6	0,399
PALMACES	1	0,383
	3	0,308
TALAVE	1	0,408
	2	0,273
	3	0,425
	6	0,411
TORRE DEL ÁGUILA	1	0,346

CASOS DE ESTUDIO CON AUTOCORRELACIÓN <u>PARCIAL</u> ANUAL	RETARDO (AÑOS)	COEFICIENTE DE AUTOCORRELACIÓN
ALFONSO XIII	1	0,478
	5	-0,327
	11	-0,274
	12	-0,332
ALLOZ	1	0,313
BARRIOS DE LUNA	1	0,283
	5	0,27
BERMEJALES	1	0,283
	2	-0,25
	4	-0,292
BURGOMILLODO	6	0,356
CAMPORREDONDO	1	0,242
	5	0,273
CERVERARUESGA	1	0,401
CUBILLAS	1	0,353

CASOS DE ESTUDIO CON AUTOCORRELACIÓN <u>PARCIAL</u> ANUAL	RETARDO (AÑOS)	COEFICIENTE DE AUTOCORRELACIÓN
EBRO	1	0,623
EL BURGUILLO	1	0,255
EL PINTADO	1	0,391
	3	-0,255
EL VADO	7	0,293
ENTREPEÑAS	1	0,372
	3	0,288
FUENSANTA	1	0,372
	3	0,307
	4	-0,253
	5	0,256
GABRIEL Y GALÁN	1	0,268
GUADALMELLATO	1	0,295
LA PEÑA	1	0,709
	3	0,295
LINARES DEL ARROYO	1	0,421
	6	0,319
PALMACES	3	0,262
TALAVE	1	0,408
	3	0,336
	4	-0,225
	6	0,279
TORRE DEL ÁGUILA	1	0,346
TRANCO DE BEAS	3	0,271
	4	-0,274

Fuente: *Elaboración propia.*

El siguiente paso en nuestro análisis conduce a evaluar las aportaciones a escalas de mayor detalle temporal que la anual.

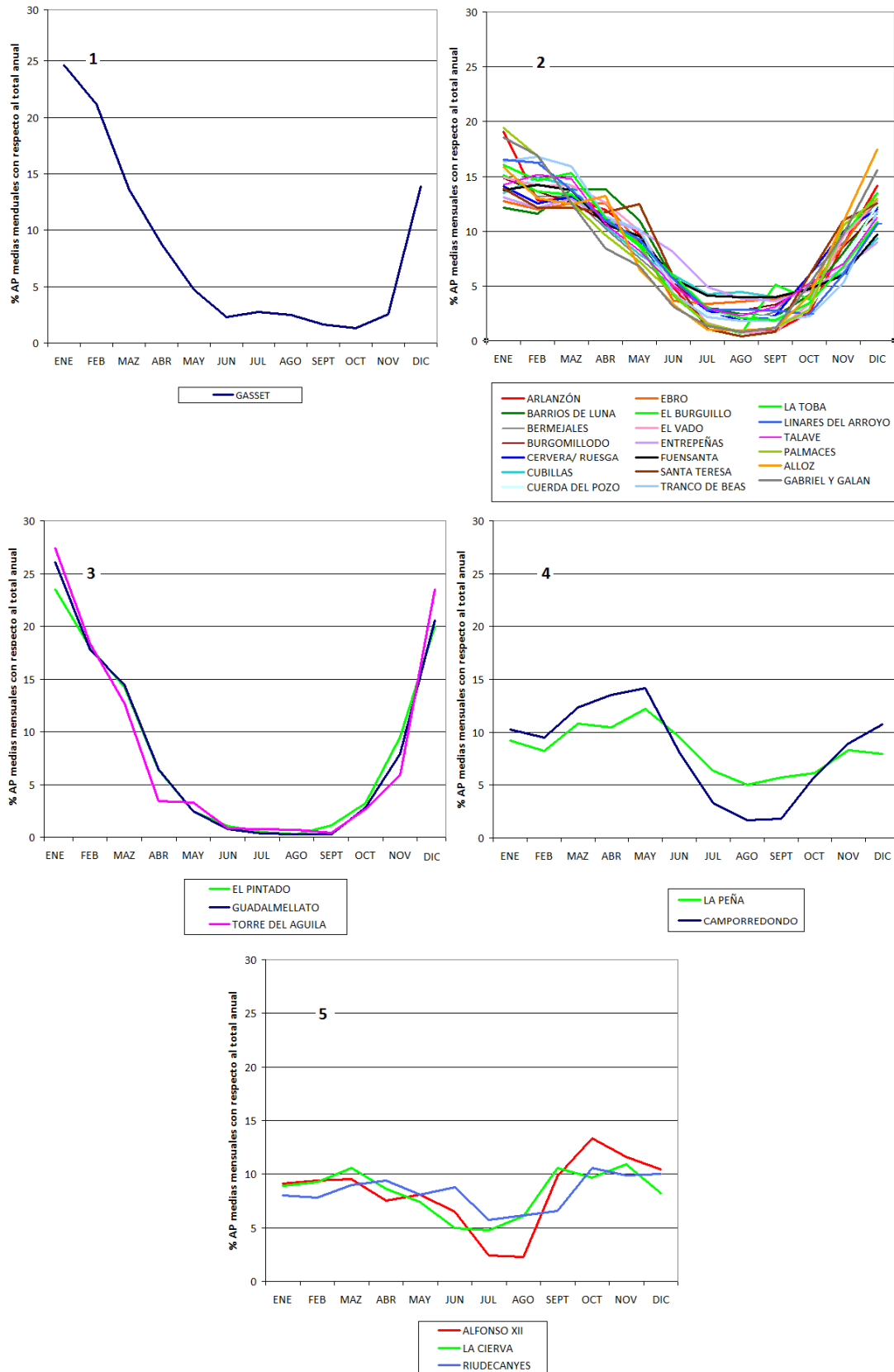
Dado que las aportaciones de entrada al embalse reflejan valores totales y no referidos a unidades de superficie, los valores registrados están muy afectados por el área de cuenca que drena hacia el punto donde se realiza la medición. Por esta razón no es ventajoso usar los valores totales mensuales y su interpretación sería difícil de llevar a cabo más allá de la

distinción entre cuencas extensas de mucho caudal o cuencas pequeñas de escaso. Así, usaremos dos modos levemente distintos a los usados para las precipitaciones a la hora de confrontar los datos mensuales entre las diferentes cuencas:

- Por una parte se confrontarán los regímenes hidrológicos de las áreas piloto a través del contraste del porcentaje de aportación que supone cada media mensual con respecto al total anual promedio de la cuenca. Este será el análisis comparativo más importante, puesto que conduce a evaluar los diferentes comportamientos hidrológicos.
- También se compararán las aportaciones específicas medias mensuales. El dato en sí es la aportación bruta media mensual prorrateada por el área en kilómetros cuadrados de la cuenca, reflejando el volumen promedio mensual de escorrentía que cada unidad de superficie aporta al sistema.

En primer lugar, se ha comprobado que existen cinco *regímenes hidrológicos* distintos, uno mayoritario y otros cuatro que revisten ciertas particularidades hidrológicas interesantes que se pormenorizarán en lo sucesivo (Ver Figura 4.6).

FIGURA 4.6: Tipos de regímenes hídricos observados en las cuencas de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Lo primero que destaca, aparte de que existe una mayor heterogeneidad de comportamientos y una mayor variabilidad intermensual que la observada en las precipitaciones, es la prolongación de la etapa seca hasta principios del otoño en prácticamente todos los regímenes, aproximadamente hasta un mes más tarde con respecto a la duración de esta en las precipitaciones, las cuales empezaban a remontar ya en septiembre.

Los regímenes hídricos 1 (Cuenca de Gasset) y 3 (Cuencas de El Pintado, Guadalmeñato y Torre del Águila) se localizan fundamentalmente en las cuencas del suroeste de la Península, son de carácter pluvial mediterráneo y se caracterizan por su variabilidad estacional extrema, explicada por una marcada aridez estival, contando en los meses de mayo a octubre con una escorrentía por debajo del 5% del total anual cada mes. La diferencia entre ambos es que dicha aridez es mucho más fuerte y prematura en las cuencas del régimen 3, mientras que en el 1 esta es más suave pero persiste hasta noviembre, teniendo este último régimen un otoño mucho más seco en general. El máximo absoluto en ambos regímenes es invernal, se produce concretamente en enero.

La explicación de que el régimen 1 la aridez estival comience y se prolongue tanto puede atribuirse al carácter algo más permeable del sustrato de la cuenca de Gasset, donde predomina la litología detrítica: areniscas, cuarcitas, conglomerados, arcillas y la litología carbonatada, fundamentalmente calizas y evaporitas. Esto provoca que en los meses de recuperación de la precipitación, gran parte del agua que cae en la cuenca se infiltre en las capas subsuperficiales para que tras la saturación, ya bien entrado el otoño y pasadas las primeras lluvias, comience la recuperación de la escorrentía superficial. El régimen 3, en cambio, se identifica en cuencas de mayor impermeabilidad.

El régimen 2 corresponde al grueso de las cuencas de estudio y es más regular que los anteriores; el mantenimiento de la humedad en la etapa primaveral es la clara diferencia con respecto a ellos, y aunque acusa la clásica sequía estival mediterránea, esta es menos profunda y solo es especialmente significativa de julio a septiembre. Una parte de la escorrentía primaveral pertenece al deshielo de las cumbres en los casos de las cuencas más septentrionales, pero no es el componente principal y no pueden considerarse regímenes mixtos, sino esencialmente pluviales de transición oceánica-mediterránea.

El régimen 4, perteneciente a las cuencas de alta montaña de Camporredondo y La Peña, es muy regular y posee una sequía estival más suave, pero su característica principal es

la existencia de un máximo absoluto de escorrentía en primavera, específicamente en mayo, propiciado por el deshielo de las cumbres. Son cuencas de régimen pluvionival.

Por último, el grupo número 5 se corresponde con los regímenes hidrológicos más homogéneos de entre los 29 casos de estudio, y pertenece a algunas cuencas del este de la Península en cuyos patrones hidrológicos se aprecia la incidencia de las lluvias del final del verano y comienzo del otoño, normalmente asociadas a la DANA, que provocan un pico de escorrentía en esos meses. No obstante, dicho extremo es suave porque la humedad caída se ha de repartir gradualmente en un subsuelo que se encuentra bastante seco y los excedentes tardan en apreciarse. Son cuencas bastante secas durante todo el año y es por ello también que no pueden registrar grandes oscilaciones en sus regímenes.

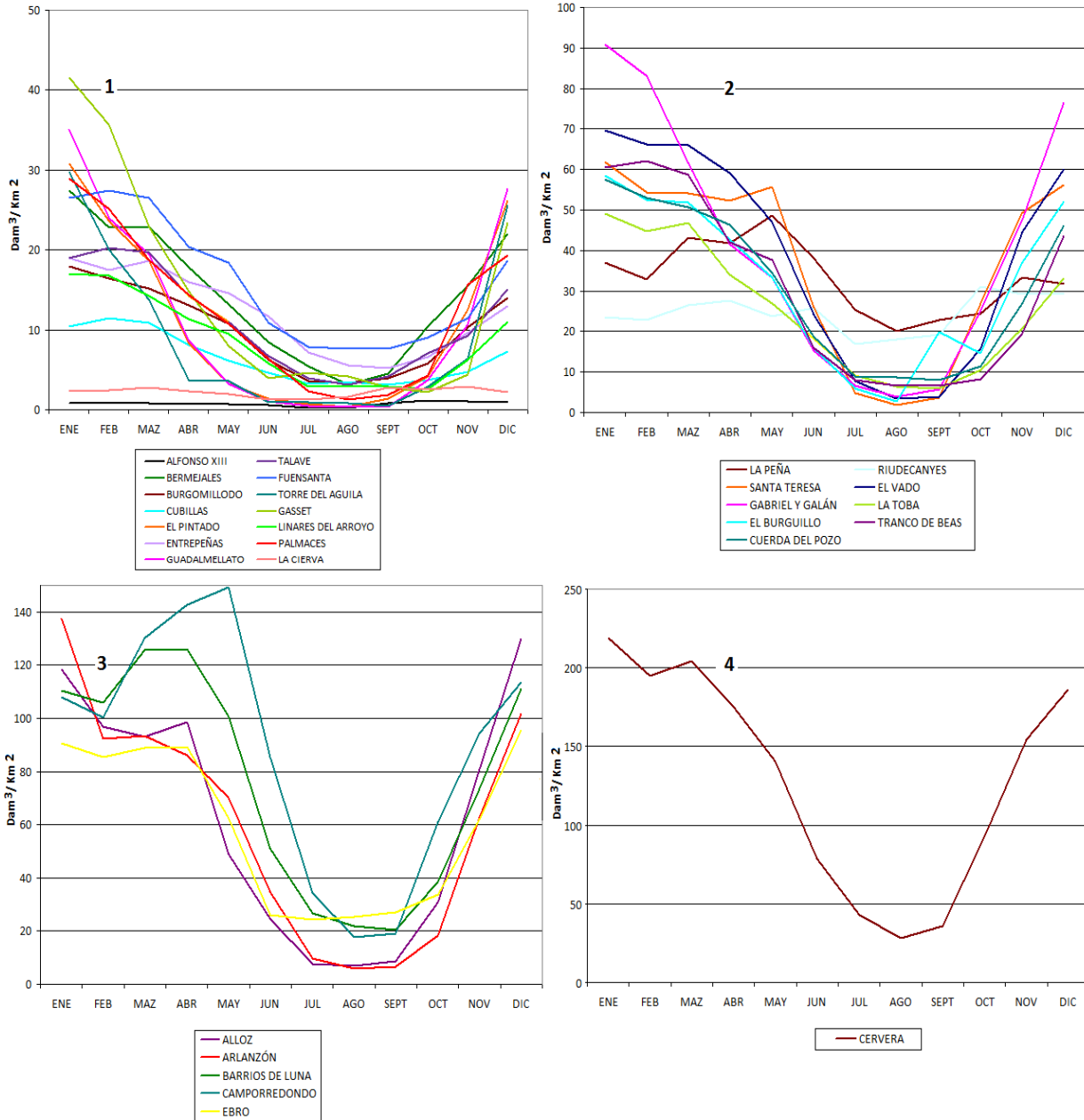
Una vez más existe cierta continuidad geográfica en ellos y esto implica que el factor climático determina en gran medida la hidrología de cuenca. Así, la distribución espacial de los regímenes resulta - a grandes rasgos- similar a la identificada en los patrones homólogos de las precipitaciones.

Aun así, mientras que el régimen predominante tiene una aridez estival solo acotada a los tres meses veraniegos, los demás introducen notorias diferenciaciones en esta característica no completamente coincidentes con la variabilidad espacial de la aridez pluviométrica en la Península identificada en el epígrafe anterior, atribuibles sin duda a las características físicas de las distintas cuencas. Esto es especialmente apreciable en los regímenes 1 y 5, casos singulares cuyas relaciones precipitación/ aportación deberán ser debidamente analizadas y fundamentadas en el siguiente capítulo.

Una vez efectuada la revisión de los regímenes, conviene examinar los *volúmenes totales de aportación* que circulan mensualmente en cada área piloto por *unidad de superficie*.

En este sentido, podemos diferenciar cuatro estándares entre las cuencas, que oscilan desde los extremadamente secos a otros de gran producción de escorrentía (Ver Figura 4.7).

FIGURA 4.7: Diferentes modelos de escorrentía según los volúmenes mensuales por kilómetro cuadrado de cuenca (aportación específica).

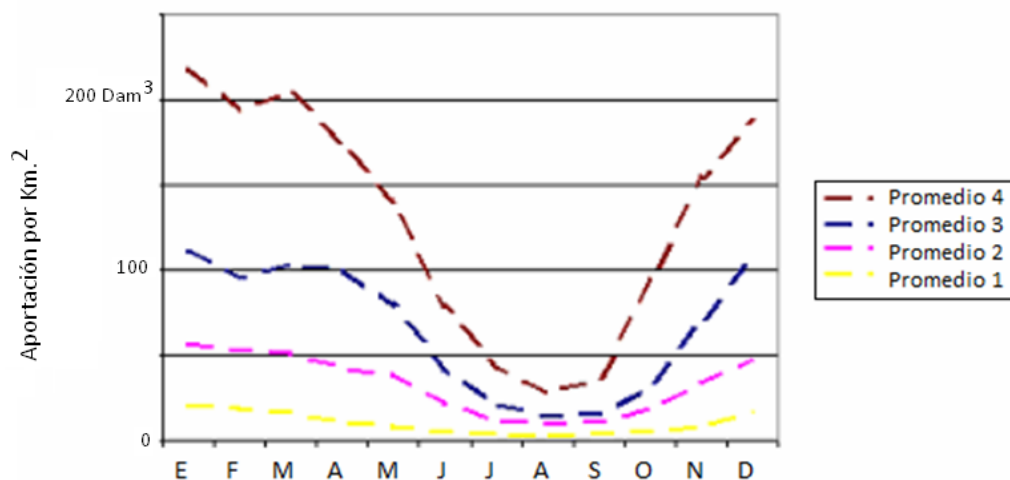


Fuente: Elaboración propia.

En la estación seca la variabilidad entre ellos es poca: desde la ausencia casi total de flujo en las cuencas del sur y el levante hasta 40 Dam.³ de media mensual en las más húmedas.

Sin embargo, estas diferencias se disparan si prestamos atención a los meses de mayores escorrentías a lo largo del año, en particular en primavera, cuando los modelos de carácter más húmedo destacan mucho con respecto al resto dado que pertenecen a cuencas de montaña más al norte, y muchas de ellas reciben aportaciones provenientes del deshielo de las cumbres en estos meses. No obstante, durante el invierno se percibe también una enorme diferencia en los volúmenes totales por kilómetro cuadrado (Ver Figura 4.8).

FIGURA 4.8: Promedios mensuales de las aportaciones específicas de todas las cuencas englobadas en cada uno de los cuatro modelos identificados.



FUENTE: Elaboración propia.

Como ejemplo fundamental de cuenca muy húmeda, destaca la cuenca de Cervera-Ruesga (régimen 4) por encima de las demás, doblando las escorrentías específicas del resto en la etapa invernal y primaveral, no solo debido al aporte de los deshielos y a las cuantiosas precipitaciones que caracterizan a la región, sino posiblemente también a aportaciones provenientes del macroacuífero de La Robla – Guardo, de límites mucho mayores a los de la propia cuenca. De acuerdo con la bibliografía especializada concerniente a este acuífero (DGOH-ITGE, 1994; ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2005; Sánchez San Román, J., 2006), los flujos subterráneos circulan predominantemente a favor del área en la que se encuentra la cuenca de Cervera- Ruesga, de manera que es más que posible

que sea esta afluencia lateral de volúmenes de agua que provienen de más allá de sus divisorias de agua la que ayude a explicar los coeficientes de escorrentía anómalamente altos que esta cuenca arrojó en la Tabla 4.6.

El modelo 3 corresponde a cuencas de montaña de la fracción norte del área de estudio y por ello es también muy húmedo pero más regular y se mantiene en los 100 decímetros cúbicos por kilómetro cuadrado en el periodo que comprende desde diciembre hasta abril, cuando experimenta un máximo ligeramente por encima de este valor atribuible a elevados volúmenes provenientes de la precipitación y la fusión nival.

El resto de modelos (1 y 2) son mucho más secos, percibiéndose una fuerte correspondencia entre las cuencas que en ellos se engloban y las identificadas como pluviométricamente más áridas en los epígrafes anteriores, lo cual indica que en términos generales se cumplen los preceptos básicos del ciclo hidrológico que ponen en relación ambas variables; no obstante, también resulta útil identificar y describir las cuencas y situaciones concretas en las que esta correspondencia no se produce o se aprecia distorsionada en el tiempo, siendo este uno de los procedimientos a acometer en el siguiente capítulo.

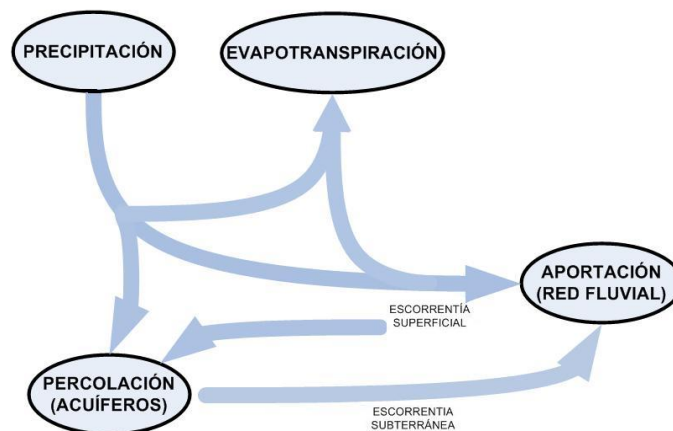
Capítulo 5

Relaciones entre las variables en el ámbito de estudio

5.1. HIPÓTESIS SOBRE LA RELACIÓN Y CONEXIÓN ENTRE LAS VARIABLES PRECIPITACIÓN Y APORTACIÓN A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES.

Como consecuencia de todo lo establecido en los apartados precedentes, es posible afirmar que existe una conexión real entre los valores y comportamientos de las dos variables estudiadas para las cuencas de estudio: precipitaciones y aportaciones, ya que entre ellas existe un vínculo natural indiscutible para cuya comprensión solo es necesario remontarse a las hipótesis más básicas del ciclo hidrológico (Ver Figura 5.1).

FIGURA 5.1: Esquema resumen de la relación física existente entre las precipitaciones y las aportaciones, así como los procesos del ciclo que intervienen en el paso del agua de una a otra variable.



FUENTE: *Elaboración propia.*

Además, para verificar la conexión entre las mismas en términos teóricos, solo es preciso acudir al concepto de *lluvia útil*, que no es más que la cantidad de agua que queda si a las precipitaciones se le resta la evapotranspiración, y que bien de forma subterránea o superficial, contribuirá a la escorrentía total. No obstante, ha de simplificarse asimilando los conceptos de lluvia útil y de escorrentía total, ya que esta última depende de cómo se distribuye la primera entre almacenamiento en el suelo, escorrentía superficial y también subterránea, variedad que introduce mucha difusión espacial y temporal (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000).

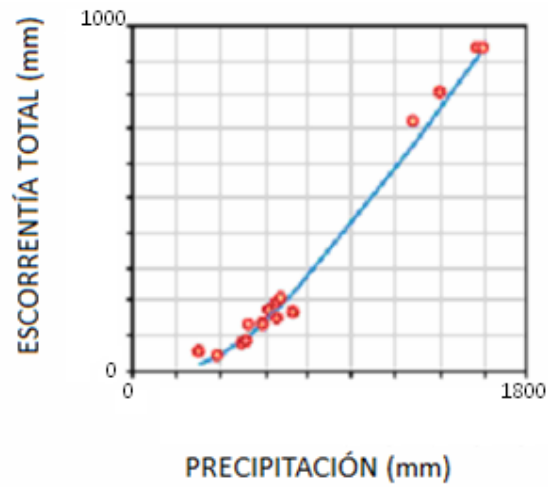
Por tanto inicialmente, se sostiene que en base a esta hipótesis de vinculación entre ambas magnitudes será también posible la aplicación del Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica con éxito sobre las series de aportaciones para valorar la incidencia del fenómeno en las mismas.

Para evaluar cómo es esta relación entre precipitaciones y aportaciones, inicialmente se establecerán análisis de regresión a diferentes escalas temporales (mensual y anual fundamentalmente, aunque también se jugará con los periodos estacionales, retardos, etc.) en el contexto de las 29 cuencas piloto.

No obstante, será muy importante no limitarse simplemente a establecer simples correlaciones entre ambas variables; es indispensable analizar con más precisión y detalle el comportamiento de precipitación y aportación en las diferentes circunstancias identificadas (a lo largo de las estaciones, de los distintos meses del año, en los mínimos y los máximos, etc.), para no enmascarar mediante cálculos globales posibles situaciones particulares de interés donde puedan apreciarse pautas o esquemas claros de sintonía o disparidad.

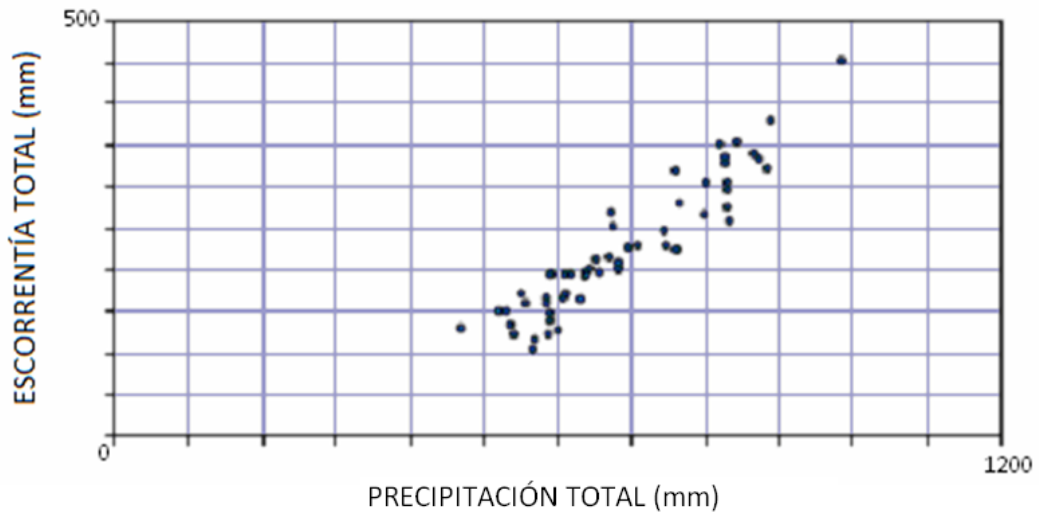
Además, debe asumirse con reservas el comportamiento conjunto estrictamente lineal entre ambas variables, ya que en algunos documentos consultados se muestran diagramas de dispersión donde la aportación parece crecer de forma potencial con respecto a un aumento proporcional de la precipitación (Ver Figura 5.2 y 5.3).

FIGURA 5.2: Regresión entre los totales de precipitación y aportación de las Demarcaciones Hidrográficas.



FUENTE: Libro Blanco del Agua en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000.

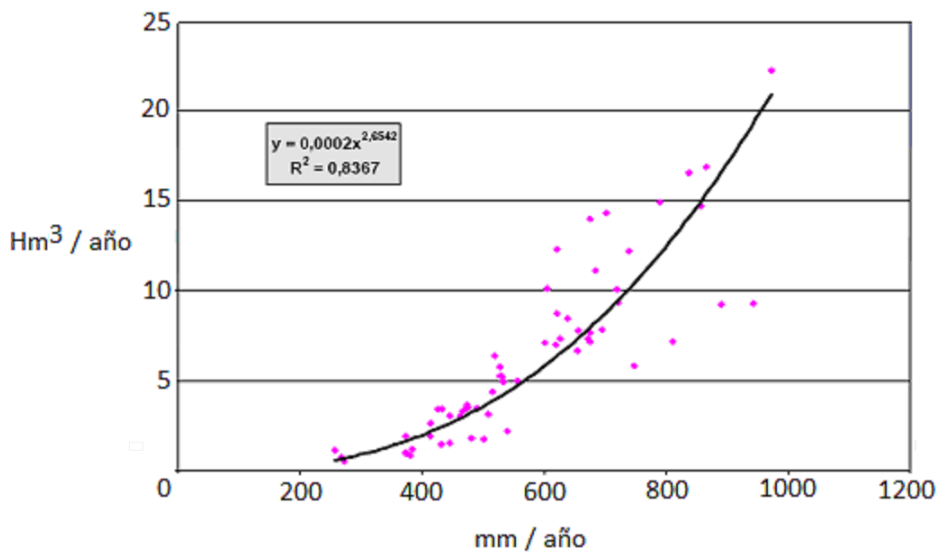
FIGURA 5.3: Regresión entre los totales anuales de precipitación y aportación estimados con SIMPA para todo el territorio nacional.



FUENTE: Libro Blanco del Agua en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000.

En relación con este tema, en el *Libro Blanco del Agua* (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000) las precipitaciones y escorrentías totales anuales de todo el territorio nacional y de las diferentes Demarcaciones Hidrográficas, estimadas con el modelo SIMPA muestran fuertes correlaciones lineales. En los documentos oficiales que sintetizan y explican los contenidos *del Plan Especial de actuaciones en situaciones de alerta y eventual sequía* en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir (Argüelles, A., 2007), se incorporan algunos diagramas de dispersión que acoplan los datos anuales de precipitación y aportación estimada mediante el modelo SACRAMENTO desde 1942 hasta 1996 (para el conjunto de toda la cuenca) usando una ecuación de regresión potencial (Ver Figura 5.4). Por tanto, a mayores cantidades de lluvia, el valor de aportación no solo se eleva, sino que lo hace progresivamente con más intensidad.

FIGURA 5.4: Ejemplo de regresión potencial muy ajustada entre los datos totales anuales de precipitaciones y las aportaciones. Cuenca del Guadalquivir.



FUENTE: Síntesis del Borrador del Plan Especial de actuaciones en situaciones de Alerta y Eventual Sequía en la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir (Argüelles, A., 2007).

Curiosamente con este análisis se obtiene una curva de ajuste bastante significativa en el nivel temporal anual; por lo que debemos incidir mucho en probar todas estas

comparaciones entre variables hasta conseguir elaborar una conclusión fundamentada sobre su posible relación.

Por otra parte no parece existir una explicación física que lleve a una relación potencial entre ambas variables, y esta no se llega tampoco a incluir en el documento. Una precipitación elevada, salvo por cuestiones de disminución de la infiltración a causa de que el suelo se encuentre saturado o por el incremento de la descarga de los acuíferos (fenómenos que se percibirían además a escalas temporales de mayor detalle que la anual, usada aquí), no tiene por qué provocar necesariamente que la escorrentía se eleve de forma progresivamente más brusca.

5.2. FUNDAMENTOS DE UN PRIMER ACERCAMIENTO A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES.

Se propone un estudio a diferentes escalas temporales para testar las respuestas hidrológicas. No solo interesa conocer a qué niveles de agregación temporal se manifiesta un modelo reconocible de comportamiento entre ambas variables, sino las razones físicas de que en unas escalas se identifique con más fuerza que en otras y las implicaciones que todo ello pueda tener a la hora de escoger un indicador eficaz para definir la sequía hidrológica.

En algunos Planes de Sequía de las diferentes Demarcaciones Hidrográficas de nuestro país se considera recomendable enfocar el estudio de los recursos y la sequía desde un punto de vista multiescalar. Por ejemplo en la cuenca del Segura (Confederación Hidrográfica del Segura, 2007b), para identificar situaciones secas en las series históricas se utiliza fundamentalmente el nivel anual, pero con la particularidad de que una vez identificado el año o los años secos se desciende a la escala mensual dentro de esas secuencias para estudiarlas en profundidad.

Parece que en la actualidad tiende a considerarse la escala mensual como óptima para la detección de los periodos secos en una serie, sobre todo en el ámbito mediterráneo, ya que utilizar los totales anuales puede conducir a enmascarar posibles fenómenos intercalados entre el final de un año y el inicio de otro, o incluso secuencias secas muy intensas que no llegan a trascender de unos pocos meses pero que no conviene pasar por alto (Pita López, M. F., 1995).

El análisis va a realizarse comenzando por la escala de mayor detalle, la mensual, y agregando progresivamente para comprobar si tal y como conjeturamos, las diferencias entre los ritmos de ambas variables van desapareciendo.

5.3. EL ESTUDIO A NIVEL MENSUAL DE LA RESPUESTA DE LAS APORTACIONES A LA PRECIPITACIÓN.

Para la observación a nivel mensual de las relaciones entre las dos variables de estudio se llevarán a cabo los siguientes procedimientos:

- En primer lugar *se compararán los regímenes* de ambas magnitudes para verificar el comportamiento más o menos conjunto de las mismas a lo largo del año, en promedio, siendo éste un paso más a lo ya plasmado en el capítulo anterior. Para proporcionar una visión cuantitativa se usará fundamentalmente la proporción entre el valor de las precipitaciones y el de las aportaciones específicas medias mensuales de las cuencas, aunque también se distinguirán y analizarán cualitativamente los patrones de evolución desde las variedades de regímenes pluviométricos a las de regímenes hídricos.
- Después, se estudiarán los diagramas de dispersión entre las series mensuales de precipitaciones y las aportaciones en cada cuenca y sus correspondientes *ecuaciones de ajuste y coeficientes de Correlación*.
- A continuación, ya que en el capítulo anterior se advirtió una elevada persistencia de los datos de aportaciones, se efectuará otro análisis de *correlación de los valores mensuales de aportación*, pero en este caso frente a *la suma de los valores de dos meses consecutivos de precipitaciones* (ese mismo mes y el anterior), para evaluar la posible existencia de pautas de retardo y acumulación en la respuesta hidrológica.
- Posteriormente, para entender más la conexión entre ambas variables y proporcionar otro enfoque que juzgue la estacionalidad de este vínculo, se desagregarán las series

mensuales en *12 subseries correspondientes a los meses del año* y se evaluará la *correlación para cada uno de ellos* entre precipitaciones y aportaciones en todas las cuencas. Sobre la matriz resultante (de 29×12), se aplicará análisis multivariante para conocer la estructura latente de los datos por medio de la proyección de las doce dimensiones (meses) en menos factores aglutinadores, cuya expresión sea representativa y de fácil interpretación.

Como conclusión de lo inferido a lo largo de esta sección, se explorará si todas las disparidades identificadas en la conexión mensual de ambas magnitudes siguen algún patrón, lo cual permitirá completar una visión integral de la respuesta mensual de las aportaciones a la precipitación.

5.3.1. Comparación de los regímenes pluviométricos e hidrológicos.

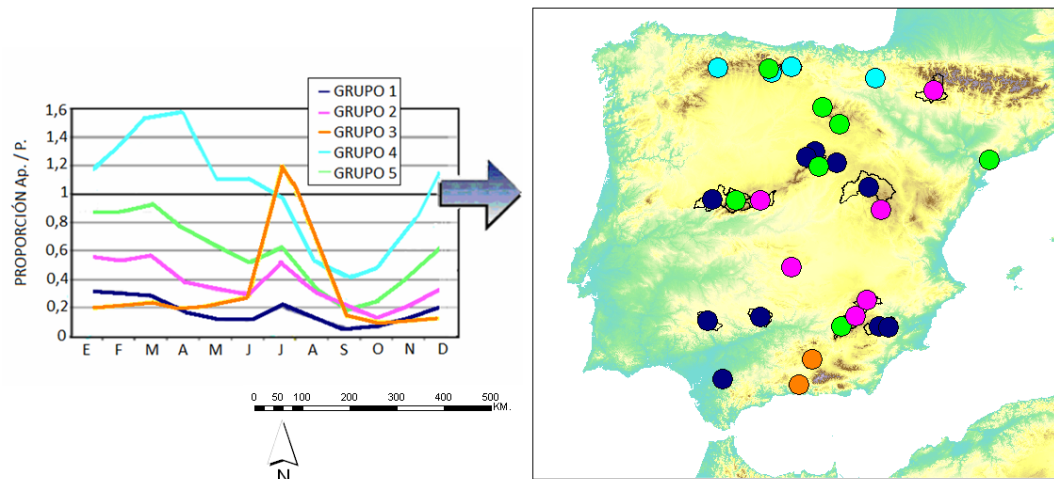
Si se parte de la media mes a mes de las dos variables de estudio medidas en litros por metro cuadrado para cada cuenca y ambas se confrontan, se obtiene un resultado que refleja de manera muy expresiva las *fluctuaciones en la conexión entre la precipitación y la aportación a lo largo del año*, si bien no ha de perderse de vista que se está trabajando con un promedio de casi cincuenta años.

Para llevar ésto a cabo puede establecerse una proporción o ratio entre ambas variables, similar al concepto de coeficiente de escorrentía mensual, siendo esta la metodología seleccionada por considerarse expresiva y fácilmente interpretable.

Tal y como se preveía en el capítulo previo, la mayoría de las cuencas que se agrupan siguiendo un determinado régimen pluviométrico tienden a agruparse de modo similar y con las mismas cuencas en el régimen hidrológico, lo cual ratifica el alto condicionamiento climático de la escorrentía por encima de cualquier otro factor determinante. También, al elaborar la proporción entre la precipitación y la aportación específica, aparecen cinco tipos de comportamiento intermensual que siguen agrupando- a grandes rasgos- las mismas cuencas que se agrupaban al elaborar los propios regímenes.

Los promedios mensuales de estas proporciones y las cuencas en los que se identifican aparecen en la Figura 5.5.

FIGURA 5.5: Expresión gráfica de los cinco diferentes patrones de cambio en el coeficiente promedio de escorrentía mensual (Ap./ P.) y las cuencas en las que se identifican.



FUENTE: Elaboración propia.

Es preciso señalar que el grupo menos homogéneo internamente es el 4, pues dentro del mismo existen dos cuencas: Cervera- Ruesga- ya destacada en los regímenes de escorrentía- y Alloz, cuyas proporciones entre precipitación y aportación a nivel intermensual se comportan de manera un poco más independiente. Sus oscilaciones intermensuales son muy similares al resto pero el valor absoluto de las proporciones entre ambas variables es siempre mucho mayor, lo que induce a pensar que existen ciertas aportaciones externas, no exclusivamente provenientes de la precipitación.

Efectivamente, como ya sugerimos más arriba, en el caso de Cervera- Ruesga se asocia este aporte extra al acuífero de la Robla- Guardo, situado al pie de la serranía en la que se ubica, y que coincide concretamente con el tramo bajo de la de cuenca.

Esta unidad hidrogeológica es una orla de materiales calcáreos, adosada a la Cordillera Cantábrica. Se compone de 200-300 metros de calizas muy permeables, sobre otros materiales de baja permeabilidad (Sánchez San Román, J., 2006). Al ser dichas formaciones monoclinales y buzard predominantemente hacia el norte y noreste, posiblemente se facilite el flujo del agua hacia el área que finalmente drena hacia el embalse de Cervera, explicándose de este modo la anomalía reconocida.

La clave de las particularidades de Alloz también puede atribuirse al fenómeno hidrogeológico, dado que la cuenca se sitúa sobre una línea de surgencias alineadas longitudinalmente a lo largo de la base de la Sierra de Urbasa, manando del acuífero del mismo nombre. Además, examinando el modelo digital de elevaciones se observa que la zona de cumbres de esta sierra está configurada como una gran área endorreica que propicia la alimentación del acuífero y permite que las cuencas colindantes, como Alloz, posean un flujo subterráneo de gran producción sobre todo en invierno y en primavera, cuando está recargado.

Comparando los cinco grupos identificados, se observa que tanto el 1 como el 2 son menos oscilantes y contrastados, lo cual indica que la pauta de conexión entre las variables es más constante a lo largo del año. En cambio, los grupos 5 y sobre todo 3 y 4 reflejan una gran variabilidad en la conexión precipitación – aportación a lo largo del año.

Observando las gráficas de los cinco patrones pueden distinguirse dos variedades fundamentales: por un lado las cuencas pluvionivales del norte del Duero y la cuenca de Alloz (grupo 4), donde en primavera los volúmenes de escorrentía superan a la precipitación - debido esencialmente al deshielo- y los coeficientes solo descienden por debajo de 1 desde el verano; y el resto de los grupos (1, 2, 3 y 5), donde los coeficientes de escorrentía reproducen aproximadamente los ritmos de los regímenes. No obstante, para esta última afirmación existen dos excepciones importantes:

Aparece una baja proporción correspondiente a algunos meses otoñales y primaverales próximos al verano. En otoño, estos mínimos pueden asociarse a la resistencia a la recuperación de cierto volumen circulante tras la larga y seca etapa estival, suscitándose que en algunos meses que ya no son tan secos en cuanto a lluvias, la aportación sea aún baja o nula y se creen divergencias entre ambas variables. En primavera, dado que este mínimo en el coeficiente de escorrentía es más notorio en los grupos de cuencas al sur (1 y 3), todo apunta a que la evaporación intensa que ya tiene lugar, fruto de la importante insolación que reciben estas cuencas (ANDALUCÍA. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, 2012b), es la causante de que el pico de precipitación en torno a abril ya no se logre percibir en el régimen de aportaciones.

La segunda excepción es que en verano las ratios se elevan, lo cual es lógico, dado que con la aridez estival las cantidades de precipitación son exiguas y con que exista un mínimo

caudal basal que mantenga cierta humedad, la proporción entre los volúmenes resulta alta. Por tanto, puede confirmarse que cuanto más acentuado sea este pico en la gráfica de una cuenca, más está apuntando hacia la existencia de una importante aridez estival en las precipitaciones combinada con un caudal subterráneo de considerable entidad, como en Cubillas o Bermejales (grupo 3).

Puede concluirse que en los regímenes hidrológicos se reconocen cambios con respecto a los pluviométricos, de ahí que el coeficiente de escorrentía sea variable; estas distorsiones son inducidas por procesos intermedios entre ambas fases del ciclo, esencialmente la escorrentía subterránea, pero también la retención nival y la evapotranspiración, los cuales no actúan de manera uniforme a lo largo del año ni entre unas cuencas y otras, como se ha comprobado.

5.3.2. Correlación de las series mensuales de precipitación y aportación.

Cabe esperar una elevada correlación a nivel mensual entre los valores de las dos variables de estudio, esencialmente debido a que los comportamientos intermensuales de ambas son parecidos, que no iguales, como hemos comprobado más arriba. Es muy posible que este ritmo cuasiconjunto enmascare en cierta medida las posibles disparidades.

Sin embargo, se trata de un análisis que arroja conclusiones interesantes sobre las cuencas en las que ambas variables muestran una mayor conexión y en cuales esta es menos evidente (Ver Tabla 5.1).

TABLA 5.1.: Correlaciones entre las series mensuales de precipitación y aportación.

CUENCAS	CORRELACIÓN PRECIPITACIÓN – APORTACIÓN (R DE PEARSON)
ALFONSO XIII	0,63
ALLOZ	0,54
ARLANZON	0,58
BARRIOS DE LUNA	0,61
BERMEJALES	0,68
BURGOMILLODO	0,54
CAMPORREDONDO	0,66
CERVERA RUESGA	0,71
CUBILLAS	0,45
CUERDA DEL POZO	0,65
EBRO	0,68
EL BURGUILLO	0,52
EL PINTADO	0,66
EL VADO	0,67
ENTREPEÑAS	0,51
FUENSANTA	0,59
GABRIEL Y GALAN	0,8
GASSET	0,49
GUADALMELLATO	0,75
LA CIERVA	0,55
LA PEÑA	0,35
LA TOBA	0,65
LINARES DEL ARROYO	0,49
PALMACES	0,51
RIUDECANYES	0,42
SANTA TERESA	0,72
TALAVE	0,3
TORRE DEL AGUILA	0,65
TRANCO DE BEAS	0,73

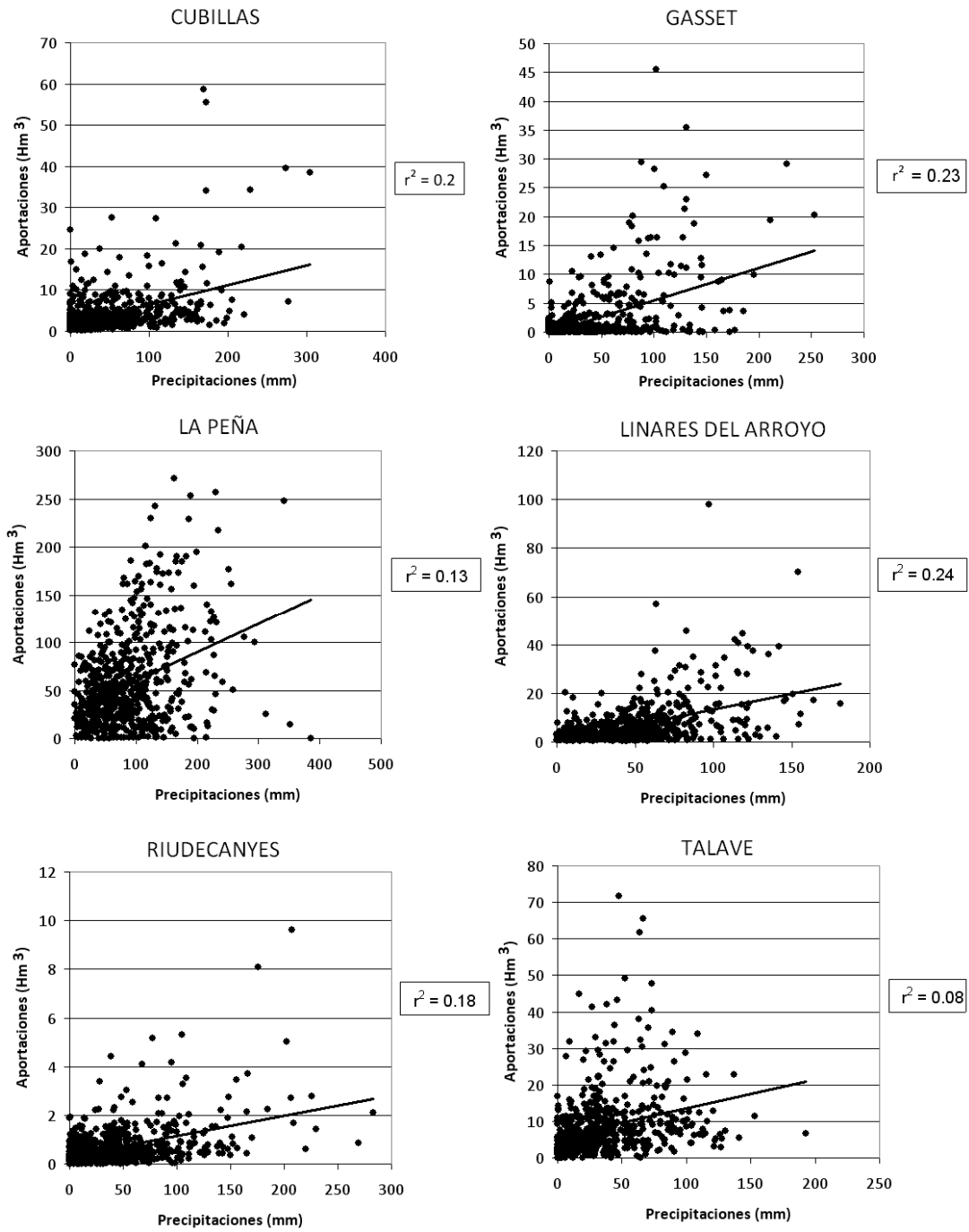
FUENTE: *Elaboración propia.*

En general, la escala mensual ofrece correlaciones aceptables para la precipitación y la aportación, pero no son tan fuertes como para descartar que a este nivel temporal existan las suficientes diferencias como para recomendar un análisis individual de la sequía sobre ambas variables.

Es conveniente puntualizar que las cuencas de abundante pluviometría tienden a reflejar mayor correlación entre las variables a nivel mensual, fundamentalmente porque en ellas el volumen evaporado, infiltrado o detraído es menos importante que en las cuencas más secas. Esta particularidad será desarrollada en profundidad en los epígrafes sucesivos.

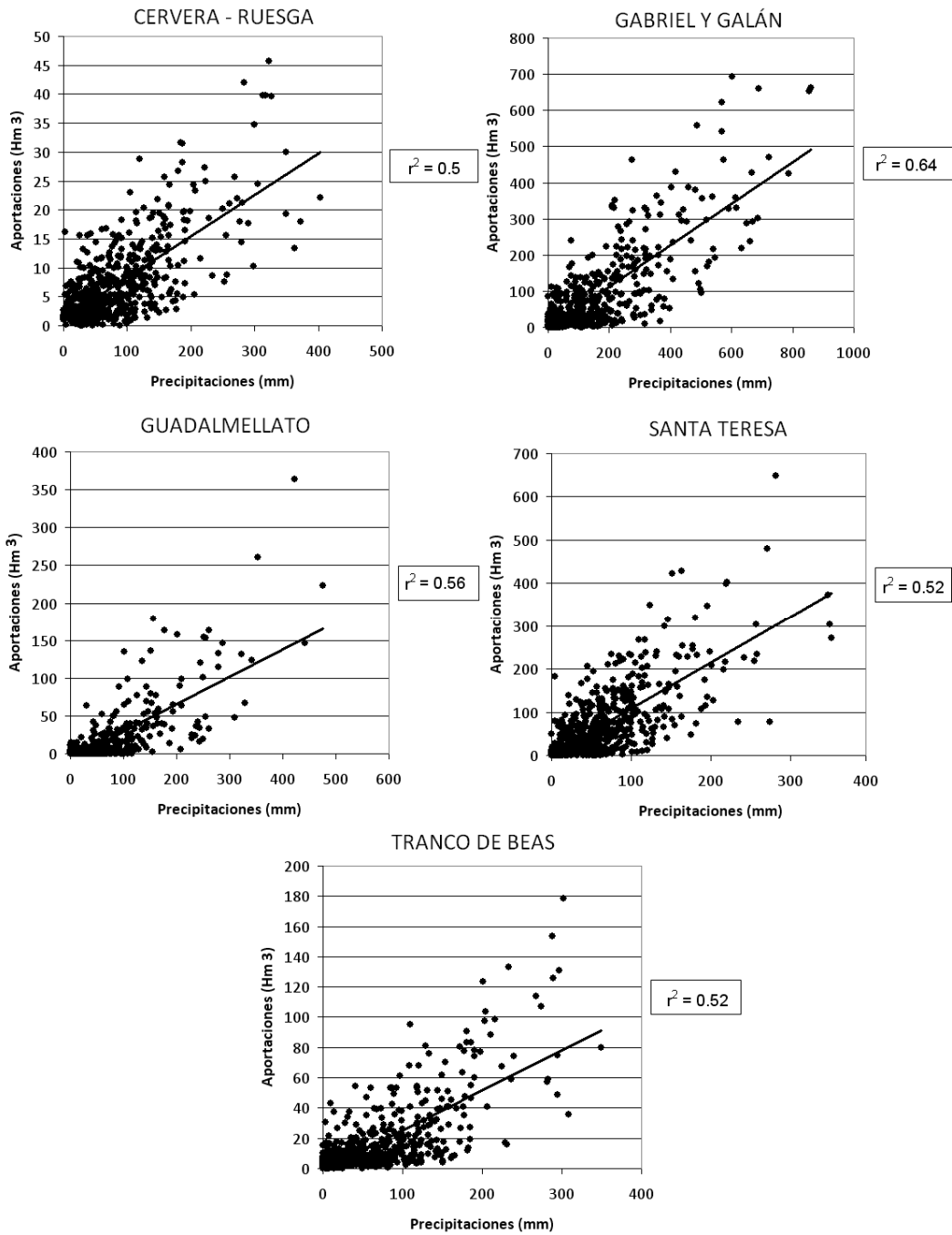
Atendiendo a los casos particulares, existen seis cuencas en las que las relaciones entre las variables resultan bastante reducidas (Ver Figura 5.6) ya que, considerando los regímenes estacionales, un r de Pearson inferior a 0,5 es demasiado bajo, a pesar de que para 588 valores (49 años de estudio a nivel mensual) resulte sobradamente significativo incluso bajo niveles de significación de 0,01. Por contra, encontramos otras cinco en las cuales los coeficientes r superan el valor de 0,7, dando idea de una gran interconexión entre los comportamientos de las variables (Ver Figura 5.7). Se han analizado en profundidad los diagramas de dispersión de estas 11 cuencas para valorar estas conexiones e interpretarlas convenientemente.

FIGURA 5.6.: Cuencas de baja correlación mensual entre ambas variables.



FUENTE: Elaboración propia.

FIGURA 5.7: Cuencas de elevada correlación mensual entre ambas variables.



FUENTE: Elaboración propia.

Se observa que en el caso de las cuencas con bajos coeficientes r , existen algunos meses que claramente reducen la interconexión entre las variables. Las series han sido testadas previamente a todos los análisis y puede asegurarse que no se trata de valores erróneos, sino simplemente de observaciones atípicas relativas a momentos en los que una de las variables destaca y no se refleja en la otra.

Es preciso incidir en el hecho de que la mayoría de estos valores anómalos en la aportación que aparecen son casos en los que las precipitaciones no son altas pero las escorrentías sí lo son. Este fenómeno se debe a que en los meses previos ya existen unas condiciones de humedad importantes en el sistema, de manera que con la llegada de una lluvia abundante los volúmenes de aportaciones suben mucho más de lo que pudiera esperarse.

Estos excepcionales picos mensuales en la escorrentía a menudo se atribuyen al mantenimiento de cierta inercia en las aportaciones y por ello normalmente aparecen en grupos de meses correlativos (p. e. cuenca de Linares del Arroyo, cuenca de Talave) y se asocian directamente al poder regulador que ejercen los acuíferos sobre ellas.

Sin embargo, tienen lugar algunos casos en los que los picos de aportaciones son extremadamente altos y aislados; en estos casos las causas han de buscarse justo en escenarios opuestos: en ocasiones se dan valores sueltos anómalos en cuencas de baja permeabilidad y corto recorrido, como Riudecanyes, porque la proporción de agua que se logra infiltrar es inapreciable y el volumen de agua en circulación no se distribuye ni se mantiene temporalmente, sino que la respuesta es inmediata, cuantiosa y torrencial.

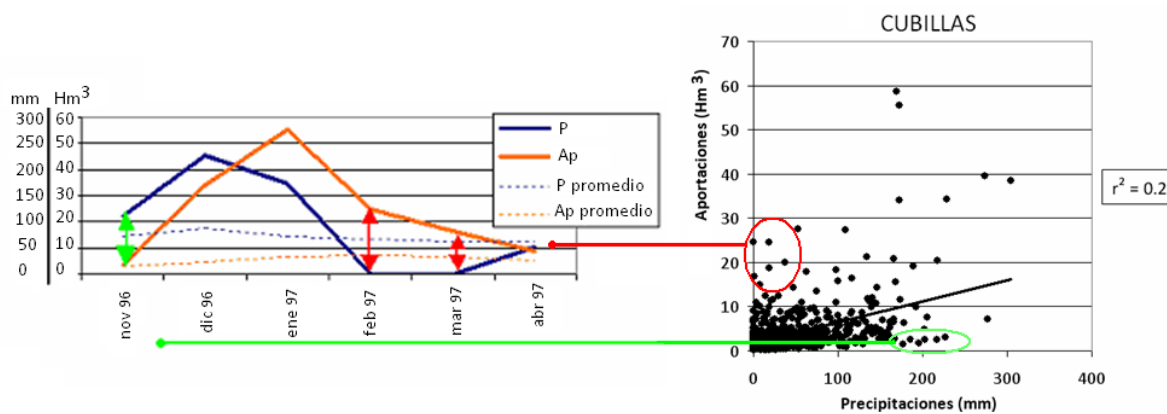
Algunos otros casos atípicos – los menos- se manifiestan a la inversa, aparecen meses de lluvias muy elevadas que no se reflejan directamente en un incremento proporcional de las aportaciones, fundamentalmente porque se haya invertido esa humedad en saturar las capas subsuperficiales; tienen más presencia en la Peña y Linares del Arroyo, propiciados por la presencia de materiales muy permeables en el tramo bajo ambas cuencas. Un alto porcentaje de esos meses más dispares son en octubre y septiembre, dado que en ellos las precipitaciones otoñales que empiezan a regar la cuenca aún no han repercutido en el caudal.

En estas seis cuencas de bajas correlaciones a menudo aparecen valores anómalos sucesivos que forman conglomerados o plumas que se apartan de las inmediaciones de la recta de regresión. La explicación se encuentra al transponerlos a un pluvio- hidrograma

mensual, donde se comprueba que suelen producirse al principio y al final de intervalos de varios meses de lluvias inusualmente cuantiosas pero que cesan repentinamente, y que además tienen lugar habitualmente a inicios del año hidrológico. En esta etapa del año, la evaporación y la infiltración en las capas aun secas consumen gran parte del volumen precipitado, lo cual se corrobora por los mínimos en los coeficientes de esorrentía que absolutamente todas las cuencas presentaban en esta etapa, según se comprobó en el epígrafe precedente. Aunque la precipitación sea muy elevada aún pueden pasar meses sin que esta repercuta en un incremento considerable de las aportaciones, tanto más cuanto más permeable la cuenca y mayor la influencia de la evapotranspiración.

En cambio, esto se invierte por completo al final de dichos episodios, sobre todo cuando estos concluyen súbitamente o incluso van seguidos de un periodo excepcionalmente poco lluvioso; es posible que entonces las aportaciones sigan fluyendo muy por encima de los valores promedio y se sostengan así durante meses, provocando también la aparición de valores apartados del otro lado de la recta de regresión en el diagrama de dispersión (Ver Figura 5.8).

FIGURA 5.8: Pluviograma e hidrograma de un episodio anómalo en el caso de estudio de Cubillas y la correspondiente ubicación de los diferentes meses del mismo en el diagrama de dispersión de la cuenca.

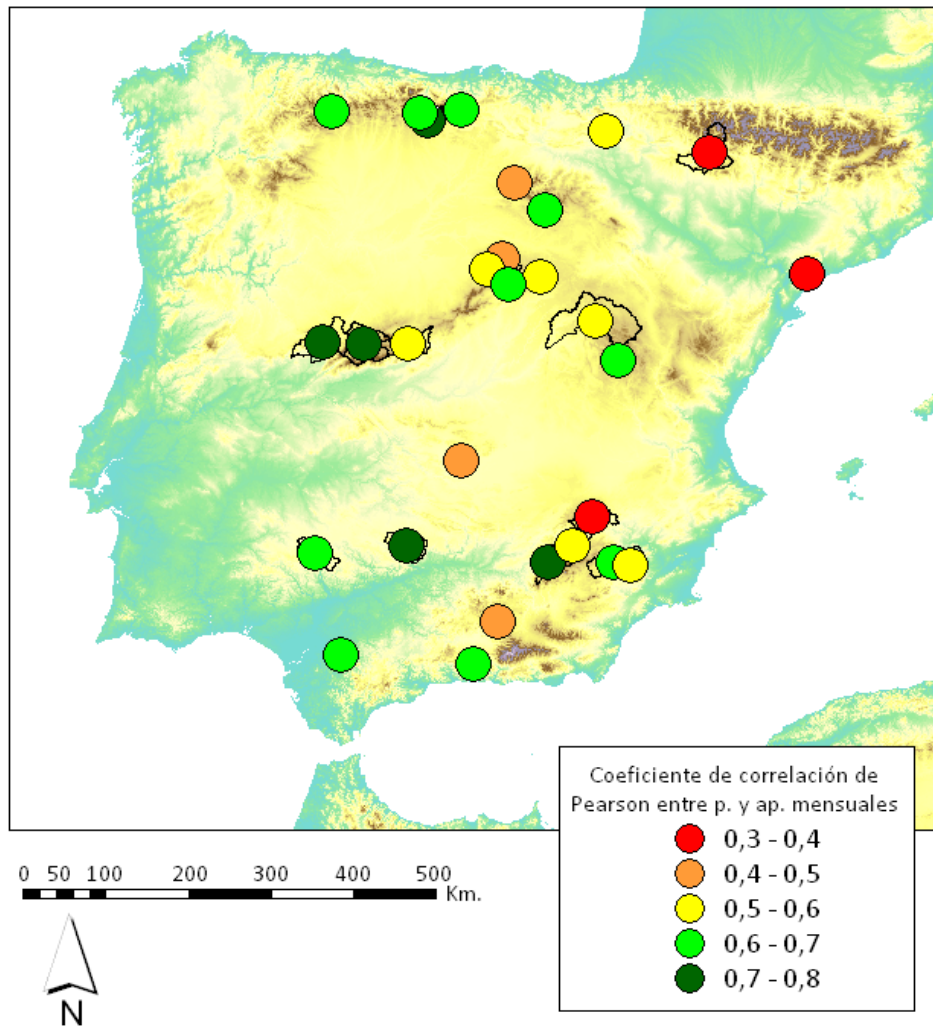


FUENTE: Elaboración propia.

Las probabilidades de que estos fenómenos tengan lugar aumentarán zonalmente hacia el levante peninsular por la naturaleza extrema de la precipitación otoñal en este área,

muy cambiante no solo a lo largo de los meses, sino comparando unos años con otros; y más hacia el sur, por la mayor influencia de las altas temperaturas y el factor evaporación. Esto explica que se aprecie cierto patrón geográfico en las correlaciones precipitación / aportación (Ver Figura 5.9). Ahora bien, a esta generalidad hay que añadir multitud de matices de acuerdo con la orientación, exposición a los vientos, altitud y, por supuesto, los rasgos fisiográficos e hidrogeológicos de las cuencas.

FIGURA 5.9: Mapa de las correlaciones entre los valores mensuales de precipitaciones y aportaciones.



FUENTE: *Elaboración propia.*

Como conclusión general se extrae que cuanto más extrema, variable y de carácter torrencial es la precipitación de un área y cuanto más inercia hidrológica presenta el sistema cuenca - a causa de la evaporación y la infiltración al inicio del intervalo lluvioso o por escorrentía subterránea al final del mismo- más tendente es dicha cuenca a generar desacoplamiento entre las dos variables, y por tanto peores correlaciones muestra a nivel mensual. Cabe suponer por ello que estos valores mejorarían si la correlación se estableciera desfasando mensualmente las variables, lo cual se medirá en el siguiente epígrafe.

Finalmente, se han probado los ajustes polinómicos, potenciales y exponenciales, e incluso eliminando los valores mensuales conflictivos en los diagramas de las cuencas no se han obtenido correlaciones significativamente mejores a la lineal.

A pesar de lo que podría pronosticarse tras lo explicado sobre la inercia de la escorrentía en una cuenca y su papel en la distorsión de la respuesta a la precipitación, e incluso habiéndose identificado las razones que la inducen a lo largo del epígrafe, no se ha logrado extraer ninguna correspondencia matemática concluyente entre la correlación $P. / Ap.$ y las características físicas estudiadas para las cuencas piloto. Ningún modelo de regresión simple o múltiple establecido con estas características muestra la suficiente capacidad para explicar un porcentaje significativo de la varianza que muestran los valores de correlación mensual entre ambas variables.

5.3.3. Análisis de los retardos entre las variables.

Una vez obtenidas las correlaciones de las series mensuales de precipitación y aportación, el siguiente paso consiste en repetir el análisis de correlación, pero confrontando las aportaciones con la suma de los valores de dos o varios meses consecutivos de precipitaciones (ese mismo mes y los anteriores), de acuerdo con el carácter acumulativo de la primera de las variables, fundamentado en su naturaleza y corroborado además por la gran mayoría de los análisis ya establecidos.

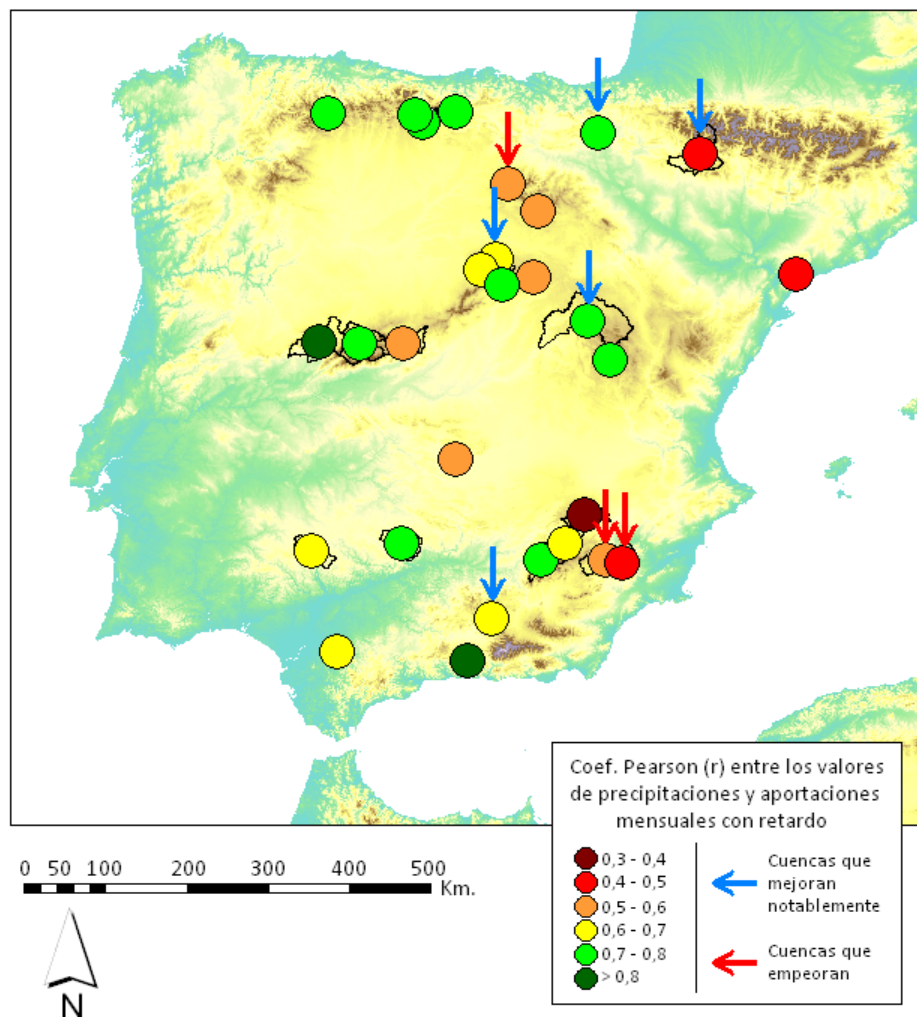
Cabe añadir también que se realizaron otras variantes en las que, en lugar de acumular meses precedentes de precipitación, simplemente se desfasó mensualmente la serie de precipitaciones con respecto a las escorrentías, no obteniéndose valores mejores a los

resultantes del análisis mes a mes sin retardos.

En la Tabla 5.2 primero solo se acumulan dos meses de precipitación consecutivos (segunda columna), mientras que en la tercera columna se muestran las mejoras que aparecen en el coeficiente r de Pearson con retardos mayores, solamente en las cuencas donde esta mejoría tiene lugar (Ver también Figura 5.10).

Esto facilitará la identificación de posibles pautas de retardo en la respuesta hidrológica y su potencial asociación a las particularidades físicas o geográficas de las cuencas.

FIGURA 5.10: Mapa representativo de los valores de la TABLA 5.2.



** Se usa el mayor valor obtenido con retardo, sea cual sea el número de meses acumulados de precipitación que sean necesarios para que aparezca esta correlación entre precipitación y aportación.*
FUENTE: Elaboración propia.

TABLA 5.2.: Coeficientes r de Pearson entre la suma de la precipitación de varios meses consecutivos y la aportación del último de ellos.

CUENCAS	R. PEARSON SIN RETARDO	R. PEARSON RETARDO 1 MES	OTROS RETARDOS CON CORRELACIÓN SUPERIOR (MESES RETARDO)	DIFERENCIA MÁXIMA CON RESPECTO A LA CORRELACIÓN DIRECTA
ALFONSO XIII	0,63	0,59	-	-0,04
ALLOZ	0,54	0,78	-	0,24
ARLANZON	0,58	0,51	-	- 0,07
BARRIOS DE LUNA	0,61	0,71	0,75 (2)	0,14
BERMEJALES	0,68	0,8	0,81 (2)	0,13
BURGOMILLODO	0,54	0,65	0,69 (2)	0,15
CAMPORREDONDO	0,66	0,71	-	0,05
CERVERA RUESGA	0,71	0,76	-	0,05
CUBILLAS	0,45	0,55	0,63 (3)	0,18
CUERDA DEL POZO	0,65	0,71	0,73 (2)	0,08
EBRO	0,68	0,77	-	0,09
EL BURGUILLO	0,52	0,6	-	0,08
EL PINTADO	0,66	0,69	-	0,03
EL VADO	0,67	0,77	0,79 (2)	0,12
ENTREPEÑAS	0,51	0,65	0,72 (3)	0,21
FUENSANTA	0,59	0,66	0,69 (3)	0,1
GABRIEL Y GALAN	0,8	0,82	-	0,02
GASSET	0,49	0,62	0,65 (2)	0,16
GUADALMELLATO	0,75	0,75	-	0
LA CIERVA	0,55	0,43	-	-0,12
LA PEÑA	0,35	0,46	0,53 (6)	0,18
LA TOBA	0,65	0,75	0,78 (2)	0,13
LINARES DEL ARROYO	0,49	0,58	0,67 (3)	0,18
PALMACES	0,51	0,59	0,62 (2)	0,11
RIUDECANYES	0,42	0,46	-	0,04
SANTA TERESA	0,72	0,78	-	0,06
TALAVE	0,3	0,35	0,38 (3)	0,08
TORRE DEL AGUILA	0,65	0,67	-	0,02
TRANCO DE BEAS	0,73	0,78	-	0,05

FUENTE: Elaboración propia.

Los datos efectivamente corroboran la existencia de una tendencia de las escorrentías a corresponderse con los volúmenes de dos o más meses consecutivos de precipitaciones, confirmada para 25 de las 29 cuencas.

Atendiendo primero a aquellas en las que dicha premisa no se cumple: por un lado aparecen Guadalmellato y Arlanzón, cuyos sustratos son bastante más impermeables que los que muestran la mayoría de las cuencas. Esto sin lugar a dudas implica que en estas cuencas aparece un mayor peso de la aportación directa, superficial, que ofrece una respuesta mucho más rápida que la que tiene lugar en sistemas hidrológicos donde la fase subterránea tiene un importante papel.

También aparecen los casos de Alfonso XIII y La Cierva (Ver Figura 5.10), cuya contigüidad puede ayudar a dilucidar las claves que expliquen esta diferencia con respecto al resto de casos de estudio. A lo largo de este trabajo se ha comprobado que se trata de las dos cuencas más áridas en términos tanto pluviométricos como hidrológicos, en las que además se registran los coeficientes de escorrentía más exigüos.

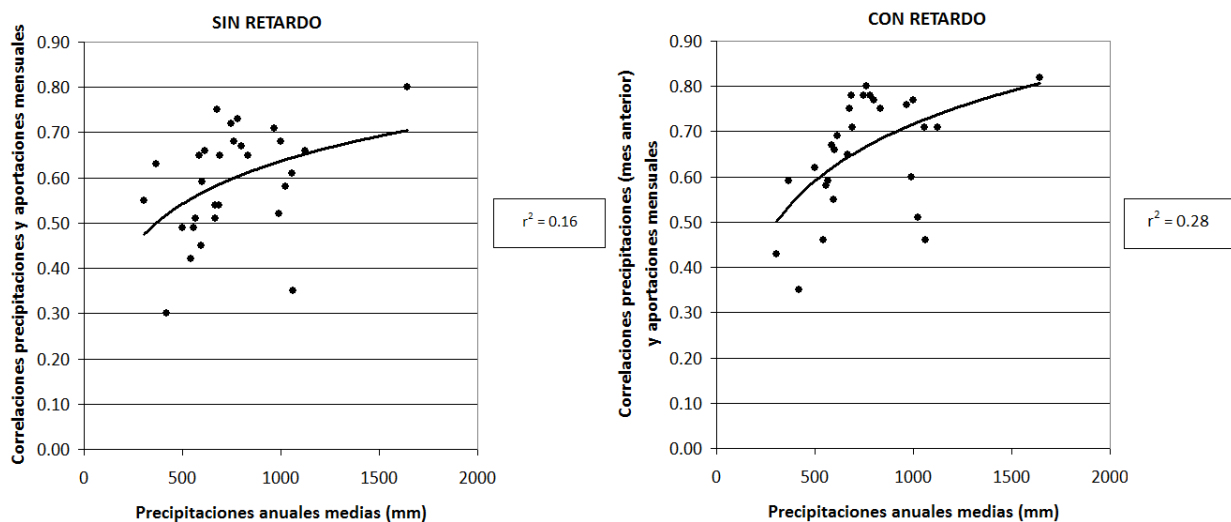
Estos breves coeficientes no están justificados por la existencia de importantes captaciones infraestructurales o detracciones aguas arriba de los embalses, de hecho la densidad de sondeos hidrogeológicos y pozos no es alta en este área, de acuerdo con la capa de puntos acuíferos del Mapa Hidrogeológico a escala 1: 1.000.000 del IGME (IGME, 2012) y el *Plan Especial de Alerta y eventual Sequía* de la cuenca (Confederación Hidrográfica del Segura, 2007b). En cambio, se trata de dos de los afluentes de la margen derecha del Segura - Quipar y Mula- caracterizados por transportar caudales de escasísima entidad, los cuales en la mayoría de los casos con tan solo simples y pequeñas intervenciones locales, o por medio de la evaporación, son consumidos y aportan muy pocos retornos al Segura (Confederación Hidrográfica del Segura, 2012).

La lógica de este fenómeno se justifica en que la aridez de estas cuencas implica una pobre recarga de los acuíferos y por tanto cualquier mínima captación resulta comparativamente más considerable y dañina, lo cual no hace más que poner de manifiesto una vez más la consabida vulnerabilidad hidrológica y ecológica de los cauces y cuencas de los ámbitos peninsulares áridos. Por tanto, pese a tratarse de dos cuencas de uso no intensivo, la antropización resulta mucho más patente que en las otras 27 y las conclusiones sobre la sequía hidrológica habrán de examinarse mucho más minuciosamente.

Teniendo en cuenta estas cuestiones, por oposición, el mantenimiento de la persistencia hídrica en el resto de cuencas puede asociarse en buena medida a que el volumen captado o evaporado en ellas es poco apreciable en comparación con el puesto a disposición mes a mes por medio de la precipitación y por consiguiente el caudal base tiene la suficiente trascendencia para lograr amortiguar y retardar la respuesta hidrológica más eficazmente.

Para comprobar esta presunción, se pone en relación la precipitación total anual media de cada cuenca con la diferencia entre los coeficientes de Correlación de Pearson precipitación- aportación y los mismos pero establecidos con retardos mensuales (última columna de la Tabla 5.2). Efectivamente, se comprueba que existe cierta relación directa, y son estas cuencas más húmedas las que más mejoran con el retardo (Ver Figura 5.11).

FIGURA 5.11: Conexión entre la precipitación total anual y las correlaciones entre ambas fases del ciclo hidrológico, con y sin retardo entre las series.



FUENTE: *Elaboración propia.*

La mejor correlación hallada es de tipo logarítmico (pendientes altas al principio y decrecientes en la interdependencia conforme mayores los valores) y arroja un coeficiente de Determinación de 0,28 ($r = 0,52$) que resulta significativo a un nivel de 0,01.

Por supuesto hay muchos otros factores que inciden en la mejoría de esta correlación

al retardar, esencialmente los que propician el mantenimiento de la inercia de las condiciones hídricas en la cuenca, pero no puede refutarse esta influencia del volumen pluviométrico en la mejoría de las conexiones. Además, se trata de las cuencas más montañosas y frías, por lo que en ellas el efecto distorsionador en las correlaciones entre las variables se debe esencialmente a la intercepción e infiltración, existe poco porcentaje de salidas por medio de la evapotranspiración, de manera que con el paso del tiempo esos volúmenes acaban por llegar al aforo, no se pierden.

Se aprecia también que las cuencas donde más mejora la interconexión al retardar las series tienen siempre una o varias surgencias cartografiadas en el Mapa Hidrogeológico de la Península 1:1.000.000 (IGME, 2012), lo cual sin duda apoya la hipótesis.

Sin embargo, dado que en sentido matemático estos rasgos no son capaces de explicar por sí solo la mejoría en las interdependencias entre precipitación y aportación cuando se introduce un retardo, se ha evaluado la correlación de estas diferencias con el resto de características físicas y morfométricas de las cuencas, encontrándose que el Índice de Alargamiento juega un papel importante en la misma; otros factores como el área y la densidad de drenaje, aparte del área acuífera comentada anteriormente, arrojan valores no despreciables, por lo que cabe la posibilidad de evaluar el ajuste a un modelo de regresión multivariante.

Así, establecida en el software SPSS 15 la metodología de Regresión Lineal Multivariante de eliminación sucesiva de variables si la probabilidad de la F de Fisher-Snedecor es superior a 0,1: “Hacia Atrás” o “Backward”, se encuentra que precisamente el mejor modelo posible se establece con el Índice de Alargamiento y la Ratio de Superficie Acuífera, el cual arroja un r de Pearson de 0,5- nada desdeñable- y presenta la siguiente formulación:

$$Dif = -0,04 \times Ia + 0,03 \times Ratio\ ac + 0,09 \quad (\text{Fórmula 5.1})$$

donde:

Dif = Diferencia entre las correlaciones con retardo y las correlaciones sin retardo.

Ia = Índice de Alargamiento y

Ratio ac = porcentaje de superficie de la cuenca que se encuentra sobre una Unidad

Hidrogeológica catalogada en la cartografía del IGME.

Con referencia al Índice de Alargamiento, se trata de una medida que se relaciona con la dinámica rápida o lenta del agua en los drenajes y también, aunque no tenga trascendencia a efectos de este trabajo, con su potencial erosivo o de arrastre (Corporación Suna Hisca, 2002). Si muestra valores elevados (cuencas alargadas) indica que el sistema de drenaje se asemeja a una espiga, denotando un alto grado de evolución y una gran capacidad de absorber mejor una precipitación torrencial sin generar un crecida de grandes proporciones (Convenio Cortolima, 2006). Ahora bien, las cuencas de este tipo son las que menores mejorías revisten en las correlaciones P/Ap al establecerlas con retardos mensuales (la relación es inversa) y en ellas predomina la componente del mes concreto mucho más que la correspondiente al mes o meses anteriores; esto resulta algo contradictorio, ya que cabría suponer que un sistema que evacua lenta y progresivamente, conseguiría una recarga más eficaz de las capas subsuperficiales y los acuíferos y por ello lograría mantener unos volúmenes más amortiguados y una respuesta hidrológica más a largo plazo.

Asumiendo esta contradicción y admitiendo que el modelo, pese a ser significativo, no aglutina el suficiente porcentaje de la varianza correspondiente a estas diferencias en las correlaciones establecidas con y sin retardo, cabe suponer que el resto de cuestiones expuestas más arriba, tales como el volumen total de precipitación en la cuenca, influyen realmente más que los rasgos físicos de las cuencas. No obstante, lo obtenido nos sirve para prestar atención en adelante a la posible incidencia del Índice de Alargamiento en las cuencas.

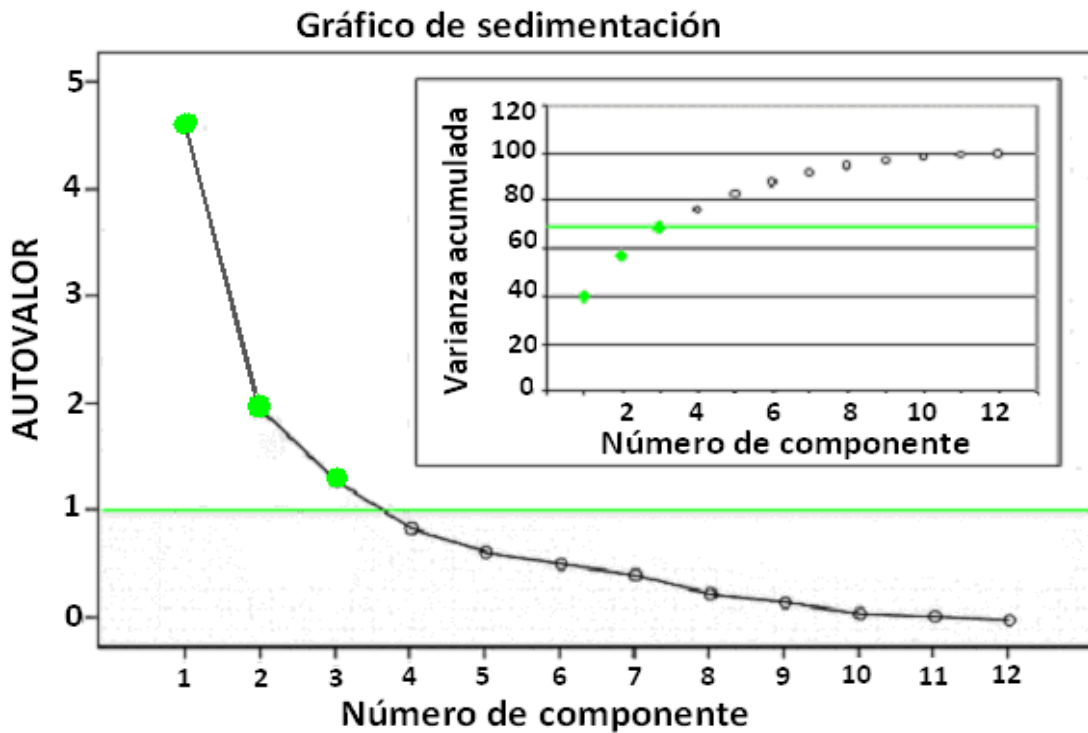
5.3.4. Estudio de la conexión estacional entre las variables.

Con la finalidad de valorar el comportamiento conjunto de ambas variables desde un enfoque estacional, se separan las series en 12 subseries correspondientes con los meses del año y se tasan una vez más las correlaciones en cada uno de ellos entre las variables precipitación y aportación. Previsiblemente existirán relaciones entre el comportamiento de las correlaciones en los diferentes meses, por lo que sobre estos valores se efectuará un Análisis de Componentes Principales para facilitar la interpretación (una matriz de 29 x 12 es difícil de descifrar) y eliminar información redundante.

Se extrae un modelo basado en tres componentes o factores que son combinación

lineal de las 12 variables (correlaciones mensuales P /Ap) y que aglutina un 70% de la variabilidad de las mismas (Ver Figura 5.12), de cuyas cargas factoriales se deduce que existe una clara interpretación estacional en los mismos, como predijimos (Ver Tabla 5.3).

FIGURA 5.12: Gráficos de sedimentación del Análisis de Componentes Principales correspondiente a las 12 correlaciones mensuales P/ Ap (variables) en las 29 cuencas (casos).



FUENTE: *Elaboración propia.*

TABLA 5.3: Cargas factoriales correspondientes a las doce variables (meses) tenidas en cuenta en el análisis de componentes principales.

VARIABLES: CORRELACIONES EN LOS DIFERENTES MESES	CARGAS FACTORIALES DE CADA MES. MATRIZ DE COMPONENTES ROTADOS (VARIMAX)		
	1º	2º	3º
ENERO	<i>0,879</i>	-0,099	-0,042
FEBRERO	<i>0,869</i>	0,086	0,114
MARZO	<i>0,662</i>	0,304	0,123
ABRIL	<i>0,664</i>	0,117	0,465
MAYO	<i>0,771</i>	0,211	0,079
JUNIO	0,275	0,060	<i>0,800</i>
JULIO	0,198	0,530	0,560
AGOSTO	-0,228	0,063	<i>0,764</i>
SEPTIEMBRE	-0,407	<i>0,579</i>	0,094
OCTUBRE	0,373	<i>0,825</i>	0,013
NOVIEMBRE	0,203	<i>0,840</i>	0,164
DICIEMBRE	<i>0,683</i>	0,424	-0,187

* *Valores significativos en cursiva.*
FUENTE: *Elaboración propia.*

Así, el primero de los factores corresponde al invierno y la primavera, pues curiosamente los comportamientos en los seis meses de estas dos estaciones están muy relacionados, y de manera directa, en las cuencas piloto; el segundo se asocia a las correlaciones del otoño y el tercero a las del verano. Julio no queda del todo bien definido pero teniendo en cuenta que el modelo resume un alto porcentaje de la variabilidad utilizando solamente tres factores, resulta una solución satisfactoria para la interpretación.

Una vez determinado el modelo se analiza qué ocurre en cada cuenca (Ver Tabla 5.4) y, como es procedimiento habitual en este trabajo, se establecerán comparativas y se describirán las pautas observadas.

A su vez, los resultados de esta tabla se muestran en la Figura 5.13 para observar si existen tendencias espaciales que revelen más información sobre el funcionamiento estacional de la respuesta hidrológica a la precipitación. Dicha figura consta de tres mapas, uno por

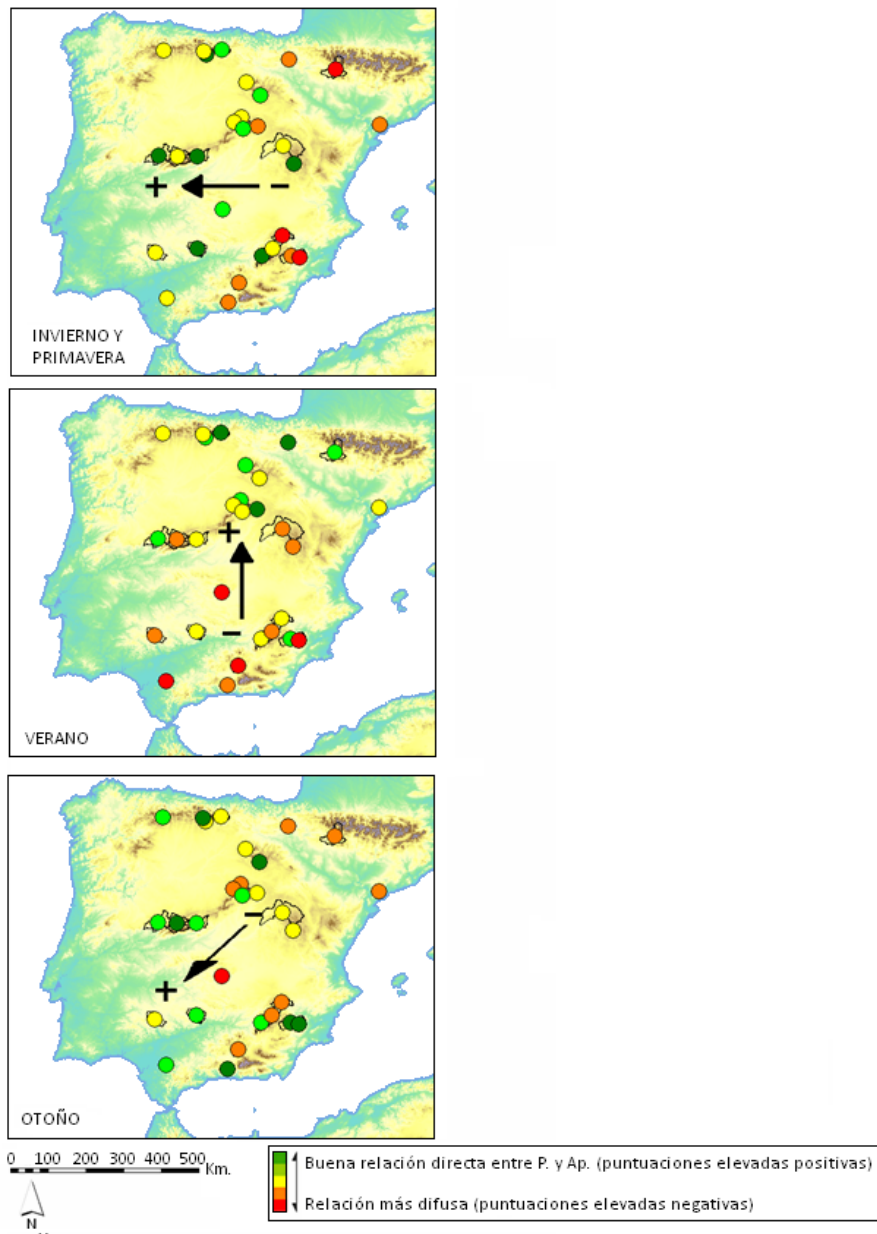
factor, y para cada uno aparecen las puntuaciones factoriales correspondientes a las 29 cuencas (casos) derivadas del análisis de componentes principales anterior. En verde se muestran las cargas factoriales positivas muy elevadas, en rojo las altas negativas, las cuales pueden indicar que en los meses que engloba el factor las correlaciones entre P. y Ap. en la cuenca pueden ser incluso negativas.

TABLA 5.4: Puntuaciones factoriales correspondientes a las 29 cuencas.

CUENCA	PUNTUACIONES FACTORIALES COMP. 1 (CORRELACIONES INV.+PRIM.)	PUNTUACIONES FACTORIALES COMP. 2 (CORRELACIONES OTOÑO)	PUNTUACIONES FACTORIALES COMP. 3 (CORRELACIONES VERANO)
ALFONSO XIII	-1,25	1,38	0,99
ALLOZ	-0,48	-0,62	2,95
ARLANZON	-0,24	-0,47	0,86
BARRIOS DE LUNA	0,22	0,60	0,15
BERMEJALES	-0,80	0,98	-0,80
BURGOMILLODO	0,06	-0,69	0,17
CAMPORREDONDO	0,21	1,16	0,11
CERVERA RUESGA	1,15	0,04	0,38
CUBILLAS	-0,81	-1,08	-1,31
CUERDA DEL POZO	0,78	1,00	0,15
EBRO	0,56	0,03	1,61
EL BURGUILLO	0,94	0,29	0,03
EL PINTADO	-0,28	1,19	-0,29
EL VADO	0,54	0,72	0,03
ENTREPEÑAS	0,14	-0,45	-0,32
FUENSANTA	0,31	-0,74	-0,84
GABRIEL Y GALAN	1,57	0,68	0,45
GASSET	0,64	-2,64	-1,05
GUADALMELLATO	1,22	0,34	-0,13
LA CIERVA	-2,96	1,85	-1,16
LA PEÑA	-1,69	-1,05	0,53
LA TOBA	1,06	-0,17	-0,52
LINARES DEL ARROYO	0,05	-0,79	0,42
PALMACES	-0,38	-0,39	1,54
RIUDECANYES	-0,95	-1,20	0,13
SANTA TERESA	0,22	1,20	-0,26
TALAVE	-1,64	-1,4	-0,13
TORRE DEL AGUILA	0,28	0,34	-1,95
TRANCO DE BEAS	0,95	0,45	-0,03

FUENTE: *Elaboración propia.*

FIGURA 5.13: Mapa de las puntuaciones factoriales correspondientes a las 29 cuencas obtenidas con el análisis de componentes principales.



FUENTE: Elaboración propia.

Tras observar la tabla y el mapa se concluye que, por un lado, las variables no se relacionan entre sí de la misma manera ni con la misma fuerza a lo largo del año dentro de una misma cuenca, tal y como ya podría adelantarse en los apartados anteriores, resultando que

en verano la conexión entre las mismas es generalmente mucho menor. Por otro lado, se observa que existen pautas espaciales en las correlaciones y que además no son fijas a lo largo de las estaciones:

- a. En los primeros y últimos meses del año hay un claro comportamiento longitudinal, destacando la cuenca del Ebro en su conjunto y el levante como aquellas en las que menor interdependencia existe entre precipitaciones y aportaciones, y al contrario en el centro y oeste donde se encuentran mayores conexiones;
- b. En verano, en cambio, las interdependencias bajan mucho en general y son frecuentes las cuencas que muestran algunos meses de correlación negativa, si bien en este escenario se exceptúan las cuencas más septentrionales: la cabecera del Ebro, los pies de la Cordillera Cantábrica, y algunas otras aisladas del interior peninsular como Palmaces, donde se mantiene un considerable vínculo entre las variables ($r > 0,6$).
- c. Finalmente, se observa el caso de los meses otoñales, momento en que las correlaciones son comparativamente mucho mayores, pero cuando a su vez se identifican tres realidades muy diversas: por un lado la práctica totalidad de la Península, donde las correlaciones entre los volúmenes entre una fase y otra del ciclo hidrológico son efectivamente muy altas; por otro el noreste, donde estas decrecen, y en último el caso de la cuenca de Gasset, donde los valores $P. / Ap.$ son inusualmente bajos en estas fechas ($r < 0,4$) y los casos más húmedos de una variable no se corresponden en absoluto con los de la otra.

La explicación de estos patrones estacionales tiene una importante conexión con la interacción de los ritmos de precipitación, evaporación y escorrentía:

En los meses de *verano* en general las relaciones son mucho menos estrechas en toda la Península, y esto tiene fácil interpretación:

- Por un lado, apenas llueve a causa de las altas presiones propias de la época del año pero, si las cuencas son permeables y poseen condiciones previas de suficiente humedad, es posible que se mantenga un caudal de estiaje más o menos significativo. Esto produce cierta discordancia entre precipitaciones y aportaciones.

- Por otro lado, el factor evapotranspiración introduce un mayor desacoplamiento de ambas variables que se incrementa mucho conforme bajamos en latitud y altitud, debido a que no solo se producen menos precipitaciones sino que estas además se evaporan más antes de producir escorrentía. La inexistencia de un caudal de regulación estival en algunas cuencas acentúa mucho más este fenómeno porque la evaporación evidentemente no es igual en terreno seco que en una masa más o menos importante de agua circulante. Parte del calor recibido en un volumen de agua de cierta profundidad, por poca que esta sea, sirve para calentarla y no es inmediatamente aprovechable como fuente de energía para la evaporación; mientras que en pequeñas proporciones de agua que empieza a acumularse y circular, la evaporación es muy superior (Maderrey Rascón, L. E., 2005)

Aun así, conviene recordar que se trata de los meses del año en los que el rango de valores de ambas variables es menor, por lo que cualquier posible cambio que introduzcan la evaporación y el efecto del caudal base en los volúmenes, por leve que sea, ejerce un mayor efecto sobre el desacoplamiento.

Atendiendo al *otoño*, cuando las correlaciones son en general más altas en toda la Península, aparece un patrón de crecimiento de estas en sentido NE – SW.

En el área de la cuenca del Ebro y las cordilleras Costeras Catalanas las precipitaciones en estas fechas son muy abundantes, las mayores del año, pero de carácter marcadamente irregular, torrencial y más bien efímero, por lo que los picos pluviométricos no siempre aparecen todos los años en el mismo momento. En promedio suelen situarse entre septiembre y octubre, desplazándose más hacia el invierno conforme nos adentramos en la Península, gradación que se asocia fundamentalmente a la menor afección del mar mediterráneo, de donde suelen provenir las advecciones húmedas que generan los episodios torrenciales en estas áreas (Martín Vide, J., 2000). Esta naturaleza implica que los meses otoñales sean pluviométricamente muy cambiantes en esta zona, tanto más si atendemos a la escorrentías, sobre las que además está incidiendo una evapotranspiración aún bastante importante en estas fechas, introduciendo multitud de escenarios; tampoco puede olvidarse el factor infiltración, que aún desajusta más las interconexiones y que motiva que, de hecho, en las cuencas permeables el desacoplamiento se acentúe. Así, en otoño se observan unos diagramas

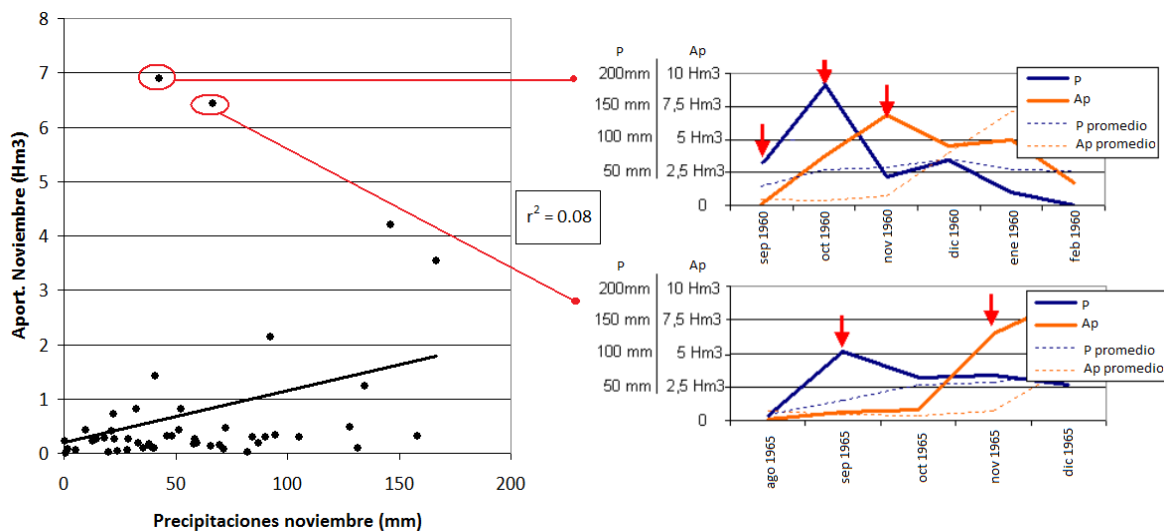
de dispersión muy globulares y una mayor divergencia entre ambas variables que en el resto de la Península.

Conforme más al suroeste, los otoños suelen tener un buen acoplamiento P. / Ap. El único caso aislado donde esto no se cumple es la cuenca de Gasset en el Guadiana, con unos valores muy bajos de correlación en los meses otoñales. En esta área piloto ya se identificó- en el capítulo correspondiente a la caracterización de las series- un comportamiento hidrológico otoñal bastante inusual y muy condicionado precisamente por la peculiar hidrogeología de esta cuenca.

Esta dispersión del agua en las capas subsuperficiales y acuíferas entraña, por ejemplo, que en esta cuenca la correlación mejore significativamente al desfazar una variable con respecto a la otra.

Sin embargo, lo que más peso tiene en que las correlaciones sean tan bajas es el hecho de que este comportamiento es muy cambiante de un otoño a otro, y es preciso recurrir al examen de los diagramas de dispersión de estos meses en la cuenca para entender qué sucede realmente (Ver Figura 5.14).

FIGURA 5.14: Valores de precipitación y aportación para los 49 noviembres de estudio en la cuenca de Gasset. Pluviohidrogramas mensuales asociados a algunos casos atípicos identificados.



FUENTE: Elaboración propia.

Una vez revisados, se advierte que:

- a) existen muchos meses en los que altas precipitaciones aún no se perciben en la escorrentía, confirmándose lo postulado más arriba,
- b) aparecen un par de casos aislados en los que precipitaciones moderadas derivan en unas aportaciones bastante altas en comparación con el régimen habitual de la cuenca, asociándose a lluvias inusuales y bastante cuantiosas ocurridas a finales de verano y prolongadas hasta principios de otoño. Éstas saturan las capas permeables y acaban produciendo escorrentías sostenidas y abundantes varios meses antes de lo esperado con arreglo a los promedios.

Por lo tanto, serán las singularidades climáticas del este y noreste peninsular las principales determinantes del modelo de correlaciones P. / Ap. otoñal, pero no puede pasarse por alto que también las condiciones hidrogeológicas son muy variables en esta estación- no solo entre los diferentes casos de estudio sino, en ocasiones, dentro de una misma cuenca entre un año y otro- y esto condiciona que surjan disconformidades con el patrón geográfico básico.

Por último, lo que sucede en los *meses invernales y primaverales* también sigue una conducta geográfica marcada, en este caso longitudinal.

La explicación en este caso se asocia al hecho de que éste sea aproximadamente el mismo patrón que siguen los volúmenes totales de precipitación en estas fechas. Durante el invierno en el interior y oriente peninsular se suele generar un potente anticiclón térmico, provocando que las cuencas que se encuentran bajo su influencia vivan escenarios de humedad variable según el año del que se trate; sin embargo, en las zonas de la mitad occidental no se percibe tan intensamente dicha alta presión a causa de la mayor influencia de los vientos húmedos del oeste, por lo que las perturbaciones frontales asociadas a ellos logran seguir produciendo un importante volumen de precipitaciones. En las cuencas en las que esto sucede, estos son los meses de máxima humedad y las capas subsuperficiales y subterráneas se encuentran saturadas, de tal forma que todo volumen de agua que precipita en estas

circunstancias repercute proporcional y regularmente en la escorrentía.

Se aprecia que hacia el sur se difumina levemente el carácter longitudinal del factor, debido fundamentalmente a que en primavera en esta área se empieza a percibir una recesión general en la humedad a causa de la subida en latitud de los cinturones de presión, así como unas condiciones de mayor evaporación que enmarañan sutil pero perceptiblemente las conexiones entre la lluvia y la escorrentía.

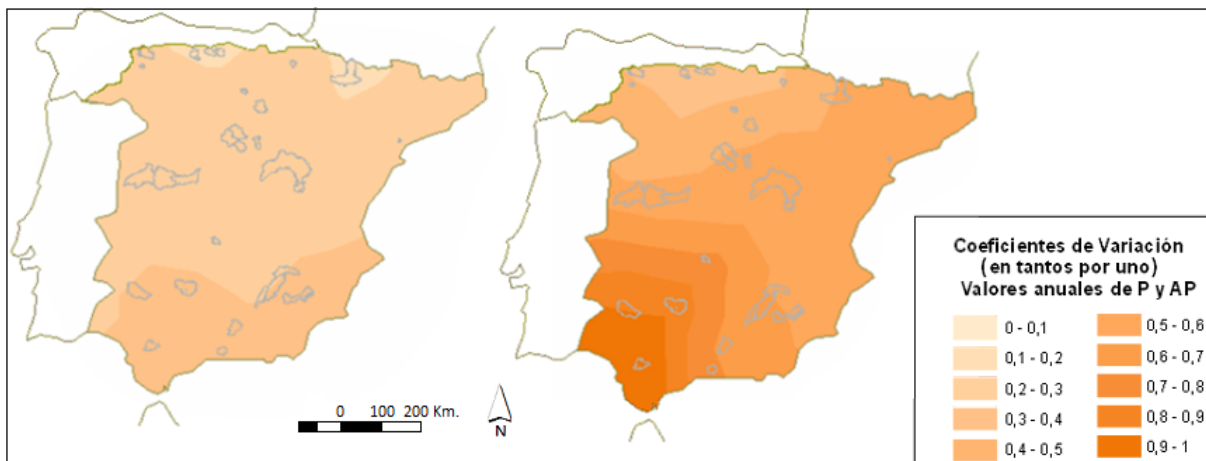
5.4. EL ESTUDIO A NIVEL ANUAL DE LA RESPUESTA DE LAS APORTACIONES A LA PRECIPITACIÓN. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN.

El nivel anual tiene la propiedad de eliminar la variabilidad estacional y agregar en un valor total aleatorio y teóricamente no autocorrelacionado (si bien se ha comprobado que no siempre es así), de manera que se amplían las posibilidades de que exista una mayor relación entre el comportamiento de las variables precipitación y aportación.

Además se aprecia que las precipitaciones son interanualmente bastante regulares, mientras que las aportaciones registran una variabilidad mayor, contrariamente a lo esperado considerando su naturaleza amortiguadora, de ahí que resulte especialmente interesante estudiar esta última variable para conocer cómo funcionan sus irregularidades, teniendo en cuenta además su inmediatez al recurso disponible.

Ya que los resultados sobre variabilidad son espacialmente bastante homogéneos, se ha procedido a crear un mapa con IDW con el fin exclusivo de mejorar la interpretación. En ambas variables aparece un claro patrón latitudinal / diagonal (Ver Figura 5.15), si bien en las escorrentías es algo más difuso y discontinuo, condicionado por las realidades hidrológicas particulares.

FIGURA 5.15: Coeficientes de variación hallados en las precipitaciones (izquierda) y aportaciones (derecha) de las cuencas de estudio.



FUENTE: *Elaboración propia.*

Por otro lado, los posibles retardos relativos se reducen casi por completo a esta escala. Según el *Libro Blanco del Agua* (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000), las cuencas de pendientes acusadas- como podría ser Cervera-Ruesga- o de sustrato poco permeable -tales como Guadalmellato, por ejemplo- registran unas respuestas hidrológicas rápidas y casi perfectamente lineales, por lo que a niveles anuales normalmente se mantiene o incluso se mejora el buen nivel de ajuste obtenido mensualmente, mientras que en el resto de cuencas sí podría detectarse algún desacoplamiento entre las variables incluso a escalas temporales tan amplias, fundamentalmente debido a la redistribución hidrogeológica en acuíferos de largos tiempos de residencia.

Ahora bien, desde este trabajo se plantea la posibilidad de que también ocurra el efecto contrario, dándose que las respuestas hidrológicas de las cuencas impermeables y/o inclinadas sean tan inmediatas que las mejores correlaciones entre las variables se encuentren a cortos plazos y a escalas agregadas no mejoren; por tanto, es preciso calibrar qué ocurre en las cuencas de estudio para acotar correctamente este dinamismo multiescalar de las relaciones entre precipitación y aportación.

Generalmente, al efectuar la *correlación bivariada entre los valores anuales de una y otra variable* en cada cuenca, se corrobora la primera de las hipótesis, aumentando el coeficiente r de Pearson en 28 de los 29 casos un promedio de un 0,1 al emplear esta escala temporal (Ver Tabla 5.5).

TABLA 5.5: Coeficientes de correlación de Pearson (r) anual y su diferencia con respecto a la correlación mensual, identificada en el epígrafe anterior.

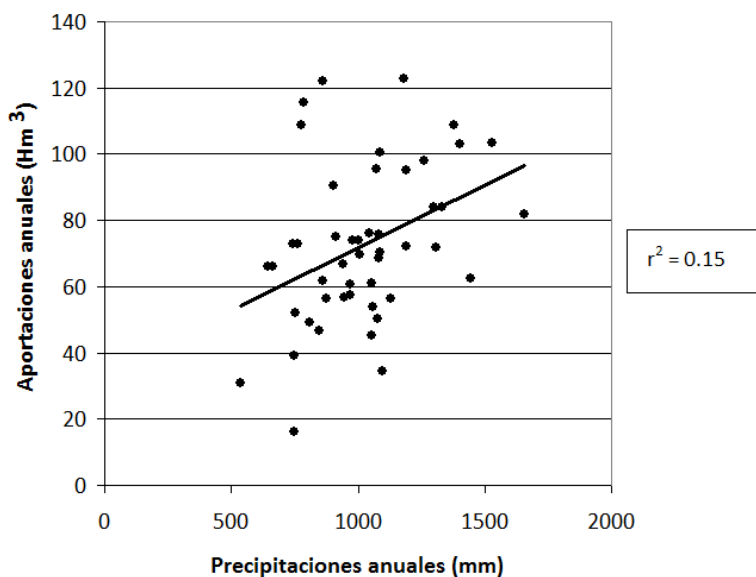
CUENCAS	R PEARSON ESCALA ANUAL	DIFERENCIA CON RESPECTO AL R MENSUAL	CUENCAS	R PEARSON ESCALA ANUAL	DIFERENCIA CON RESPECTO AL R MENSUAL
ALFONSO XIII	0,67	0,04	FUENSANTA	0,64	0,05
ALLOZ	0,66	0,12	GABRIEL Y GALÁN	0,80	0,01
ARLANZON	0,38	-0,20	GASSET	0,72	0,23
BARRIOS DE LUNA	0,68	0,07	GUADALMELLATO	0,89	0,14
BERMEJALES	0,78	0,10	LA CIERVA	0,55	0,00
BURGOMILLODO	0,73	0,19	LA PEÑA	0,55	0,20
CAMPORREDONDO	0,82	0,16	LA TOBA	0,82	0,17
CERVerA RUESGA	0,71	0,00	LINARES DEL ARROYO	0,69	0,20
CUBILLAS	0,67	0,22	PALMACES	0,58	0,07
CUERDA DEL POZO	0,70	0,05	RIUDECANYES	0,45	0,03
EBRO	0,73	0,05	SANTATERESA	0,79	0,07
EL BURGUILLO	0,63	0,11	TALAVE	0,38	0,08
EL PINTADO	0,72	0,06	TORRE DEL ÁGUILA	0,78	0,13
EL VADO	0,84	0,17	TRANCO DE BEAS	0,87	0,14
ENTREPEÑAS	0,69	0,18			

FUENTE: *Elaboración propia.*

Es destacable que las mejoras obtenidas en las cuencas al bajar la escala de detalle hasta el nivel anual son similares y bastante coincidentes con las que se obtenían al realizar los análisis de retardo de la escurrentía acoplando los meses de aportaciones con varios consecutivos de precipitaciones; esto físicamente tiene mucho sentido, puesto que en ambos tipos de análisis se está rebajando este efecto de aplazamiento en la respuesta hídrica.

La cuenca de Arlanzón es el caso concreto donde no aumenta la relación entre las magnitudes al agregar a la escala anual, si bien la explicación es bastante sencilla. Esta cuenca ya obtuvo una baja correlación a nivel mensual solamente debido a la existencia de un único valor muy anómalo en enero de 1970 en el cual, con una precipitación alta pero no desmedida, se alcanzó la mayor escorrentía mensual de toda la serie de 588 meses de la cuenca, triplicando otros máximos registrados como respuesta a precipitaciones similares; será este valor el que al adicionar anualmente altere también la correlación. No obstante, incluso eliminándolo aparece una correlación anual en torno a un r de 0,4 ($r^2 = 0,15$), muy baja, pudiéndose comprobar gráficamente que el diagrama de dispersión es muy globular (Ver Figura 5.16).

FIGURA 5.16: Diagrama de dispersión de los 49 valores anuales de precipitación y aportación en la cuenca de Arlanzón.



FUENTE: Elaboración propia.

La explicación se encuentra en el hecho de que al agregar los datos mensuales, si estos presentan uno o varios meses muy extremos en este, en el año en concreto se acumula un valor muy alto que se aparta mucho de la recta de ajuste originaria que acoplaría ambas

variables si no se produjeran estos fenómenos, tirando de ella y desvirtuando la correlación total final. En la modelización mensual este fenómeno puede quedar más encubierto por el efecto del resto de valores normales, pero a nivel anual- al realizar el ajuste con solo 49 valores- sí se aprecia demasiado la repercusión, máxime si se produce en más de un año, como es el caso.

La razón natural que propicia que se den estos volúmenes mensuales atípicos en la aportación en esta cuenca se atribuyen fundamentalmente a que es pequeña, muy impermeable y de fuerte pendiente y en ella tienden a producirse picos de escorrentía muy efímeros e inusualmente altos.

Esta cuenca será otro de los ejemplos a examinar en profundidad en la evaluación del comportamiento comparativo de ambos tipos de sequías.

Con la finalidad de comprobar qué factores influyen en la mejora de la interconexión de las magnitudes al pasar de la escala mensual a la anual, se prueban las relaciones de estas subidas en el r de Pearson con la morfometría, los usos y la fisiografía de las cuencas, en primer lugar testando las correlaciones bivariadas y posteriormente intentando articular con estas variables físicas un modelo de regresión lineal múltiple que resulte explicativo. Finalmente, se encuentra que la mejor solución posible es la que conecta inversa y significativamente con un r de Pearson de 0,5 a las Densidades de Drenaje de las cuencas con la mejoría en las conexiones entre precipitación y aportación al agregar a nivel anual.

Efectivamente, es muy frecuente que un mayor drenaje relativo implique una evacuación más efectiva del flujo de agua y una infiltración y recarga acuífera menor, condicionando que el ciclo de las aportaciones sea más dependiente del comportamiento de la pluviometría a corto plazo, de manera que las cuencas de este tipo tienen una correlación mensual bastante razonable pero al agregar anualmente no se producen mejorías sustanciales. Todas estas exploraciones inducen a confirmar lo postulado al inicio del epígrafe: no suelen ser las cuencas de mayor potencial hidrogeológico las que menos mejoran la covariación precipitación/ aportación conforme se agrega temporalmente hasta el nivel anual, sino las de evacuación más rápida, ya que de por sí tienen un buen acoplamiento mensual entre las variables.

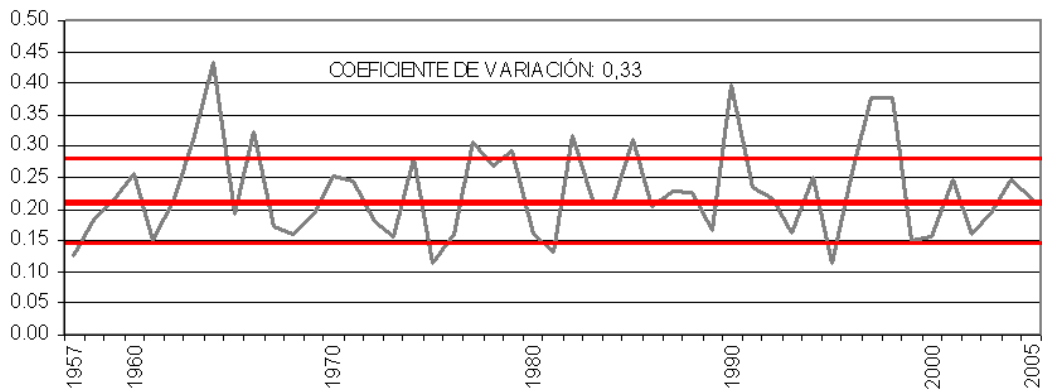
Por otra parte, se ha testado también la evolución de *los coeficientes de escorrentía (Ce) anual* en cada una de las cuencas, encontrándose que – excepto nuevamente en la cuenca de Arlanzón, debido a la enorme dispersión que introduce 1970- se reduce mucho la variabilidad verificada en la aportación interanual (Ver Tabla 5.6 Y Figura 5.17). Esto significa que, tanto en años húmedos como en años secos, la proporción de lluvia que se convierte en escorrentía tiende a ser bastante constante en el cómputo anual; no obstante conviene evaluar si se mantiene una cierta tendencia a mayores coeficientes de escorrentía en las situaciones de mayor humedad, tal y como ocurría a escala mensual.

TABLA 5.6: Comparación entre los valores de los coeficientes de variación de la Aportación anual durante los 49 años de estudio y los que arroja la ratio anual Precipitación / Aportación (C. Escorrentía) en el mismo periodo.

CUENCAS	COEFICIENTE DE VARIACIÓN VALORES ANUALES DE APORTACIONES	COEFICIENTE DE VARIACIÓN VALORES ANUALES DE Ce	CUENCAS	COEFICIENTE DE VARIACIÓN VALORES ANUALES DE APORTACIONES	COEFICIENTE DE VARIACIÓN VALORES ANUALES DE Ce
ALFONSOXIII	0,74	0,60	FUENSANTA	0,54	0,43
ALLOZ	0,33	0,27	GABRIEL Y GALÁN	0,52	0,36
ARLANZON	0,43	0,43	GASSET	0,82	0,62
BARRIOS DE LUNA	0,27	0,19	GUADALMELLATO	0,86	0,61
BERMEJALES	0,51	0,33	LACIERVA	0,50	0,47
BURGOMILLODO	0,39	0,26	LAPEÑA	0,59	0,52
CAMPORREDONDO	0,26	0,14	LATOBA	0,58	0,41
CERVerA RUESGA	0,36	0,27	LINARES DEL ARROYO	0,64	0,47
CUBILLAS	0,78	0,60	PALMACES	0,75	0,65
CUERDA DEL POZO	0,42	0,32	RIUDECANYES	0,52	0,46
EBRO	0,31	0,21	SANTA TERESA	0,43	0,29
EL BURGUILLO	0,54	0,47	TALAVE	0,53	0,56
EL PINTADO	0,92	0,73	TORRE DEL ÁGUILA	1,23	0,89
EL VADO	0,45	0,28	TRANCO DE BEAS	0,59	0,37
ENTREPEÑAS	0,45	0,35			

FUENTE: *Elaboración propia.*

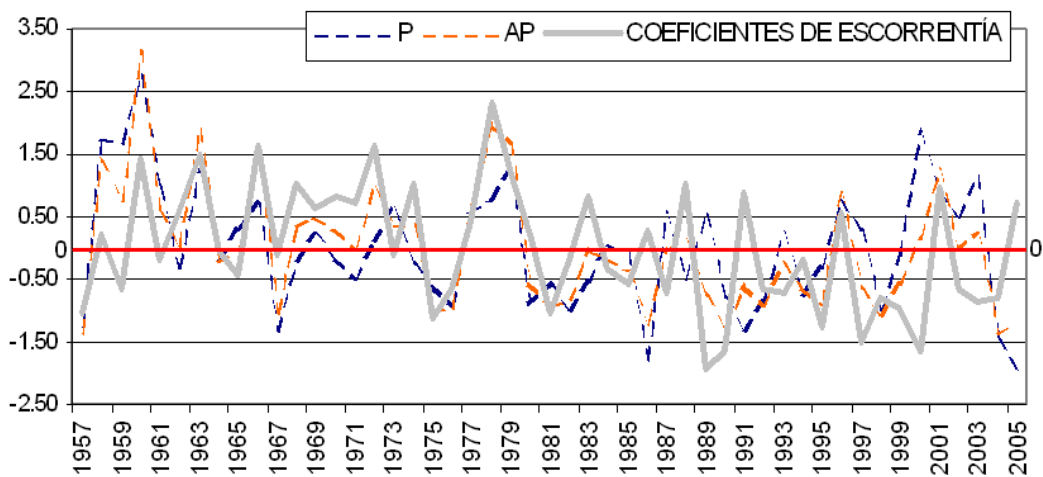
FIGURA 5.17: Ejemplo de los coeficientes de escorrentía anuales en la cuenca de Bermejales.



FUENTE: Elaboración propia.

Efectivamente, a pesar de esta disminución de la variabilidad, el comportamiento interanual de los coeficientes de escorrentías reproduce en buena medida los ritmos de máximos y mínimos que se identifican en la precipitación y la aportación (Ver Figura 5.18).

FIGURA 5.18: Valores anuales tipificados de precipitación, aportación y coeficiente de escorrentía. Cuenca de Camporredondo.



FUENTE: Elaboración propia.

Este ensamblaje de los ritmos del coeficiente de escorrentía con las dos variables de las que deriva tiene lógica porque se asocia al papel de la evapotranspiración como articulador de ambas magnitudes en el ciclo hidrológico, y se explica concretamente porque:

- La evaporación en el cómputo anual acaba detrayendo un determinado volumen de agua bastante poco variable de un año a otro (Herrero Jiménez, C. M., 2007), el cual supone, en cambio, un porcentaje mucho mayor cuando ha llovido muy poco.
- No obstante, el aire en periodos y ambientes de poca precipitación alberga, por lo general, una menor humedad de la que mantendría en circunstancias de frecuente y abundante precipitación, por lo que se encuentra en déficit higrométrico, poseyendo una mayor capacidad de contener agua y tendiendo por tanto a evaporar más (Hämmerly, R., 2001).
- Como se apuntó más arriba, la misma energía térmica que en condiciones de abundancia se invierte en calentar las masas de agua, consigue en situaciones de poca agua circulante evaporar más, reduciéndose por ello el coeficiente de escorrentía en estos casos (Maderey Rascón, L. E., 2005).

Estos tres argumentos conducen a un mayor papel de la evaporación en los años menos lluviosos (y viceversa), la cual sin duda supone un menor porcentaje de la lluvia que se convierte en escorrentía en estos casos.

No obstante, no ha de olvidarse que pese a esta interesante particularidad ya identificada al nivel mensual, la escorrentía y la precipitación poseen una proporción muy estable a la escala anual. En la escala mensual las proporciones entre ambas variables (C_e), incluso utilizando promedios y atendiendo solo a los regímenes, resultaban mucho más variables y por ello merecedoras de un examen en profundidad para conocer las causas físicas que las provocan.

Tanto la baja variabilidad de las proporciones entre precipitación y aportación (C_e) a nivel anual a lo largo de la serie, como la casi total correlación que las une a esta escala de medición son dos circunstancias que reducen la virtualidad de utilizar este nivel de agregación temporal para identificar comportamientos disímiles entre las sequías experimentadas en

ambas magnitudes. En cualquier caso esto no constituye ningún problema dado que esta tampoco resulta la escala temporal óptima para detectar secuencias secas en una sola variable.

No obstante, dado que se trata de la escala utilizada en el *Libro Blanco*, el *Plan Hidrológico Nacional* y en los *Planes Especiales de Sequía* de la mayoría de las Confederaciones Hidrográficas, no se había considerado descartarla directamente, comprobándose que en el caso de que se quiera utilizar un índice de sequía aplicado a los valores anuales -como puede ser el SPI anual (McKee, T. B., 1993)- los resultados obtenidos para las variables precipitación y aportación serán prácticamente indistintos y redundantes, y de hecho así se refleja en dichos documentos.

5.5. RESUMEN. ALGUNAS REFLEXIONES FINALES.

- *Referentes a las relaciones P / Ap.*

A lo largo del capítulo se han identificado una serie de ideas y matices novedosos y de mucho interés:

- La proporción de lluvia que se convierte en escorrentía cada mes es bastante variable dependiendo de la época del año de la que se trate. Esto muy posiblemente repercutirá en que las sequías medidas a nivel mensual reflejen diferencias entre ambas variables.
- La precipitación y la aportación correlacionan directamente a nivel mensual en todas las cuencas, mucho más en aquellas más húmedas, fundamentalmente porque en ellas tanto la infiltración, como las posibles captaciones, como la evaporación son en porcentaje menores con respecto a lo precipitado y a lo que fluye hacia el embalse.
- Los meses que rompen la correlación suelen tener lugar al principio y al final de intervalos de varios meses de lluvias cuantiosas que cesan rápidamente, y que además tienen lugar normalmente a inicios del año hidrológico. En esta etapa del año, la evaporación y la infiltración en el suelo seco agotan gran parte del volumen

precipitado al principio del intervalo, pero al final de él es la fase subterránea la que sigue manteniendo cierto caudal aunque haya dejado de llover, de ahí los desacoplamientos.

- Los datos confirman la tendencia de las aportaciones a coordinarse con los volúmenes de dos o más meses consecutivos de precipitaciones. La respuesta hidrológica presenta, por tanto, un retardo.
- El retardo es tanto más significativo cuanto más húmeda y permeable sea una cuenca. También se aprecia que en las cuencas alargadas tienden a mejorar menos la correlación al realizar el retardo.
- Por contra, en las cuencas impermeables este fenómeno no tiene demasiado peso porque la escorrentía responde más inmediatamente a las precipitaciones recibidas.
- Tampoco se aprecia tanta importancia en el retardo en cuencas muy áridas porque el mantenimiento de la persistencia hídrica en ellas no se garantiza, ya que el volumen captado o evaporado es significativo en comparación con el puesto a disposición mes a mes por medio de la precipitación, y por consiguiente el caudal base tiene poco efecto a la hora de amortiguar y retardar la respuesta hidrológica. Relacionado con esto, es importante no medir el efecto antrópico solo a través de la intensidad del uso de la misma, sino también por la vulnerabilidad hidrológica a este.
- Las correlaciones de los meses y las estaciones por separado son muy cambiantes a lo largo del año y de las cuencas, siempre muy condicionados por los factores variables en la hidrología, fundamentalmente: evapotranspiración, retención nival, deshielo, saturación de los acuíferos y humedad del suelo.
- A nivel anual de medición, las aportaciones tienen mucha mayor variabilidad que las precipitaciones, sobre todo en el sur de la Península.

- Cuando comparamos anualmente ambas variables resultan unas correlaciones muy superiores a las identificadas al nivel mensual. La mejoría al pasar a esta escala más agregada es más fuerte en cuencas permeables y de menor densidad de drenaje porque son las que más lentamente evacuan.

- La proporción de lluvia que se convierte en escorrentía tiende a ser bastante constante a nivel anual, a diferencia de la escala mensual, si bien es mayor en los años húmedos.
 - *Referentes a las escalas temporales.*

Lo analizado a lo largo de este capítulo demuestra que conforme se agrega temporalmente se pasa de dos variables que presentan un fuerte condicionamiento impuesto por los ciclos estacionales, a valores más independientes y también progresivamente más comparables entre ambas magnitudes, hasta el punto de encontrarse una covariación casi total a la escala anual.

De acuerdo con todo ello, puede concluirse que las relaciones entre precipitación y aportación cambian en las diferentes escalas temporales, siendo la mensual la que mejor se adapta al análisis de las sequías, y la que ofrece el justo nivel de covariación y correlación para no redundar información al estudiar ambas variables por separado. La escala anual desfiguraría posibles disparidades importantes en los inicios y finales de las secuencias secas que debiesen tenerse en cuenta, del mismo modo que utilizar una frecuencia de datos por encima de la escala mensual nos aportaría un nivel de detalle excesivo y redundante sin repercutir significativamente en una detección más eficaz de los rasgos fundamentales de las sequías: comienzos, finales e intensidades y posibles retardos entre ambas variables.

Esto justifica el uso de un índice que funcione a la escala temporal mensual.

Capítulo 6

La aplicación del índice de sequía

6.1. LA SEQUÍA. EL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE SEQUÍA PLUVIOMÉTRICA (IESP).

La *sequía* se define como un déficit hídrico inusual, una anomalía negativa en los aportes capaz de ocasionar impactos adversos en la sociedad que la padece debido a su duración e intensidad; no debe confundirse ni tiene por qué estar asociada a la aridez, término que hace referencia a una escasez habitual y que es característica de un determinado clima.

Como ya se adelantó en el capítulo de introducción, la dificultad de la noción de sequía y sus muchos tipos: pluviométrica, edáfica, hidrológica, etc. motivan que no podamos utilizar solamente un indicador, o al menos no uno aplicado a una única variable capaz de caracterizar la sequía en todas estas variantes (Pita López, M. F., 2007); de ahí que pretendamos probar la validez del Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica o IESP para la variable aportación con la finalidad de definir también la sequía hidrológica.

El IESP es un índice mensual de sequía que se basa en el cálculo de las anomalías pluviométricas acumuladas (Blanquero, B. *et al.*, 2012).

Este índice funciona con las medianas como valores normales, menos sesgada por los valores extremos que la media. A partir de la comparación de los valores mensuales con éstas es capaz de identificar la *intensidad* y la *persistencia* de una sequía, dos de sus caracteres más importantes como riesgo.

La aplicación de este índice a las precipitaciones de las diferentes cuencas nos servirá además para evaluar la *distribución espacial* de las secuencias secas que se vayan identificando, calculando así el tercer carácter esencial del riesgo.

Tal y como se explicó en los supuestos de partida de este proyecto, queremos dar un paso más e intentar caracterizar estas secuencias secas a partir de la aplicación del IESP sobre los valores de aportación hídrica medidos para los embalses de la cuenca, evaluando también la intensidad, persistencia y distribución espacial de la sequía hidrológica.

Los datos utilizados originariamente por el índice son los valores brutos mensuales y su cálculo se realiza en tres etapas sucesivas; se explicará el procedimiento para las precipitaciones tal y como aparece reflejado en ANDALUCÍA. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, 2012b, Pita López, M. F., 2000 y Pita López, M. F., 2001, si bien para la esorrentía opera de idéntica manera.

- *Definición del Índice estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP).*

Como señalamos, el IESP 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, T. B. *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:

$$IESP_i = \frac{APAc_i - \overline{APAc}}{\sigma_{APAc}} \quad (\text{Fórmula 6.1})$$

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:

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

(Fórmula 6.2)

siendo:

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

AP_i la anomalía pluviométrica del mes i .

A su vez:

$$AP_i = P_i - P_{MED_i}$$

(Fórmula 6.3)

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, M. F., 2001; Pita López, M. F., 2007).

- *Fases del Cálculo del IESP.*

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 6.3:

$$AP_i = P_i - P_{MED_i}$$

donde:

AP_i = Anomalía pluviométrica mensual del mes i .

P_i = Precipitación mensual del mes i.

P_{MED_i} = Precipitación mediana del mes i.

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, M. F. *et al*, 2002).

En consecuencia, el cálculo de esta segunda fase se resume de acuerdo con la fórmula 6.2, que es la siguiente:

$$APAc_i = AP_i \quad APAc_i = \sum_{j=r}^i AP_j \text{ si } i > 1$$

donde:

$APAc_i$ = Anomalía pluviométrica acumulada del mes i.

El subíndice r a partir del cual comienza la suma se calcula de la siguiente forma:

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

que marca el inicio de la última secuencia seca. Obsérvese que, si ocurre $AP_i < 0$ y $APAc_{i-1} \geq 0$, entonces $r = i$ y, en consecuencia, $APAc_i = AP_i$, marcando el inicio de una nueva secuencia seca.

Por último, en la *tercera etapa* se estandarizarían estas anomalías acumuladas mediante su conversión en puntuaciones Z.

$$ZAPAc_i = \frac{APAc_i - \overline{APAc}}{\sigma_{APAc}} \quad (\text{Fórmula 6.4})$$

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.

Una vez efectuado, tiene otra ventaja importante: la obtención de valores normalizados, y por ello universalmente válidos y comparables para diferentes observatorios, e incluso entre diferentes variables.

- *Umbrales de intensidad del IESP.*

Además, con base en las frecuencias empíricas adoptadas por los valores del IESP para 78 estaciones de observación andaluzas en el periodo 1951-2011 (ANDALUCÍA. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, 2012b), se han establecido las siguientes categorías o intensidades de sequía (Tabla 6.1):

TABLA 6.1: Umbrales de sequía pluviométrica.

NIVEL DE SEQUÍA	VALOR DEL ÍNDICE	UMBRAL	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (%)	PERIODO RETORNO (AÑOS)	NOTAS
Sin sequía	IESP > 0,4				El 70% de los valores se sitúan en esta categoría.
Sequía moderada	-1 < IESP <= 0,4	-0,4	30%	3,33	
Sequía severa	-1,7 < IESP <= -1	-1	14%	7	
Sequía extraordinaria	-2,3 < IESP <= -1,7	-1,7	5%	20	
Sequía excepcional	IESP <= -2,3	-2,3	2%	50	

FUENTE: ANDALUCÍA. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, 2012b.

En consecuencia, el umbral -0,4 en el IESP delimita la aparición de la sequía moderada; a partir del valor del IESP de -1 se iniciaría la sequía severa (con un periodo de retorno de 7 años); el umbral -1,7 da paso a la sequía extraordinaria (periodo de retorno de 20 años) y, por último la sequía excepcional se establecería a partir del valor del IESP de -2,3 (periodo de retorno de 50 años). Este último valor podría servir para delimitar las sequías excepcionales a las que alude la Directiva Marco del Agua.

Será preciso comprobar si dichos umbrales se ajustan a las circunstancias pluviométricas e hidrológicas que se observen a lo largo del estudio.

Al ser umbrales empíricos, aunque obtenidos a partir de un número muy abundante de series de observación pluviométrica de naturaleza muy diversa, es posible imaginar que no siempre se ajustarán de manera precisa a las realidades estudiadas en esta tesis, que rebasan sobradamente el ámbito andaluz. El desajuste podría ser aún mayor al analizar el índice en las aportaciones, dado que, en principio, no tienen por qué tener comportamientos similares los índices de sequía pluviométrica y de sequía hidrológica.

A pesar de todo, este hecho carece de relevancia para este trabajo dado que nuestro objetivo se limita a verificar la posible validez del índice para su aplicación a las aportaciones, y

a comparar el comportamiento de ambos tipos de sequía de cara a la mejora en la gestión del agua. En el caso de que se verificara la adecuación del IESP para el estudio de la sequía hidrológica y supuesto que quisiera ampliarse para el seguimiento a tiempo real, habría que extraer de las series empíricas estudiadas los umbrales más expresivos de las intensidades de sequía. Para ello, esta primera clasificación establecida para Andalucía es sin duda un buen punto de partida.

6.2. APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE SEQUÍA A LAS SERIES DE PRECIPITACIONES MENSUALES (IESP).

Los resultados de la aplicación del IESP a las series de precipitaciones de las 29 cuencas pueden apreciarse en el apartado 4 del Anexo, en forma de gráficos.

A lo largo de este epígrafe estudiaremos dichos resultados, abordándolos desde las generalidades hasta las particularidades, de acuerdo con los siguientes pasos:

- A. En primer lugar se atenderá a la comparación de las series del índice al completo, testando las *correlaciones entre las 29 cuencas* y evaluando dónde aparecen las disparidades más evidentes.

- B. En segundo lugar estudiaremos con qué frecuencia, cómo y cuándo se manifiestan las sequías pluviométricas más significativas para las cuencas de estudio, es decir, atenderemos a los tramos en los que el índice es negativo durante un periodo superior a 12 meses. A lo largo de todo el estudio se hará hincapié en las secuencias secas de duración superior a 12 meses, por considerarse el intervalo necesario para que las sequías empiecen a causar impacto perceptible en la población (Olcina Cantos, J.; Rico Amorós, A., 1995; Pita López, M. F., 1995). Ante la imposibilidad de abordar individualmente o las cuencas o las secuencias secas observadas, se estudiarán los diferentes *modelos de manifestación de la sequía pluviométrica* que se identifican. A su vez, esta aproximación se realizará considerando:
 - b.1. el número de secuencias secas que aparecen en las series,
 - b.2. sus intensidades,

b.3. sus duraciones,

b.4. y por último, la vinculación que con todos estos rasgos poseen las características del histograma correspondiente a la serie del IESP.

- *La comparación de las series del IESP.*

Los valores de precipitaciones originales mostraban entre todas las cuencas una correlación bastante aceptable a nivel mensual, muy buena en gran parte de los casos, máxime si se trataba de cuencas cercanas, pero los coeficientes descienden bastante si testamos la correlación entre los Índices Estandarizados de Sequía mes a mes (Ver Tabla 6.2), lo cual induce a pensar que los meses secos no necesariamente son coincidentes entre las cuencas estudiadas. No obstante, del mismo modo que sucedía con los datos originales, la cuenca de Riudecanyes es la única que no tiene al menos otra con la que la conexión sobrepase el r de Pearson de 0,6.

TABLA 6.2: Coeficientes de Correlación de Pearson entre los IESP calculados para las precipitaciones de las cuencas de estudio.

	ALLOZ	ARLANZON	BARRIOS DE LUNA	BERMEJALES	BURGOMILLODO	CAMPORREDONDO	CERVERA RUESGA	CUBILLAS	CUERDA DEL POZO	EBRO	EL BURGUILLO	EL PINTADO	EL VADO	ENTREPEÑAS	FUENSANTA	GABRIEL Y GALÁN	GASSET	GUADALMELLATO	LA CIERVA	LA PEÑA	LA TOBA	LINARES DEL ARROYO	PALMACES	RIUDECAÑES	SANTA TERESA	TALAVE	TORRE DEL ÁGUILA	TRANCO DE BEAS
ALFO. XIII	-0,1	-0,1	0	0,33	0,08	0	0	0,23	0,09	-0,1	0,15	0,43	0,12	0,37	0,42	0,13	0,30	0,17	0,61	0	0,16	0,18	0,20	0,33	0,16	0,62	0,10	0,12
ALLOZ	-	0,48	0,28	0,33	0,72	0,26	0,00	0,46	0,31	0,22	0,11	0,06	0,16	0,36	0,16	0,13	0,31	0,26	-0,2	0,54	0,48	0,58	0,36	0,20	0,37	0,32	0,49	0,62
ARLAN.	-	-	0,59	0,33	0,63	0,57	0,42	0,37	0,51	0,66	0,37	0,31	0,36	0,48	0,22	0,46	0,38	0,40	-0,2	0,78	0,49	0,77	0,50	0,16	0,61	0,09	0,39	0,45
B. DE LUNA	-	-	-	0,28	0,45	0,85	0,72	0,27	0,64	0,53	0,51	0,39	0,53	0,57	0,32	0,54	0,35	0,37	-0,1	0,55	0,49	0,47	0,46	0,16	0,65	0,05	0,30	0,30
BERMEJ.	-	-	-	-	0,46	0,35	0,24	0,75	0,40	0,02	0,59	0,56	0,43	0,59	0,53	0,48	0,73	0,78	0,14	0,45	0,63	0,48	0,50	0,37	0,62	0,51	0,74	0,64
BURGOMI.	-	-	-	-	-	0,49	0,22	0,59	0,53	0,28	0,38	0,36	0,40	0,62	0,42	0,43	0,52	0,51	0,02	0,70	0,69	0,86	0,63	0,31	0,65	0,42	0,63	0,74
CAMPORR.	-	-	-	-	-	-	0,82	0,33	0,71	0,34	0,66	0,45	0,63	0,56	0,35	0,72	0,43	0,49	-0,1	0,63	0,59	0,49	0,57	0,14	0,70	0,05	0,40	0,37
CERVERA R.	-	-	-	-	-	-	-	0,21	0,54	0,31	0,62	0,31	0,48	0,42	0,32	0,60	0,33	0,37	0	0,43	0,38	0,24	0,42	0,11	0,58	-0,1	0,19	0,17
CUBILLAS	-	-	-	-	-	-	-	-	0,43	0	0,49	0,52	0,37	0,65	0,63	0,51	0,78	0,75	0,15	0,50	0,73	0,55	0,53	0,38	0,64	0,58	0,83	0,85
CUERDA D. P.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,18	0,52	0,51	0,80	0,67	0,41	0,64	0,53	0,50	0,04	0,62	0,70	0,51	0,76	0,17	0,63	0,24	0,45	0,41
EBRO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,09	0,08	0,10	0,21	0	0,11	0,08	0,04	-0,2	0,40	0,08	0,44	0,15	0,11	0,24	-0,1	-0,1	0,06
EL BURGUI.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,55	0,60	0,51	0,37	0,78	0,64	0,72	0,06	0,46	0,55	0,39	0,56	0,25	0,77	0,22	0,55	0,40
EL PINTADO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,64	0,69	0,46	0,67	0,68	0,68	0,24	0,34	0,53	0,49	0,48	0,23	0,61	0,35	0,58	0,37
EL VADO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,65	0,37	0,72	0,61	0,57	0,08	0,45	0,67	0,40	0,70	0,12	0,59	0,18	0,48	0,31
ENTREPE.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,70	0,62	0,76	0,63	0,15	0,60	0,82	0,69	0,71	0,35	0,74	0,52	0,61	0,64
FUENSAN.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,40	0,63	0,52	0,40	0,41	0,60	0,43	0,46	0,45	0,53	0,65	0,50	0,66
GABRIEL Y G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,63	0,67	0,02	0,52	0,66	0,50	0,55	0,20	0,77	0,14	0,59	0,40
GASSET	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,82	0,22	0,52	0,76	0,58	0,64	0,32	0,71	0,51	0,76	0,69
GUADALME.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,15	0,49	0,75	0,49	0,57	0,30	0,74	0,38	0,83	0,65
LA CIERVA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,9	0,07	0,03	0,13	0,28	0,09	0,49	0,09	0,12
LA PEÑA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,67	0,73	0,60	0,29	0,67	0,23	0,52	0,61
LA TOBA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,65	0,72	0,35	0,73	0,43	0,76	0,74
LINARES D. A.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,62	0,27	0,70	0,41	0,56	0,69
PALMACES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,26	0,64	0,38	0,51	0,52
RIUDECA.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,32	0,46	0,32	0,36
SANTA TERESA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,35	0,69	0,65
TALAVE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,46	0,59
TORRE D. Á.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,80

* Los valores rojos representan correlaciones superiores a 0,6, los violeta muestran correlaciones negativas.

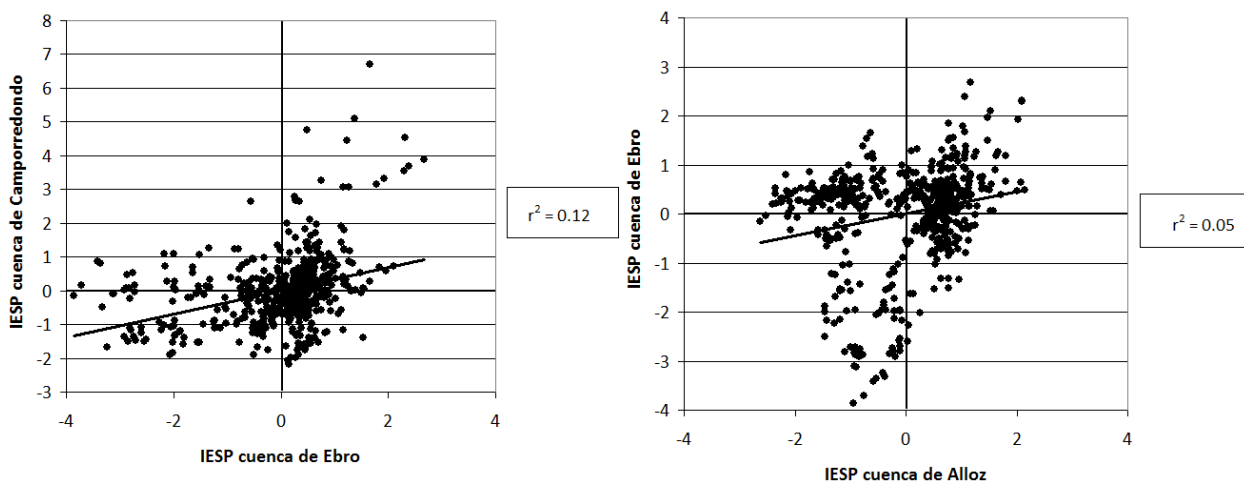
FUENTE: Elaboración propia.

La observación de esta tabla permite concluir que existen correlaciones significativas, pero no uniformemente. Esto indica que existen áreas de estudio con comportamientos pluviométricos bastante independientes, no dándose todas las rachas secas y húmedas con simultaneidad en las 29, lo que viene a subrayar una vez más la variedad hídrica del territorio peninsular, a pesar de la homogeneidad que a menudo introduce la sequía con respecto a la precipitación.

Además, muchas correlaciones son bajas, pero llama especialmente la atención que tanto con Alfonso XIII como con La Cierva se aprecien algunas negativas. Ello implica que cuando aparece sequía en estas áreas de la Península, a menudo hay excedentes en otras, especialmente de del norte peninsular, y al contrario.

Otro matiz verdaderamente interesante es que gran parte de las disparidades entre las cuencas tiene lugar a lo largo de las secuencias secas (Ver Figura 6.1). En sus diagramas de dispersión se aprecia que las mayores discrepancias aparecen en el cuadrante inferior izquierdo.

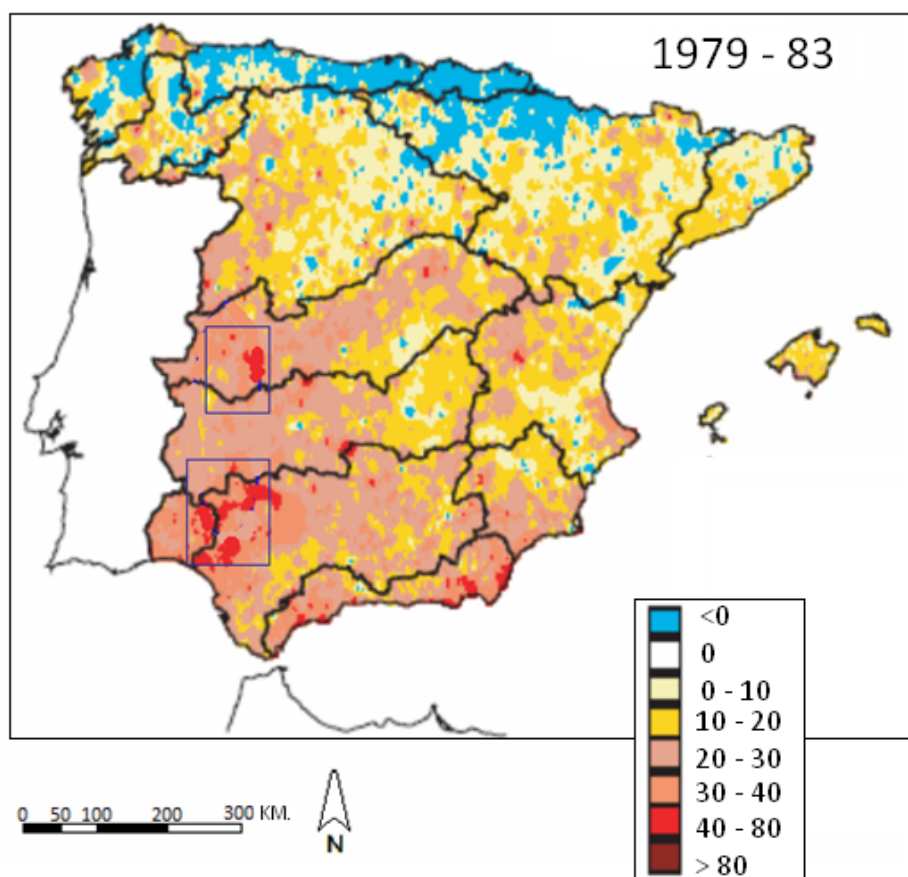
FIGURA 6.1: Dos ejemplos de la relación entre los índices de sequía de dos cuencas.



FUENTE: Libro Blanco del Agua, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000.

Por ejemplo, en El Pintado y Gabriel y Galán la sequía de los años ochenta es especialmente intensa y prolongada, con un IESP de en torno a -3 ; sin embargo, esta secuencia tiene mucha menor relevancia en el resto de casos de estudio. Esto se corresponde con los resultados que aparecen en el *Libro Blanco del Agua* (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000), pese a que para este documento se utilizó otro índice y la escala anual de medición (Ver Figura 6.2).

FIGURA 6.2: Disminución porcentual de la precipitación media en el periodo 1979- 83 con respecto a la media de 1940-1996.



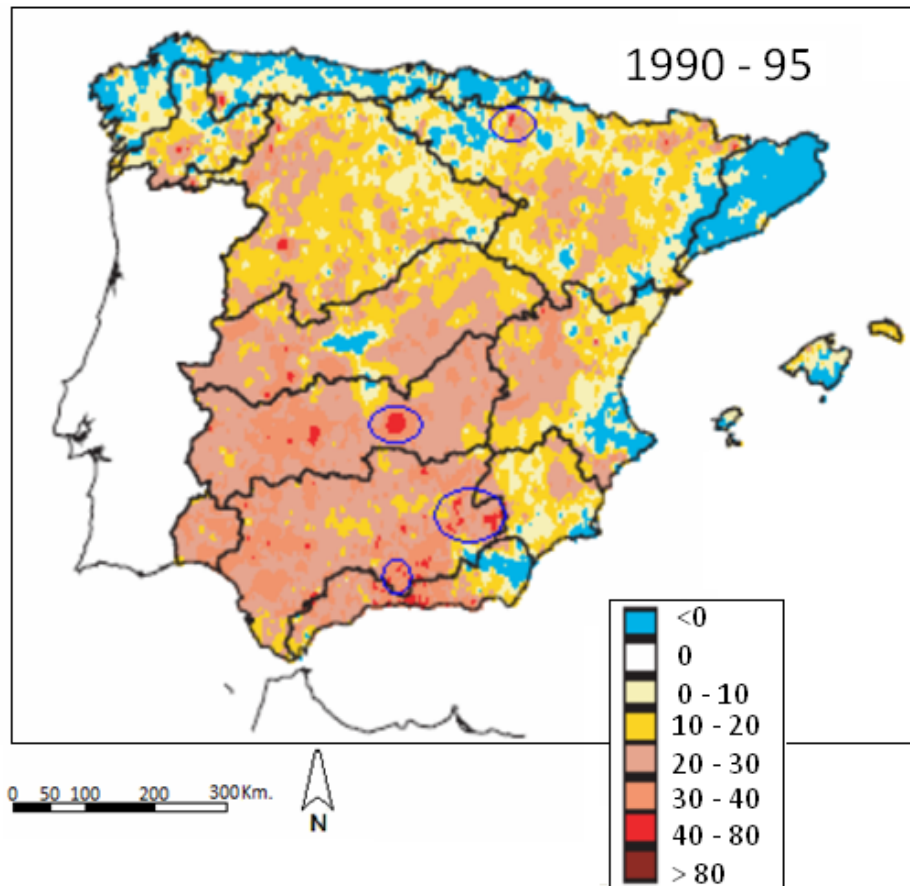
* Los recuadros señalan el fuerte déficit de zonas como El Pintado y Gabriel y Galán.
FUENTE: Libro Blanco del Agua, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000.

La sequía de los años noventa es más generalizada, si bien se muestra especialmente marcada en las cuencas del sur y oeste, donde alcanza índices incluso superiores a -4 (Tranco

de Beas); mientras que no aparece en cuencas como El Vado o Palmaces, o en las cuencas bajas del Segura (La Cierva y Alfonso XIII), donde solamente surgen intermitentemente algunos meses anormalmente secos que rápidamente se compensan.

De nuevo estos resultados obtenidos con el IESP se corresponden con los calculados mediante otros métodos para el *Libro Blanco* (Ver Figura 6.3).

FIGURA 6.3: Disminución porcentual de la precipitación media en el periodo 1990- 95 con respecto a la media de 1940-1996.



* Los óvalos señalan el fuerte déficit de áreas donde se ubican algunos de los casos de estudio.
FUENTE: Libro Blanco del Agua, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000.

En conclusión, el comportamiento del índice es homogéneo en la mayoría de las cuencas, pero es en los momentos en que alcanza valores negativos cuando se aprecian disparidades en las fluctuaciones, lo cual rebaja la correlación entre las series. Como veremos en el siguiente apartado, también aparecen algunas interesantes diferencias en cuanto a inicios, finales, persistencia e intensidad de estas secuencias secas.

- *El estudio de las secuencias secas.*

En la Tabla 6.3 aparecen indicadas todas las secuencias secas de duración por encima de los 12 meses de cada serie, señalándose también sus inicios y finales, su intensidad y su duración.

TABLA 6.3: Secuencias superiores a 12 meses: inicios, finales, meses de duración e intensidad máxima alcanzada.

CUENCA	INICIO SECUENCIA	FIN SECUENCIA	DURACIÓN SECUENCIA	INTENSIDAD MÁXIMA SECUENCIA
ALFONSO XIII	ENE 61	SEP 62	21	-1,49
	OCT 63	NOV 64	14	-1,03
	FEB 70	ABR 71	15	-1,73
	FEB 78	DIC 79	23	-1,29
	OCT 80	SEP 86	72	-2,99
	DIC 94	AGO 96	21	-1,20
ALLOZ	MAY 74	ABR 75	12	-0,31
	MAY 86	MAR 88	23	-0,52
	MAY 89	DIC 05	200	-2,63
ARLAZON	JUL 57	MAY 59	23	-1,07
	NOV 64	OCT 65	12	-0,84
	OCT 83	OCT 84	13	-0,57
	MAY 86	DIC 95	116	-2,89
	JUN 01	OCT 02	17	-0,81
BARRIOS DE LUNA	AGO 62	AGO 63	13	-0,65
	DIC 66	NOV 68	24	-1,31
	NOV 80	NOV 81	13	-0,95
	SEP 85	JUN 88	34	-3,03
	AGO 88	NOV 89	16	-2,05
	MAR 94	NOV 95	21	-0,63
	NOV 99	OCT 00	12	-1,23
	MAY 01	NOV 02	19	-1,27
	ENE 05	DIC 05	12	-0,87
BERMEJALES	DIC 66	FEB 68	15	-0,91
	DIC 72	MAR 74	16	-0,69
	DIC 80	NOV 81	12	-1,37
	DIC 82	NOV 83	12	-1,86
	DIC 84	DIC 86	25	-1,00
	NOV 91	DIC 95	50	-3,24
	OCT 98	SEP 99	12	-1,46
	NOV 01	OCT 02	12	-1,07
	OCT 04	DIC 05	15	-1,24

CUENCA	INICIO SECUENCIA	FIN SECUENCIA	DURACIÓN SECUENCIA	INTENSIDAD MÁXIMA SECUENCIA
BURGOMILLODO	AGO 85	ENE 87	18	-0,95
	NOV 88	FEB 91	28	-1,32
	MAY 91	NOV 97	79	-2,97
	NOV 01	OCT 02	12	-1,34
	DIC 04	DIC 05	13	-2,19
CAMPOREDONDO	DIC 66	JUL 68	20	-1,57
	NOV 75	ENE 77	15	-1,68
	ENE 82	MAR 83	15	-1,35
	OCT 83	SEP 84	12	-0,63
	MAR 86	SEP 87	19	-1,90
	NOV 88	NOV 89	13	-1,66
	JUN 91	SEP 93	28	-1,90
	OCT 98	SEP 99	12	-1,76
	NOV 01	NOV 02	13	-1,27
	NOV 04	DIC 05	14	-2,19
CERVERA- RUESGA	MAR 57	ABR 58	14	-1,41
	NOV 64	NOV 65	13	-2,02
	DIC 66	FEB 69	27	-1,49
	OCT 80	NOV 81	14	-1,11
	FEB 82	MAR 83	14	-1,12
	MAR 86	SEP 87	19	-1,24
	NOV 88	NOV 89	13	-1,75
	JUN 91	JUL 92	14	-1,22
	OCT 98	SEP 99	12	-1,74
	NOV 04	DIC 05	14	-1,52
CUBILLAS	DIC 80	OCT 82	23	-1,05
	DIC 82	ABR 84	17	-1,84
	NOV 92	NOV 96	49	-3,47
	OCT 98	NOV 00	26	-1,85
	NOV 04	DIC 05	14	-1,42
CUERDA DEL POZO	JUL 57	NOV 58	17	-1,19
	MAR 70	ENE 72	23	-2,04
	NOV 75	NOV 76	13	-1,42
	DIC 80	NOV 81	12	-1,18
	FEB 82	JUL 83	18	-1,41
	JUL 86	MAR 88	21	-1,24
	DIC 91	SEP 93	22	-1,08
	NOV 99	OCT 00	12	-0,95
	MAY 01	DIC 02	20	-2,20
	NOV 04	DIC 05	14	-2,44
EBRO	ENE 64	SEP 66	33	-0,86
	OCT 68	DIC 69	15	-1,04
	OCT 85	MAY 93	92	-3,86
	DIC 01	NOV 02	12	-0,66
EL BURGUILLO	FEB 70	ABR 71	15	-0,96
	OCT 75	SEP 76	12	-1,30
	NOV 79	JUL 83	45	-2,36
	OCT 85	MAR 87	18	-1,00
	ABR 91	SEP 93	30	-1,73
	SEP 94	NOV 95	15	-1,49
	OCT 98	SEP 99	12	-1,27
	ABR 01	AGO 02	17	-1,16
	NOV 04	DIC 05	14	-1,95
EL PINTADO	DIC 79	NOV 87	96	-3,10
	SEP 94	NOV 95	15	-1,47
	NOV 98	NOV 00	25	-1,27
	DIC 04	DIC 05	13	-1,36
EL VADO	MAR 70	SEP 72	31	-1,49
	SEP 74	ENE 77	29	-2,76
	OCT 80	OCT 84	49	-2,27
	MAY 86	NOV 87	19	-0,88
	NOV 99	OCT 00	12	-0,89
	MAY 01	NOV 02	19	-1,28
	NOV 04	DIC 05	14	-2,01

CUENCA	INICIO SECUENCIA	FIN SECUENCIA	DURACIÓN SECUENCIA	INTENSIDAD MÁXIMA SECUENCIA
ENTREPEÑAS	ABR 70	ABR 71	13	-0,99
	SEP 80	DIC 87	88	-2,45
	DIC 93	JUL 96	32	-2,48
	NOV 01	NOV 02	13	-1,19
	ENE 05	DIC 05	12	-1,35
FUENSANTA	MAR 61	MAR 62	13	-0,71
	AGO 64	DIC 65	17	-1,05
	NOV 66	ENE 69	27	-2,40
	MAR 70	ABR 71	14	-1,62
	DIC 80	MAY 85	54	-2,32
	NOV 93	AGO 96	34	-3,33
	NOV 04	DIC 05	14	-1,58
GABRIEL Y GALÁN	OCT 74	NOV 76	26	-1,58
	NOV 79	OCT 84	60	-2,54
	MAY 91	ABR 94	36	-2,66
	OCT 98	SEP 99	12	-0,98
	NOV 99	OCT 00	12	-1,11
	NOV 04	DIC 05	14	-1,30
GASSET	ABR 70	ABR 71	13	-1,41
	NOV 79	OCT 84	60	-2,44
	MAY 90	MAY 92	25	-1,41
	NOV 93	AGO 96	34	-3,23
	NOV 99	DIC 00	14	-0,95
	ENE 05	DIC 05	12	-1,94
GUADALMELLATO	NOV 79	NOV 83	49	-2,24
	NOV 92	DIC 95	38	-3,13
	OCT 98	SEP 99	12	-1,48
	NOV 04	DIC 05	14	-1,62
LA CIERVA	ABR 65	SEP 69	54	-1,53
	DIC 69	FEB 72	27	-1,99
	ENE 78	MAR 80	27	-2,41
	OCT 81	ABR 86	55	-1,82
	NOV 86	OCT 87	12	-0,76
	DIC 94	AGO 96	21	-1,43
LA PEÑA	OCT 57	FEB 59	17	-0,99
	SEP 83	OCT 84	14	-0,74
	NOV 88	JUL 96	93	-2,88
	NOV 01	DIC 02	14	-1,20
	NOV 04	DIC 05	14	-2,27
LA TOBA	ABR 70	ABR 71	13	-1,09
	OCT 74	NOV 76	26	-1,78
	DIC 80	ABR 84	41	-1,86
	NOV 92	MAY 96	43	-2,94
	OCT 98	SEP 99	12	-1,40
	MAY 01	DIC 02	20	-1,56
	DIC 04	DIC 05	13	-1,79
LINARES DEL ARROYO	MAR 82	MAY 88	75	-1,51
	SEP 88	JUN 97	106	-2,80
	ENE 05	DIC 05	12	-1,16
PALMACES	ABR 70	ENE 72	22	-2,45
	ENE 83	OCT 84	22	-1,47
	SEP 85	ENE 87	17	-1,02
	MAR 90	MAR 91	13	-1,30
	MAR 94	NOV 95	21	-2,23
	DIC 99	NOV 00	12	-1,21
	ABR 01	DIC 02	21	-1,94
	DIC 04	DIC 05	13	-2,87
RIUDECANYES	FEB 58	FEB 59	13	-1,23
	MAR 66	OCT 67	20	-1,69
	ENE 73	FEB 74	14	-1,19
	AGO 81	JUL 82	12	-1,09
	DIC 82	FEB 84	15	-1,68
	DIC 85	ENE 87	14	-0,75
	AGO 88	AGO 89	13	-1,11
	NOV 92	SEP 94	23	-1,53
	DIC 94	NOV 96	24	-2,02
	MAR 98	SEP 99	19	-0,97
	OCT 04	SEP 05	12	-1,12

CUENCA	INICIO SECUENCIA	FIN SECUENCIA	DURACIÓN SECUENCIA	INTENSIDAD MÁXIMA SECUENCIA
SANTA TERESA	MAR 70	ABR 71	14	-1,09
	ENE 80	DIC 83	48	-1,91
	AGO 85	SEP 87	26	-1,35
	SEP 88	OCT 89	14	-0,95
	MAY 91	DIC 95	56	-2,56
	NOV 99	NOV 00	13	-1,10
	DIC 04	DIC 05	13	-1,89
TALAVE	ENE 64	NOV 65	23	-1,05
	MAR 66	MAR 67	13	-0,81
	FEB 70	ABR 71	15	-2,07
	ENE 83	JUN 86	42	-1,66
	DIC 93	ABR 97	41	-3,42
	DIC 99	NOV 01	24	-1,33
	ENE 05	DIC 05	12	-1,33
TORRE DEL ÁGUILA	OCT 74	AGO 76	23	-1,31
	NOV 79	NOV 83	49	-1,95
	DIC 91	NOV 96	60	-3,48
	OCT 98	FEB 01	29	-2,13
	NOV 04	DIC 05	14	-1,88
TRANCO DE BEAS	SEP 67	DIC 68	16	-0,90
	FEB 83	MAR 84	14	-0,99
	ABR 91	SEP 92	18	-0,99
	NOV 92	DIC 96	50	-4,42
	DIC 98	ENE 01	26	-1,78
	DIC 04	DIC 05	13	-1,84

* Se marcan en color rojo la sequía o sequías más importantes en la cuenca.

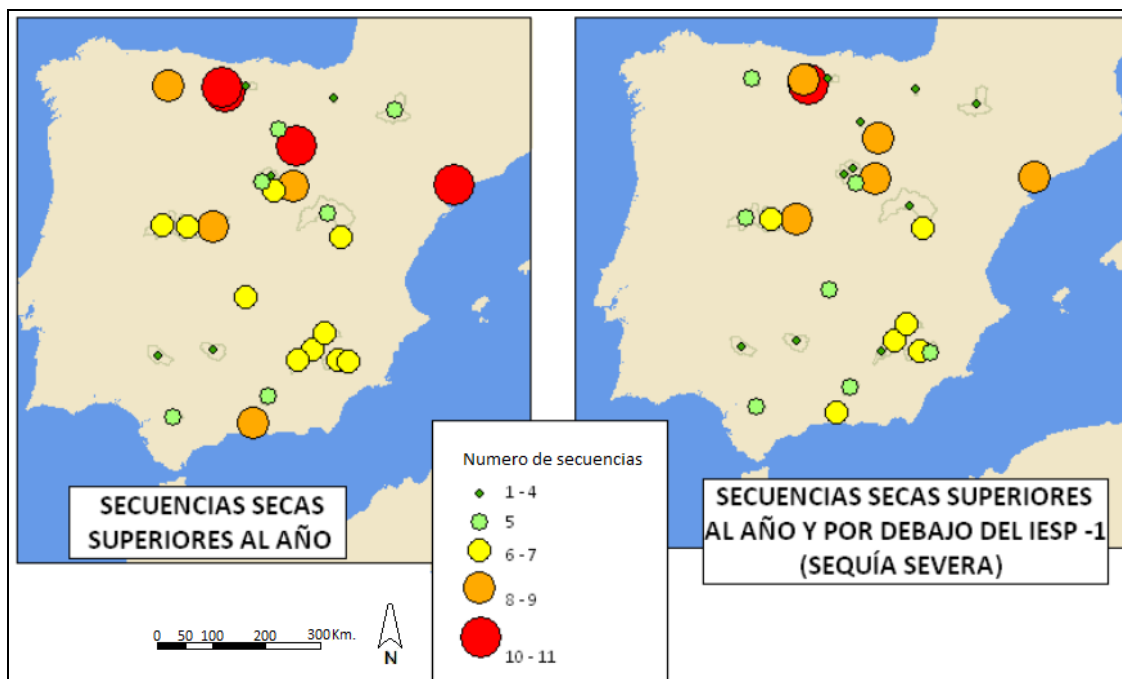
FUENTE: Elaboración propia.

En lo sucesivo, vamos a analizar las secuencias expresadas en esta tabla atendiendo a los rasgos que más importancia tienen desde el punto de vista de su estudio como riesgo natural, esencialmente: número, intensidad y duración.

- *El número de secuencias secas por serie.*

En cuanto al número de secuencias secas de duración superior a 12 meses identificadas en las series pluviométricas, se observa un incremento en sentido SW- NE, destacando las cuencas de Cervera- Ruesga, Camporredondo y Rudecanyes (Ver Figura 6.4), si bien en torno a los Pirineos (La Peña y Alloz) vuelve a apreciarse un descenso en el número. Las inmediaciones de la divisoria Duero – Ebro en torno a los picos de Urbión y el área de unión entre el Sistema Central y el Sistema Ibérico es la única zona de patente heterogeneidad donde se alternan diferentes modelos de series, desde las que solo poseen un par de secuencias secas superiores al año de duración (Linares del Arroyo o Burgomillodo) a las que a lo largo de los 49 años de estudio muestran más de 8 sequías (Palmares o Cuerda del Pozo).

FIGURA 6.4: Número de secuencias secas > 12 meses.



* En el mapa de la derecha se cuentan solo aquellas superiores a esta duración y que alcanzan un valor por debajo del -1 del índice en algún momento de la secuencia.
FUENTE: Elaboración propia.

Si se acota el análisis a las secuencias secas de duración superior al año que llegan a rebasar el umbral de IESP -1 , por considerarse este valor como el límite que separa un déficit normal de uno severo (ANDALUCÍA. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, 2012b), siguen completamente vigentes las observaciones anteriores y además se aprecia que no bajan relevantemente en número, a excepción de Barrios de Luna, que tiene tres secuencias secas de baja intensidad a las que se les supone un impacto poco importante.

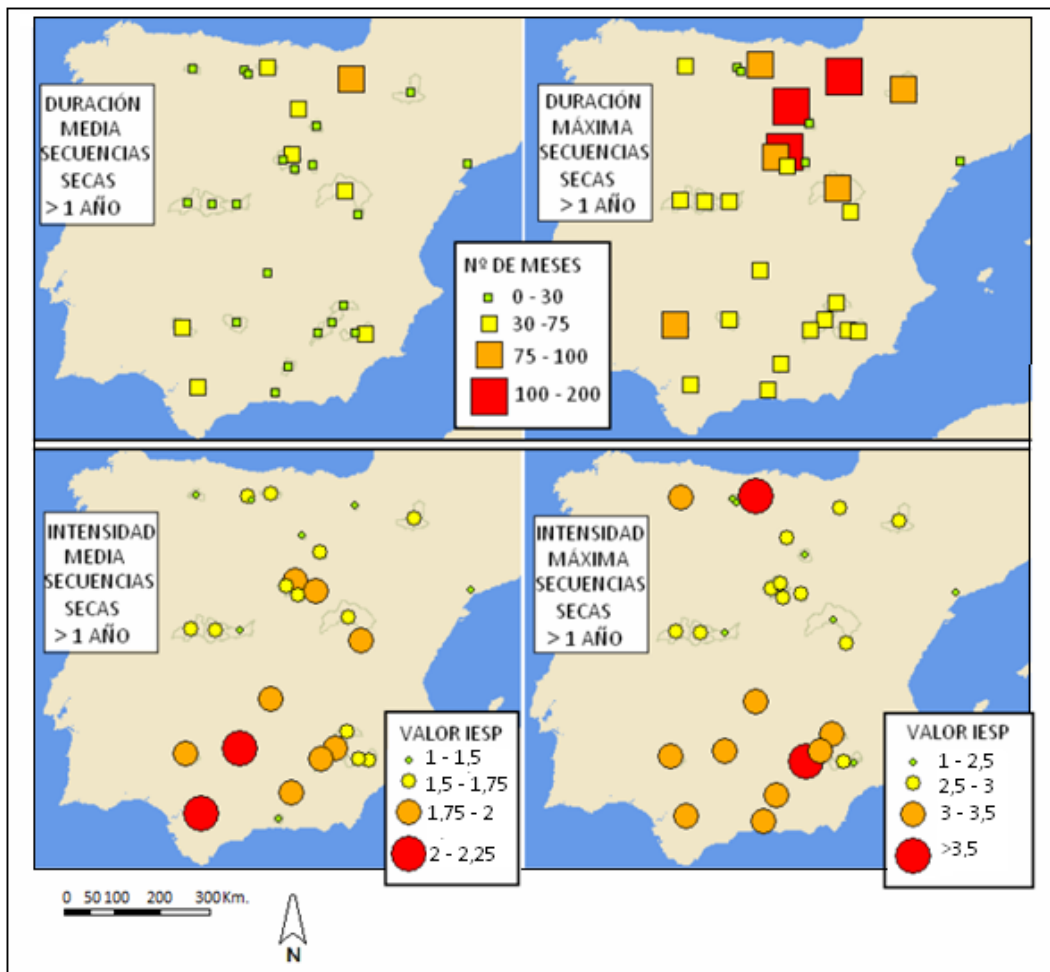
- *La duración de las secuencias secas.*

Analizando la duración de todas las sequías superiores a doce meses (Ver Figura 6.5-arriba) puede extraerse que, aunque la persistencia media sea muy homogénea en el contexto de la Península, con escasas salvedades, la duración máxima de la sequía más importante de la serie es más variable incluso dentro de ámbitos geográficos reducidos. Aún teniendo en cuenta

esta variabilidad en el número se puede concluir que es en el cuadrante nororiental donde se concentran las cuencas donde se produjeron las más largas sequías.

Por lo general, las cuencas con menor número de sequías son las que poseen mayores duraciones de su secuencia más importante, llegándose a prolongar hasta 8 años en los casos de Alloz o Arlanzón, mientras que en las cuencas donde se registran un número elevado de secuencias secas se aprecia una persistencia menor de las mismas, lo cual revela una oscilación constante del índice en la serie.

FIGURA 6.5: Duración (arriba) e intensidad (abajo) de las secuencias secas de duración superior a 12 meses.



** Se muestran los valores medios considerando todas las secuencias que superan los doce meses en los dos mapas de la izquierda y los valores máximos en los de la derecha.
FUENTE: Elaboración propia.*

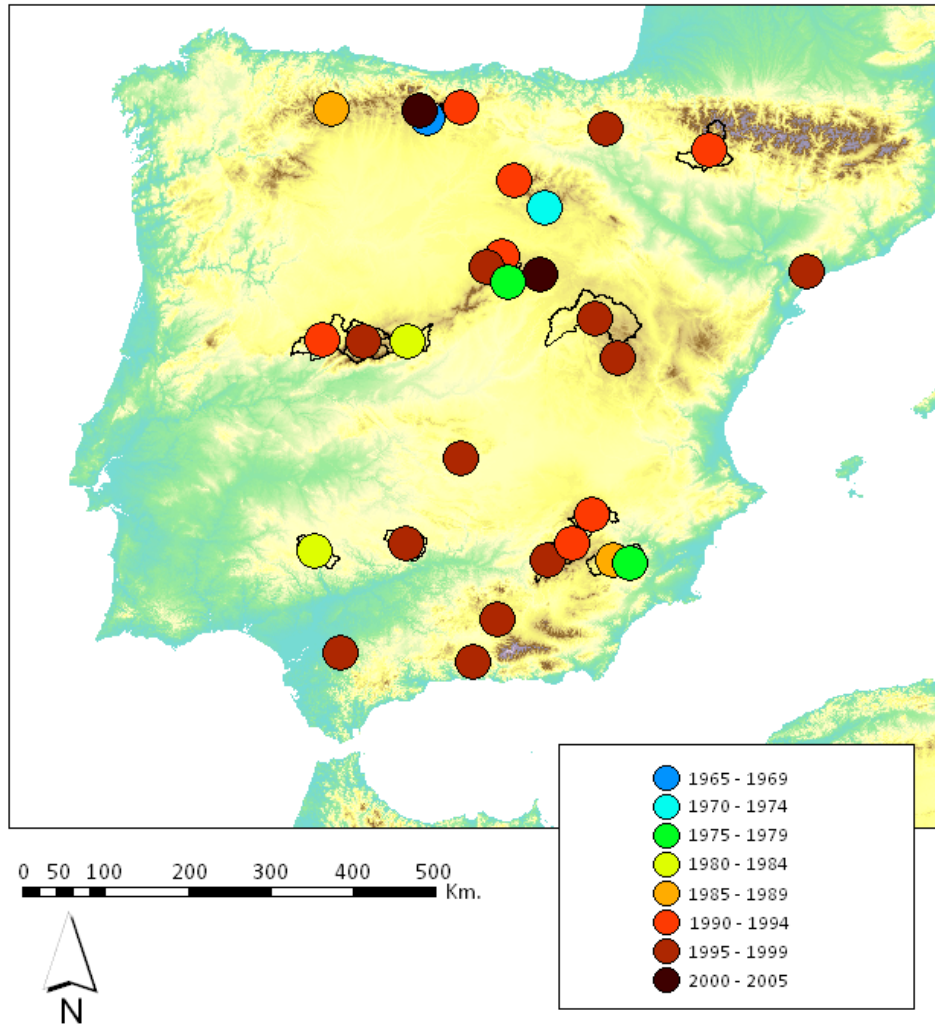
- *La intensidad de las secuencias secas.*

Es importante describir cómo evolucionan las intensidades del índice, una vez detalladas cuántas secuencias secas aparecen a lo largo de las series y cómo de largas son, ya que este parámetro tiene incluso una mayor capacidad de determinar la excepcionalidad del evento.

Analizando espacialmente la intensidad máxima alcanzada por las secuencias, se aprecia que esta suele ser mayor en el sur del ámbito de estudio, tanto si se efectúa un promedio entre todas las sequías registradas en cada una de las cuencas como si se atiende solamente a la sequía más intensa de entre ellas (Ver Figura 6.5- abajo). Curiosamente no suelen ser las cuencas con sequías más largas (Alloz, Arlanzón o Linares del Arroyo) aquellas que logran alcanzar unos valores más acentuados del índice, con excepción de la cuenca del embalse del Ebro donde sí ocurre, por lo que una persistencia del fenómeno no necesariamente garantiza una excavación importante del IESP. Puede incluso afirmarse que el norte registra las mayores duraciones y el sur las mayores intensidades.

Si se estudia la evolución temporal de estas intensidades máximas, encontramos que las secuencias secas más severas tuvieron lugar en las mitades más recientes de todas las series, siendo pocas las excepciones en las que la sequía predominante se identifica antes de 1980 (Ver Figura 6.6).

FIGURA 6.6: Quinquenio en el que se identificó la mayor intensidad de sequía pluviométrica en cada cuenca.



FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 6.7 y la Tabla 6.4 se muestran las intensidades máximas por quinquenios de estudio; es necesario asumir que las cuencas sin símbolo en estas figuras y tablas reflejan la inexistencia de una secuencia seca superior a los 12 meses y con intensidad bajo -1 , pues umbrales de corte inferiores no responden a situaciones suficientemente anómalas, tal y como se explicó más arriba. Según el estudio elaborado por Pita López, M. F. (2011) para un elevado número de series climáticas en Andalucía como apoyo al Subsistema de información climática

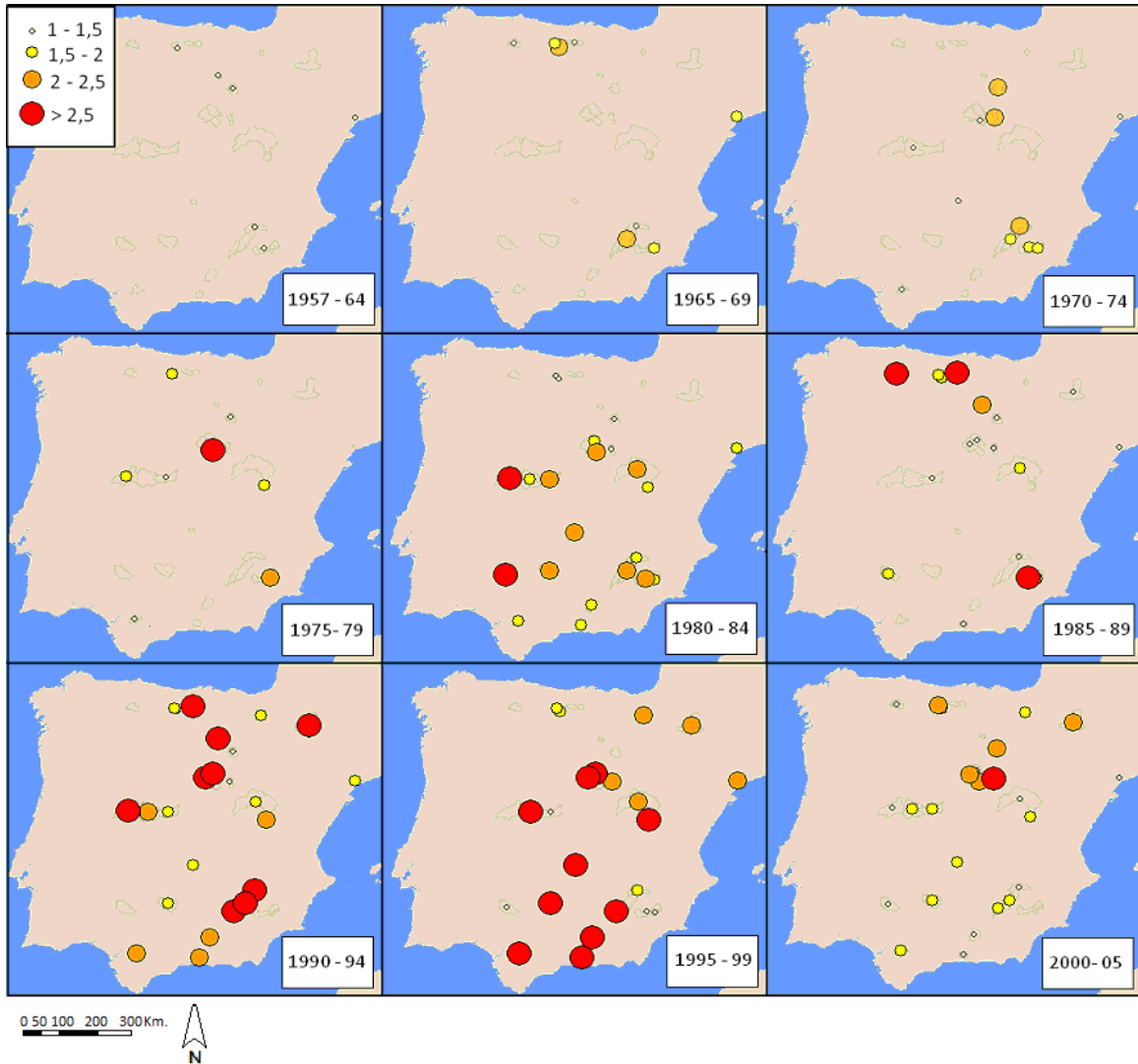
de Andalucía (ANDALUCÍA. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, 2012b), podría considerarse una sequía severa a partir de este IESP -1 , puesto que se trata de un valor que posee un periodo de retorno de unos 7 años y deja en torno a un 14% de valores extremos por debajo (más intensos, más negativos). Esta es la razón de que se haya seleccionado éste como umbral mínimo para poner en evidencia aquellas sequías realmente excepcionales en las series.

Con esta figura - y con la tabla- se corrobora que las grandes sequías pluviométricas comienzan a percibirse en el ámbito mediterráneo peninsular a partir de los años ochenta, resultando particularmente severa las desarrolladas en los noventa, sin perjuicio de lo que pueda suceder con posterioridad al periodo de estudio³. Esta tendencia descrita hacia escenarios más secos coincide con el aumento de la variabilidad pluviométrica y de la persistencia de los años secos que se ha identificado en multitud de observatorios (Aguilar Alba, M. y Pita López, M. F., 1996).

La observación del mapa y la tabla vuelve confirma que la sequía pluviométrica es un fenómeno que, sin ser homogéneo, no reviste una gran variabilidad espacial (Pita López, M. F., 2001) en el contexto de la Península Ibérica, dado que pese a que se traten realidades geográficas y climáticas bastante diferentes, la sequía se revela de manera considerablemente similar en ellas, a grandes rasgos.

³ Se aprecia que a partir de los últimos 12 meses de las series se está empezando a excavar una secuencia seca de considerable intensidad.

FIGURA 6.7: Intensidad máxima alcanzada en cada quinquenio.



FUENTE: *Elaboración propia.*

TABLA 6.4: Intensidad máxima alcanzada en cada quinquenio (columna).

INTENSIDADES IESP	1957- 64	1965- 69	1970 - 74	1975- 79	1980- 84	1985- 89	1990- 94	1995 - 99	2000- 05
ALFONSO XIII	-1,49		-1,73		-2,32	-2,99		-1,2	
ALLOZ							-1,66	-2,36	-1,58
ARLANZON	-1,07					-2,2	-2,89		
BARRIOS DE LUNA		-1,31				-3,03			-1,27
BERMEJALES					-1,86	-1	-2,03	-3,24	-1,24
BURGOMILLODO						-1,32	-2,5	-2,97	-2,19
CAMPORREDONDO		-1,57		-1,68	-1,35	-1,9	-1,9	-1,76	-2,19
CERVERA- RUESGA	-1,41	-2,02			-1,12	-1,75	-1,22	-1,74	-1,52
CUBILLAS					-1,84		-2,36	-3,47	-1,42
CUERDA DEL POZO	-1,19		-2,04	-1,42	-1,41	-1,24	-1,08		-2,44
EBRO		-1,04				-3,36	-3,86		
EL BURGUILLO				-1,3	-2,36	-1	-1,73	-1,27	-1,95
EL PINTADO					-3,1	-1,58		-1,47	-1,36
EL VADO			-1,49	-2,76	-2,27				-2,01
ENTREPEÑAS					-2,45	-1,5	-1,72	-2,48	-1,35
FUENSANTA		-2,4	-1,62		-2,32		-3,33		-1,58
GABRIEL Y GALAN				-1,58	-2,54		-2,66		-1,3
GASSET			-1,41		-2,44		-1,72	-3,23	-1,94
GUADALMELLATO					-2,24		-1,74	-3,13	-1,62
LA CIERVA		-1,53	-1,99	-2,41	-1,82	-1,62		-1,43	
LA PEÑA						-1,46	-2,88	-2,36	-2,27
LA TOBA				-1,78	-1,86		-2,25	-2,94	-1,79
LINARES DEL ARROYO					-1,51	-1,1	-2,8	-2,78	-1,16
PALMACES			-2,45		-1,47	-1,02	-1,17	-2,23	-2,87
RIUDECANYES	-1,23	-1,69	-1,19		-1,68	-1,11	-1,53	-2,02	-1,12
SANTA TERESA			-1,09		-1,91		-2,38	-2,56	-1,89
TALAVE	-1,04	-1,05	-2,07		-1,66	-1,35	-3,11	-1,57	-1,33
TORRE DEL AGUILA			-1,31	-1,31	-1,95		-2,24	-3,48	-1,88
TRANCO DE BEAS							-2,89	-4,42	-1,84



* La leyenda de colores que aparece bajo la tabla es igual que la que se usa en la figura 6.7.
FUENTE: Elaboración propia.

- Las distribuciones de frecuencias de los valores del IESP y sus implicaciones.

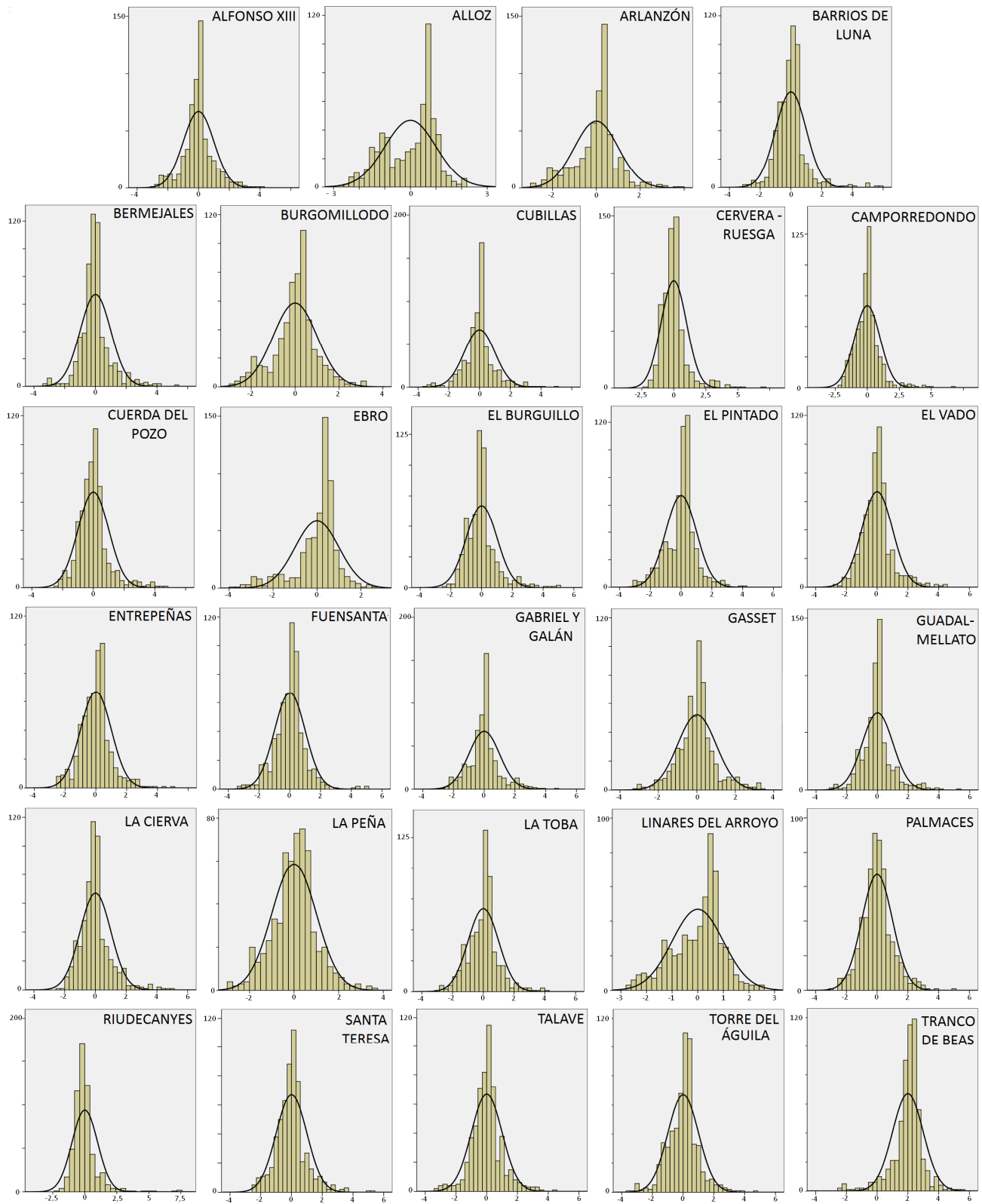
Por último, el estudio exhaustivo de las series del índice de sequía pluviométrica de las diferentes cuencas nos ha llevado a reconocer la existencia de una interesante conexión entre

los anteriores rasgos de las series (intensidad, duración, número, etc.) y los parámetros de forma de los histogramas de frecuencias de estas mismas series.

Estudios previos han evidenciado que las distribuciones de las anomalías acumuladas y los IESP derivados de ellas son poco simétricas y no presentan un buen ajuste a la normal, dificultando, por ejemplo, que se utilicen las probabilidades asignadas a los valores estandarizados. Habitualmente aparece una asimetría positiva que se traduce en unas colas muy largas de valores elevados y en una disimilitud perceptible entre la media - superior- y la mediana - inferior- de la distribución, si bien ambas difieren poco del valor 0, de ahí que la estandarización realizada para el cálculo del índice se considere válida (ANDALUCÍA. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, 2012b; Pita López, M. F., 2000; Sanz Donaire, J., 2007).

Por otra parte estos mismos trabajos certifican que comúnmente los índices también presentan una importante concentración de los valores en torno a la media de la distribución, reduciéndose de manera brusca hacia las colas de esta. A esta forma del histograma se la denomina leptocurtosis y a menudo va asociada a la asimetría de las curvas, propiciando también la inadecuada asociación de los valores tipificados a probabilidades (Ver Figura 6.8).

FIGURA 6.8: Histogramas de frecuencias de los IESP de las cuencas.

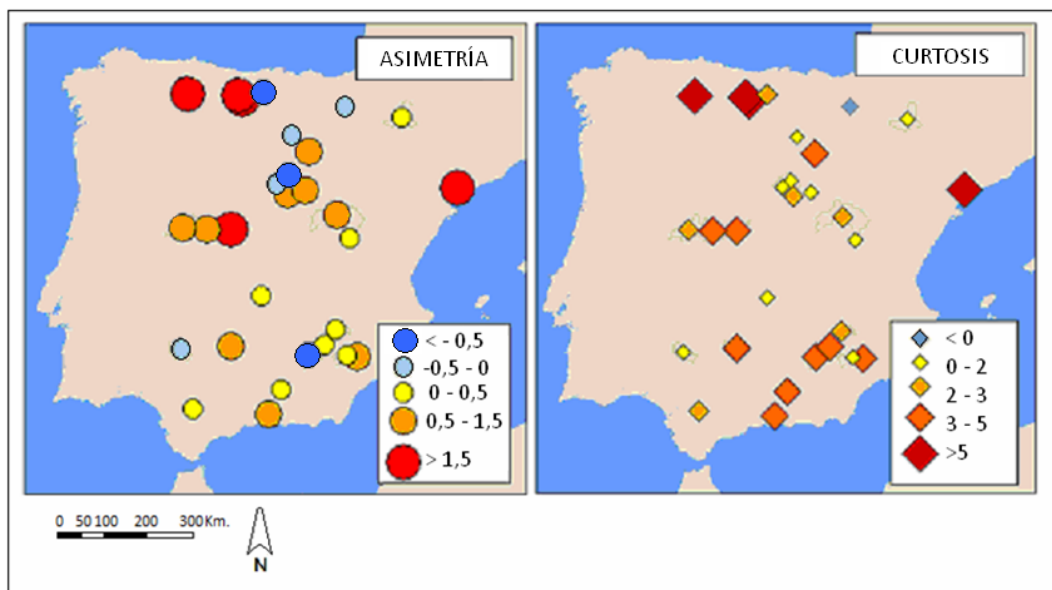


FUENTE: Elaboración propia.

La consecuencia más evidente de estas dos características (asimetría y curtosis positiva) es el hecho de que gran cantidad de los meses reflejen valores negativos pero próximos a 0, lo cual obliga a trasladar el umbral de sequía hacia cifras que verdaderamente reflejen una situación de déficit anómalo de lluvia; anteriormente hemos explicado la conveniencia de situarlo en un IESP de intensidad -1.

En la mitad norte peninsular se encuentran incluso mayores valores de asimetría y curtosis (Ver Figura 6.9).

FIGURA 6.9: Valores de asimetría y curtosis de los histogramas del IESP.



* Los valores negativos se marcan en colores fríos, en cálidos los positivos.
FUENTE: Elaboración propia.

La causa que favorece estas características del histograma no es otra que el contrastado régimen de precipitaciones mediterráneo. La mayoría de los valores que se registran son bajos y por ello las medianas de las series mes por mes también lo son, especialmente en el sur del ámbito de estudio. En cambio, se alcanzan puntualmente valores torrenciales extremos.

Esto influye a la hora del cómputo del índice ya que en el primer paso, al existir estas medianas mensuales tan reducidas, se producen unas anomalías positivas muy elevadas en épocas húmedas. Aunque no se agrupen muchos meses en estas circunstancias de humedad

elevada, en la segunda etapa de cálculo del índice se acumulan unas anomalías positivas muy altas que, para el paso final de dicho cálculo, arrastran la media y la desviación típica hacia valores elevados, implicando que al estandarizar casi toda la serie refleje IESP negativos y próximos a 0, de ahí la pronunciada leptocurtosis. Como estos pocos valores extremos suben mucho la media de la distribución, ésta se vuelve acentuadamente asimétrica positiva.

La curtosis positiva se confirma en 28 de los 29 casos de estudio, siendo Alloz la salvedad; ahora bien, existen algunas excepciones más al supuesto de la asimetría positiva. Estas las constituyen las cuencas habitualmente húmedas en las que se han experimentado deficiencias pluviométricas de cierta importancia durante periodos prolongados.

La explicación se encuentra en el hecho de que no puede llover menos de 0, esto implica que las anomalías negativas tengan un tope que no puedan rebasar, tan grande como sean las medianas mensuales, de ahí que esta circunstancia de asimetría negativa solo se puede concebir en cuencas de importante humedad. Debido a este límite, aunque la metodología de cómputo del índice favorezca al acumular a las anomalías negativas, es poco común que sean éstas las que logren arrastrar la media de la distribución hacia la izquierda; por lo tanto, esto solo puede ocurrir cuando la situación deficitaria se dilate mucho en el tiempo, a diferencia de lo que ocurría en los casos muy asimétricos positivos donde podría experimentarse una descompensación del histograma con solo unos pocos valores de precipitaciones extremadamente elevados, puesto que - en teoría- no existe un límite máximo para esta variable.

Entre estos casos de asimetría negativa se cuentan Tranco de Beas, Ebro, Linares del Arroyo o Alloz; estos dos últimos presentan una leve tendencia hacia la bimodalidad de sus histogramas de frecuencias.

La tendencia hacia la bimodalidad supone un paso más con respecto a lo que sucede en cuencas de asimetría negativa, donde ya se aprecia un claro predominio de una secuencia seca principal en la serie. La clave es que se destacan como bimodales o cuasibimodales aquellas cuencas cuyas series de precipitación experimentan dos etapas diametralmente opuestas: una muy deficitaria y otra muy excedentaria, ambas tan largas y de frecuencias tan elevadas que no se puede distinguir correctamente lo que correspondería a una situación normal debido a que se devalúa el sentido de las medias o las medianas porque estas tienen

mucha menor probabilidad que los valores a ambos lados de ellas, de ahí que además arrojen valores muy bajos o incluso negativos en el coeficiente de curtosis (platicurtosis).

Aun así, todos los casos de estudio con histogramas no asimétricos positivos, sean bimodales o no, pueden atribuirse realmente a matices o variaciones de las mismas circunstancias: una sequía fuerte e inusualmente larga en cuencas de precipitación habitualmente muy abundante.

Una vez explicado esto, resulta sencillo deducir la vinculación existente entre estos parámetros de los histogramas y el *número de secuencias* y su *duración*:

- Si existe una sequía predominante, intensa y larga en las cuencas que propicie una asimetría negativa, no es posible que aparezcan muchas otras circunstancias de déficit inusual, por lo que las cuencas que muestran un valor por debajo de 0 en este parámetro son cuencas con *pocas y duraderas secuencias secas*.
- Si por el contrario la asimetría es positiva, esto se debe a que la media de la distribución es alta, como es el caso de la gran mayoría de las series, apareciendo *muchas secuencias secas* menores, a menudo *de corta duración*. En estas circunstancias se marcan como sequías una situaciones demasiado frecuentes, prácticamente coincidentes con todos los intersticios entre una lluvia abundante y otra, lo cual obliga a bajar el umbral de sequía a intensidades superiores al IESP 0 para que este no pierda funcionalidad, como más arriba se indicó.

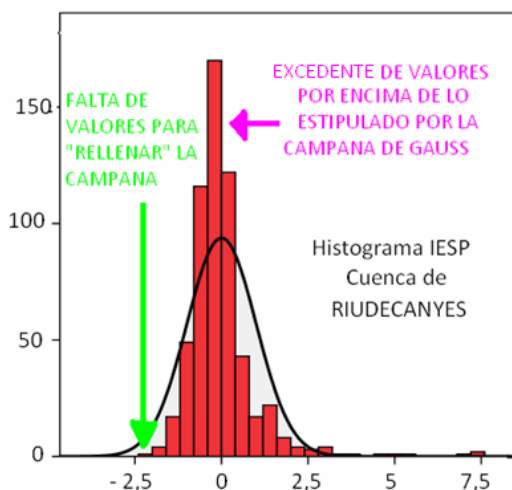
Por su parte, para explicar la *intensidad* de la sequía, es preciso puntualizar que está también muy vinculada a la asimetría. La asimetría elevada, sea positiva o negativa, se relaciona con una gran desviación típica de la distribución, ya que cuanto mayor sea la cola de la misma, mayor variabilidad se introduce en los valores de la serie. Al tipificar, los valores son bajos, especialmente en la mitad del histograma opuesta a la cola (Ver Figura 6.10).

Si efectivamente la cola es positiva, la mitad negativa del histograma tiene unos valores muy moderados y el índice de sequía no alcanza grandes valores de intensidad. Así, en las cuencas de este tipo difícilmente se observan valores que sobrepasen el -2 en el IESP, equivalente a solo - 2 desviaciones típicas con respecto a la media de las anomalías

acumuladas. Si la distribución fuera completamente normal, aún debería existir incluso un 2,5 % de valores más intensos que dicho -2 , regla que evidentemente no se cumple, lo cual confirma la importancia de conocer el efecto de los parámetros de forma del histograma sobre los valores del índice.

La vinculación de la intensidad con la curtosis es menos determinante y más complementaria. Si gran parte de los valores se concentran en torno a la media y hay solamente unos pocos extremos que suben demasiado la desviación típica de la distribución, al tipificar la gran mayoría de los valores tanto de excedente como de déficit resultan muy reducidos. En conclusión, las cuencas de *histogramas asimétricos positivos y muy leptocúrticos* muestran muy leves intensidades.

FIGURA 6.10: Histogramas de los IESP de Riudecanyes.



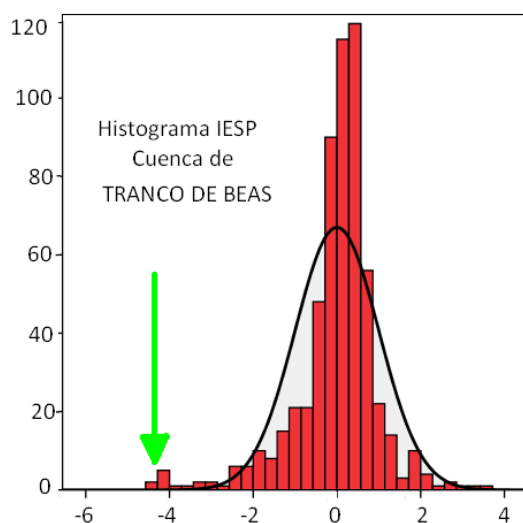
** Se señalan las consecuencias de la elevada asimetría y leptocurtosis.*

FUENTE: Elaboración propia.

En cambio, existen cuencas de histogramas leptocúrticos pero con una *asimetría negativa muy marcada* (casos de Tranco de Beas o Ebro), que muestran una importancia tal de la sequía predominante que, incluso al estandarizar usando unas desviaciones típicas muy altas, esta secuencia seca preponderante muestra unos valores de *intensidad muy elevada* que superan el IESP -3 , ya que la cola negativa se sale ostensiblemente de la distribución teórica

que marcaría una campana de Gauss con la misma media y desviación típica que la que muestran (Ver Figura 6.11).

FIGURA 6.11: Histogramas de los IESP de Tranco de Beas.



** Se señalan las consecuencias de la asimetría negativa y la elevada curtosis.
FUENTE: Elaboración propia.*

El tercer caso posible lo constituyen las cuencas bimodales o cuasibimodales explicadas más arriba, que presentan una leve asimetría negativa y que son claramente mesocúrticas o incluso platicúrticas, las cuales suelen mostrar unas *intensidades de sequía moderadas*. La explicación está en que este tipo de histogramas son reflejo de una larga secuencia seca que se excava lenta y paulatinamente y que tiende a mostrar valores similares de anomalía acumulada durante un dilatadísimo periodo. Esto provoca que no se identifiquen situaciones de excepcional impacto que al tipificar supongan una desviación significativa con respecto a los valores promedio de las anomalías acumuladas, ya que existen muchas parecidas, y por tanto, que no aparezcan valores demasiado intensos de IESP.

La Tabla 6.5 sintetiza toda esta complejidad de cuestiones y posibilidades comentadas.

TABLA 6.5: Resumen de la relación entre los parámetros de forma de los histogramas del IESP y las características de las series a las que se asocian. Algunos ejemplos.

	CURTOSIS POSITIVA	CURTOSIS BAJA O NEGATIVA
ASIMETRÍA POSITIVA	<ul style="list-style-type: none"> • Secuencias secas poco intensas. • Sequías cortas. • Muchas secuencias secas. Ej.: Cervera- Ruesga, La Cierva, etc.	-
ASIMETRÍA NEGATIVA	<ul style="list-style-type: none"> • Secuencias secas muy intensas. • Sequías largas. • Pocas secuencias secas. Ej.: Ebro, Tranco de Beas.	(~ Bimodalidad de los histogramas) <ul style="list-style-type: none"> • Secuencias secas de intensidad moderada. • Sequías muy largas. • Pocas secuencias secas. Ej.: Alloz, Linares del Arroyo.

FUENTE: *Elaboración propia.*

De este modo se concluye que la sola observación de las asimetrías, las curtosis o las bimodalidades en los histogramas puede revelar síntomas de ciertos comportamientos del IESP, fundamentalmente en cuanto al número de secuencias aparecidas y su duración e intensidad. No en vano, lo más interesante es comprobar cómo la existencia de una anomalía pluviométrica prolongada y/o aguda llega a modificar tan perceptiblemente el histograma de frecuencias de la serie completa.

6.3. APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE SEQUÍA A LAS SERIES DE APORTACIONES MENSUALES (IESAP).

Los resultados gráficos de la aplicación del IESP a las series de aportaciones de las 29 cuencas pueden también apreciarse en el apartado 4 del Anexo. En este caso, al índice se le denominará IESAP: Índice Estandarizado de Sequía en las Aportaciones.

Del mismo modo que se hizo con el índice en la pluviometría, a lo largo de este apartado examinaremos estas series, abordándolas desde las generalidades hasta los detalles:

- A. En primer lugar se comparan las series del índice al completo, testando las *correlaciones entre las 29 cuencas.*
- B. En segundo lugar estudiaremos con qué frecuencia, cómo y cuándo se manifiestan las sequías hidrológicas más importantes de las cuencas. De nuevo, por no poder abordar individualmente o las cuencas o las secuencias secas observadas- ya que además este

no sería el objeto de estudio, conducente a extraer pautas o patrones- se estudiarán los diferentes *modelos de manifestación de la sequía hidrológica*, reflexionando sobre:

- b.1. el número de secuencias secas que aparecen en las series,
- b.2. sus intensidades,
- b.3. sus duraciones,
- b.4. y por último, la vinculación que con todos estos rasgos poseen las características del histograma correspondiente a la serie del IESAp.

- *La comparación de las series del IESAp.*

Observando las correlaciones bivariadas que arrojan las series de los índices entre las 29 cuencas, puede concluirse que la sequía hidrológica tiende a introducir un matiz local sobre el fenómeno (Ver Tabla 6.6).

En general se aprecia una clara tendencia hacia menores correlaciones, si bien aparece un grupo de cuencas que entre sí muestran unos valores elevados, muy por encima de los que exhibían entre las series de sus índices pluviométricos. Entre estas destacan los casos de estudio: Fuensanta, Talave, La Peña, Entrepeñas y Linares del Arroyo, los cuales presentan un comportamiento común muy particular, responsable de estos valores tan altos, que será analizado por separado en la clasificación de las cuencas.

Por el contrario, existen cinco cuencas que presentan algún valor de correlación negativa con respecto a algún otro caso de estudio, lo cual indica que sus ritmos de déficit y excedente son completamente opuestos entre sí. Este fenómeno no era tan frecuente en la variante pluviométrica de la sequía, por lo que se confirma que la pauta general conduce al desarrollo de mayores disparidades en las oscilaciones del índice hidrológico. Como casos extremos aparecen las cuencas de Alfonso XIII y La Cierva que arrojan correlaciones negativas y bastante importantes con respecto a casi todas las demás; ambas cuencas en conjunto ya habían destacado a lo largo de todo el trabajo y este análisis confirma que la singularidad se refuerza al considerar su respuesta hidrológica a la sequía.

TABLA 6.6: coeficientes r de Pearson entre los IESAp calculados para las precipitaciones de las cuencas de estudio.

	ALLOZ	ARLANZON	BARRIOS DE LUNA	BERMEJALES	BURGOMILLODO	CAMPORREDONDO	CERVERA RUESGA	CUBILLAS	CUERDA DEL POZO	EBRO	EL BURGUILLO	EL PINTADO	EL VADO	ENTREPEÑAS	FUENSANTA	GABRIEL Y GALÁN	GASSET	GUADALME LLATO	LA CIERVA	LA PEÑA	LA TOBA	LINARES DEL ARROYO	PALMACES	RIUDECANYES	SANTA TERESA	TALAVE	TORRE DEL ÁGUILA	TRANCO DE BEAS
ALFO. XIII	-0,20	-0,46	-0,01	-0,10	-0,09	-0,14	-0,14	-0,20	-0,26	-0,04	0,04	0,08	-0,06	-0,01	-0,02	-0,23	-0,19	-0,14	0,12	-0,12	-0,11	-0,11	0,10	-0,15	-0,05	0,18	-0,12	-0,12
ALLOZ	-	0,38	0,66	0,11	0,59	0,50	0,57	0,50	0,44	0,82	0,26	-0,07	0,42	0,62	0,78	0,25	0,25	0,23	-0,13	0,84	0,43	0,69	0,11	0,23	0,24	0,71	0,12	0,49
ARLAN.	-	-	0,22	0,09	0,24	0,36	0,26	0,28	0,55	0,28	0,17	-0,08	0,29	0,14	0,16	0,36	0,29	0,31	-0,16	0,28	0,24	0,27	0,09	0,29	0,22	0,03	0,18	0,21
B. DE LUNA	-	-	-	0,15	0,63	0,83	0,85	0,59	0,58	0,77	0,47	0,30	0,61	0,68	0,82	0,46	0,38	0,36	-0,06	0,79	0,60	0,69	0,31	0,34	0,51	0,74	0,27	0,75
BERMEJ.	-	-	-	-	0,05	0,24	-0,07	0,23	0,28	-0,09	0,32	0,32	0,34	0,21	0,17	0,29	0,42	0,41	0,17	-0,07	0,36	0,08	0,49	0,11	0,38	0,13	0,46	0,40
BURGOMI.	-	-	-	-	-	0,51	0,66	0,60	0,46	0,59	0,52	0,01	0,62	0,74	0,66	0,43	0,38	0,28	-0,02	0,77	0,68	0,95	0,43	0,35	0,50	0,56	0,17	0,46
CAMPORR.	-	-	-	-	-	-	0,70	0,58	0,73	0,49	0,54	0,39	0,63	0,48	0,63	0,58	0,37	0,39	-0,11	0,56	0,56	0,57	0,41	0,42	0,62	0,54	0,31	0,75
CERVERA R.	-	-	-	-	-	-	-	0,61	0,48	0,69	0,41	0,25	0,52	0,59	0,71	0,48	0,33	0,29	-0,08	0,79	0,54	0,67	0,20	0,32	0,43	0,55	0,20	0,63
CUBILLAS	-	-	-	-	-	-	-	-	0,45	0,47	0,44	0,13	0,45	0,68	0,60	0,32	0,36	0,31	-0,03	0,66	0,57	0,65	0,25	0,44	0,41	0,46	0,31	0,54
CUERDA D. P.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,39	0,57	0,24	0,73	0,40	0,49	0,57	0,52	0,52	-0,09	0,43	0,60	0,50	0,46	0,49	0,62	0,36	0,39	0,61
EBRO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,23	-0,05	0,37	0,63	0,76	0,18	0,17	0,16	-0,17	0,89	0,38	0,67	0,06	0,29	0,20	0,71	0,10	0,41
EL BURGUI.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,35	0,72	0,52	0,45	0,58	0,54	0,55	0,17	0,32	0,61	0,51	0,63	0,44	0,78	0,37	0,46	0,44
EL PINTADO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,34	0,06	0,17	0,42	0,39	0,47	0,18	-0,04	0,18	0,04	0,35	0,21	0,42	0,16	0,41	0,49
EL VADO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,55	0,58	0,63	0,63	0,62	0,13	0,45	0,71	0,61	0,61	0,44	0,76	0,47	0,45	0,64
ENTREPE.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,77	0,37	0,43	0,33	0,05	0,75	0,70	0,79	0,41	0,28	0,51	0,74	0,31	0,46
FUENSAN.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,38	0,40	0,35	0,03	0,82	0,62	0,74	0,32	0,24	0,45	0,88	0,26	0,71
GABRIEL Y G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,54	0,53	0,10	0,25	0,65	0,43	0,45	0,30	0,78	0,24	0,41	0,55
GASSET	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,78	0,20	0,25	0,56	0,40	0,55	0,40	0,65	0,28	0,62	0,52
GUADALME.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,20	0,47	0,32	0,46	0,44	0,63	0,24	0,72	0,49
LA CIERVA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,15	0,10	-0,05	0,09	-0,08	0,17	-0,05	0,13	0,04
LA PEÑA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,49	0,84	0,13	0,35	0,29	0,75	0,11	0,50
LA TOBA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,67	0,55	0,33	0,68	0,41	0,42	0,58
LINARES D. A.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,44	0,40	0,50	0,65	0,25	0,51
PALMACES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,34	0,66	0,30	0,44	0,37
RIUDECA.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,44	0,19	0,33	0,35
SANTA TERESA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,40	0,45	0,54
TALAVE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,58
TORRE D. Á.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,36

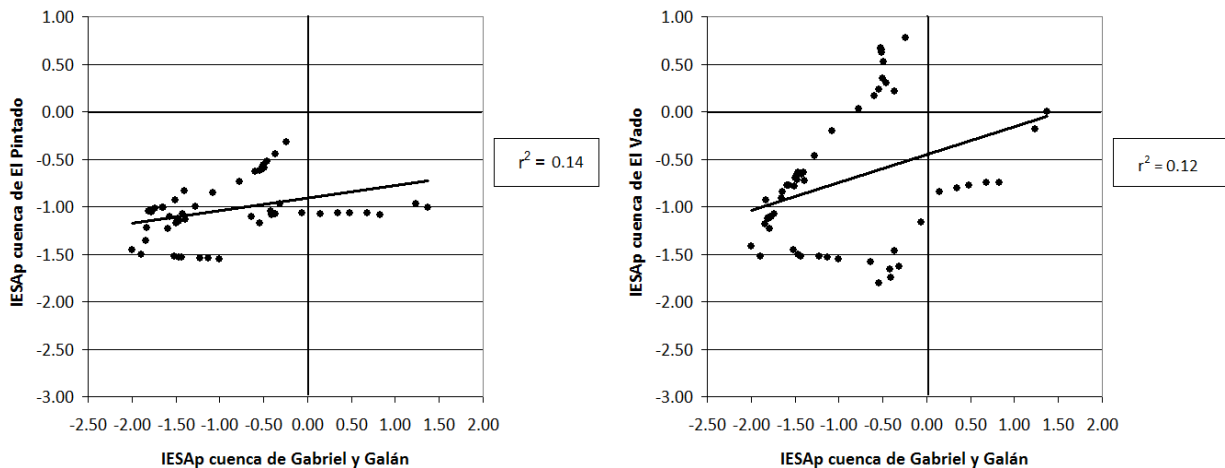
* Los valores rojos representan correlaciones > 0,6, los violeta correlaciones negativas.

FUENTE: Elaboración propia.

Tal y como sucedía en la sequía pluviométrica pero con mayor intensidad, gran parte de las divergencias entre las cuencas tienen lugar a lo largo de algunas de las secuencias secas más importantes dentro del periodo de estudio y la covariación a menudo es mínima entre las cuencas si solo se consideran los momentos en los que alguna de ellas se encuentra en momentos de déficit agudo. En adelante se mostrarán ejemplos de este fenómeno.

Entre estas grandes secuencias secas encontramos en primer lugar la sequía de inicios de los ochenta que dista mucho de ser tan generalizada como en las precipitaciones ya que se aprecia con intensidad solamente en un tercio de los casos de estudio. Ahora bien, ni siquiera en aquellas cuencas en las que tuvo un desarrollo máximo se vivió del mismo modo ni sincrónicamente; como ejemplo puede tomarse el de las cuencas de El Vado, El Pintado y Gabriel y Galán cuyas series en conjunto manifiestan correlaciones significativas que descienden mucho si se atiende solo al tramo de 1980 a 1984, cuando experimentan sequía (Ver Figura 6.12).

FIGURA 6.12 Diagramas de dispersión entre los IESAp de las cuencas con sequía en los 80: Gabriel y Galán, El Vado y El Pintado.



** Solo se usan los valores desde 1980 – 1984.
FUENTE: Elaboración propia.*

En concreto se aprecian en los diagramas de dispersión varios penachos de puntos alineados que indican que en etapas puntuales sí existe una marcada correlación, pero en otros momentos los comportamientos del mismo en una y otra cuenca no son sincrónicos. Especialmente cuando la sequía aún no está consolidada, el comportamiento es más variable, pero cuando se excava se aprecian unos ritmos más acompasados.

Por otra parte, la sequía de principios de los noventa (1990- 94) estuvo más extendida y fue más sincrónica, en parte debido a que su variante pluviométrica tuvo mucha incidencia en el conjunto de la Península. Existen varias cuencas para las que fue una sequía hidrológica fundamental, como veremos más adelante, y si se restringe el cálculo de las correlaciones entre sus series a solo estos cuatro años (Ver tabla 6.7), algunas muestran mayores afinidades con determinados casos de estudio en las mismas circunstancias y marcadas disparidades con otros tantos, sin poder extraerse una pauta demasiado clara.

TABLA 6.7: Diferencias entre los valores de correlación bivariada considerando solo los cinco años 1990- 94 y los obtenidos con la serie completa.

DIFERENCIAS R 1990 – 94 - R SERIE COMPLETA	CAMPORREDONDO	CUERDA DEL POZO	EL PINTADO	GABRIEL Y GALAN	RIUDECANYES
ARLANZON	-0,56	- 0,05	-0,40	-0,84	-0,01
CAMPORREDONDO	-	- 0,18	0,4	0,33	-0,54
CUERDA DEL POZO	-	-	0,15	-0,18	- 0,25
EL PINTADO	-	-	-	0,5	- 0,2
GABRIEL Y GALAN	-	-	-	-	- 0,36

FUENTE: Elaboración propia.

Lo mismo ocurre con la gran sequía hidrológica por excelencia en el grueso del área de estudio: la secuencia que encuentra su máximo apogeo durante 1995- 99 (Ver Tabla 6.8).

TABLA 6.8: Diferencias entre los valores de correlación bivariada considerando solo los cinco años 1995- 99 y los obtenidos con la serie completa en cuencas donde fue una sequía importante.

DIFERENCIAS r 1995- 99 – r SERIE COMPLETA	BERMEJALES	BURGOMILLODO	CUBILLAS	EBRO	EL BURGUILLO	EL VADO	ENTREPEÑAS	GASSET	GUADALMELLATO	LA PEÑA	LA TOBA	LINARES DEL ARROYO	TORRE DEL ÁGUILA	TRANCO DE BEAS
B. DE LUNA	0,34	-0,55	-0,79	-0,30	0,25	0,12	-0,51	0,25	0,27	-0,99	-0,27	-0,66	0,25	-0,36
BERMEJ.	-	0,55	0,31	-0,21	0,39	0,35	0,56	0,07	-0,02	0,50	0,46	0,49	-0,06	0,41
BURGOMILLODO	-	-	0,30	-1,31	0,08	-0,04	0,19	-0,02	-0,05	0,16	0,18	0,04	0,09	0,34
CUBILLAS	-	-	-	-1,31	-0,04	-0,05	0,22	-0,15	-0,24	0,29	0,27	0,26	-0,20	0,21
EBRO	-	-	-	-	-0,33	-0,49	-1,26	-0,11	0,01	-1,70	-0,94	-1,44	0,08	-0,91
EL BURGUILLO	-	-	-	-	-	0,26	0,12	0,31	0,23	0,02	0,18	0,06	0,28	0,42
EL VADO	-	-	-	-	-	-	0,08	0,23	0,17	-0,12	0,08	-0,05	0,27	0,21
ENTREPEÑAS	-	-	-	-	-	-	-	-0,01	-0,05	0,10	0,25	0,11	0,00	0,42
GASSET	-	-	-	-	-	-	-	-	0,17	-0,10	0,03	-0,07	0,28	0,12
GUADALMELLATO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,16	-0,02	-0,11	0,19	0,04
LA PEÑA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,10	-0,05	0,14
LA TOBA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,17	0,02	0,39
LINARES DEL ARROYO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,03	0,27
TORRE DEL ÁGUILA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14

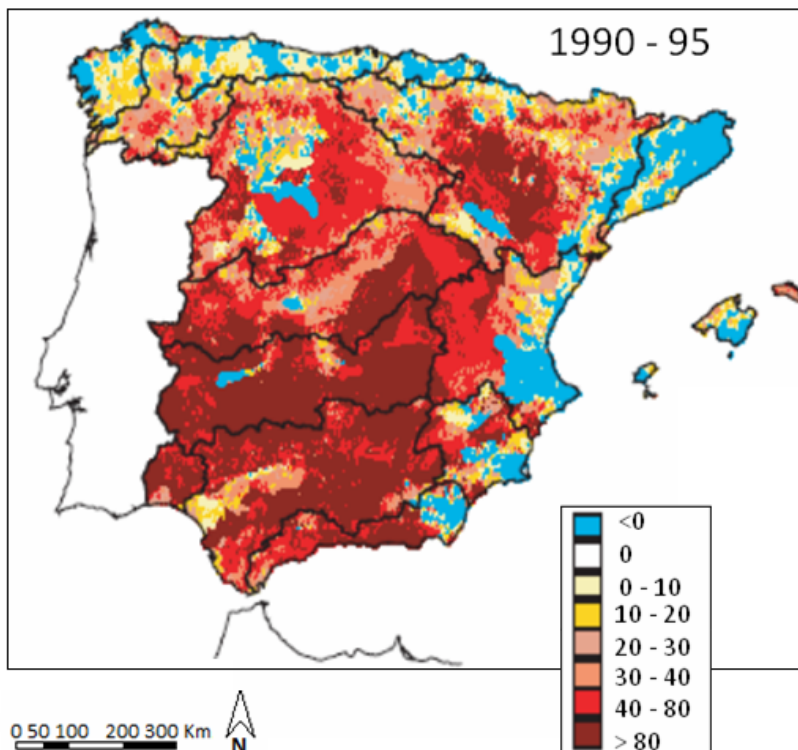
FUENTE: *Elaboración propia.*

Y por último encontramos la sequía de principios del siglo XXI, en general menos notada en el grueso de las cuencas que su homóloga pluviométrica. Cuando se evalúa el comportamiento de las cuencas que sufren déficit en este periodo considerando solo los valores negativos del índice, aparece un acoplamiento razonable, pero los valores en todos los casos son significativamente menores a los que aparecen al correlacionar las series completas, por lo que se vuelve a confirmar que las divergencias en los comportamientos son algo mayores en las sequías que en los momentos de excedente hídrico.

Lo verdaderamente interesante es que estos desajustes durante las sequías son más perceptibles que en la sequía pluviométrica, por lo que parte de la distorsión viene introducida por las diferentes fases del ciclo hidrológico hasta la llegada del agua al aforo de embalse, y esto justifica sobradamente el estudio de esta variedad del fenómeno. Esto lo confirma el *Libro*

Blanco del Agua (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000) cuando muestra que las sequías más importantes de las series son menos homogéneas que en la variante pluviométrica (Ver Figura 6.13).

FIGURA 6.13: Disminución porcentual de la aportación media en el periodo 1990- 95 con respecto a la media de 1940-1996.



FUENTE: Libro Blanco del Agua (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000).

Como se aprecia en la Figura 6.13, extraída del *Libro Blanco del Agua*, durante una de las sequías más importantes hasta la edición del documento se produjeron sobresalientes reducciones de la escorrentía con respecto a los valores normales de la serie en la mayor parte del territorio, en algunos puntos aún mayores que las que tuvieron lugar en la precipitación, si bien el fenómeno es bastante menos uniforme que en ésta.

Como conclusión puede extraerse que las fases secas más importantes se identifican en la mayoría de las cuencas piloto, pero sus características y evolución temporal son muy distintas entre ellas.

- *El estudio de las secuencias secas.*

En la Tabla 6.9 aparecen indicadas todas las secuencias secas de duración por encima de los 12 meses de cada serie, marcándose también sus límites temporales, su intensidad y su duración.

TABLA 6.9: Secuencias superiores a 12 meses: inicios, finales, meses de duración e intensidad máxima alcanzada.

CUENCA	INICIO	FIN	DURACIÓN	INTENSIDAD MÁXIMA
ALFONSO XIII	MAR 60	SEP 62	31	-0,45
	ENE 63	NOV 64	23	-0,33
	MAR 65	SEP 69	55	-0,63
	DIC 69	NOV 71	24	-0,53
	FEB 78	ENE 80	24	-0,44
	SEP 80	OCT 88	98	-1,76
	MAY 94	AGO 97	40	-0,76
	ABR 98	FEB 01	35	-0,75
JUN 02	MAR 05	34	-0,78	
ALLOZ	FEB 89	DIC 96	95	-2,01
	FEB 97	DIC 05	107	-2,14
ARLANZON	ABR 57	OCT 60	43	-1,17
	MAY 62	OCT 63	18	-0,55
	JUL 64	SEP 65	15	-0,64
	ENE 76	DIC 76	12	-0,36
	NOV 80	DIC 81	14	-0,64
	DIC 88	DIC 95	85	-2,6
	DIC 98	NOV 99	12	-0,44
	SEP 01	NOV 02	15	-0,85
ENE 05	DIC 05	12	-0,34	
BARRIOS DE LUNA	MAR 82	ABR 83	14	-0,53
	ABR 86	ENE 88	22	-0,93
	ENE 89	FEB 01	146	-2,19
	MAYO 01	DIC 05	56	-1,28
BERMEJALES	ENE 57	ENE 60	37	-0,71
	ENE 61	DIC 61	12	-0,40
	SEP 64	OCT 65	14	-0,34
	MAY 66	AGO 69	40	-0,58
	MAY 70	MAY 71	13	-0,40
	OCT 71	ENE 77	64	-1,04
	NOV 79	OCT 82	36	-0,80
	ENE 83	DIC 84	24	-0,45
	ABR 85	ENE 87	22	-0,31
	OCT 87	NOV 89	26	-0,57
	DIC 90	OCT 96	71	-1,66
	NOV 98	NOV 03	61	-0,72
SEP 04	DIC 05	16	-0,72	
BURGOMILLODO	OCT 81	JUN 88	81	-1,10
	DIC 88	DIC 03	181	-2,04
	ENE 05	DIC 05	12	-0,42
CAMPORREDONDO	ABR 67	MAR 68	12	-0,27
	ABR 75	ENE 77	22	-0,85
	ENE 81	DIC 81	12	-0,27
	FEB 82	ABR 83	15	-0,92
	NOV 83	OCT 84	12	-0,38
	NOV 85	DIC 87	26	-1,31
	DIC 88	NOV 96	96	-2,08
	MAY 98	NOV 00	31	-1,34
	NOV 01	NOV 02	13	-0,86
ABR 04	INICIO	21	-1,10	

CUENCA	INICIO	FIN	DURACIÓN	INTENSIDAD MÁXIMA
CERVERA- RUESGA	FEB 01	DIC 05	145	-2,76
CUBILLAS	MAR 82 ENE 00	ABR 98 DIC 00	194 12	-2,54 -0,11
CUERDA DEL POZO	ENE 57	NOV 59	35	-1,04
	NOV 64	OCT 65	12	-0,52
	NOV 75	ENE 77	15	-1,06
	MAR 82	MAY 84	27	-0,62
	DIC 86	MAR 88	16	-0,71
	DIC 88	DIC 95	85	-1,81
	ENE 99	OCT 00	22	-0,66
	JUL 01 DIC 04	ENE 03 DIC 05	19 13	-1,34 -1,16
EBRO	DIC 86	MAR 88	16	-0,36
	DIC 88	DIC 05	205	-1,88
EL BURGUILLO	FEB 57	DIC 58	23	-0,74
	DIC 75	DIC 76	13	-0,53
	FEB 80	MAY 88	100	-1,66
	NOV 91	ABR 96	54	-2,00
	DIC 98	DIC 00	25	-1,14
	NOV 01	NOV 02	13	-0,43
	ENE 05	DIC 05	12	-0,81
EL PINTADO	ENE 57	NOV 58	23	-0,76
	DIC 73	NOV 76	36	-0,62
	NOV 79	NOV 87	97	-1,55
	FEB 90	FEB 91	13	-0,34
	ABR 91	DIC 95	57	-1,76
	MAR 98	DIC 00	34	-1,01
	NOV 04	DIC 05	14	-0,69
	EL VADO	ENE 57	MAR 58	15	-0,49
ABR 70		ABR 71	13	-0,94
MAR 73		FEB 74	12	-0,29
DIC 75		DIC 76	13	-1,23
ENE 81		NOV 84	47	-1,81
JUN 86		NOV 87	18	-0,51
MAR 90		FEB 91	12	-0,49
ENE 92		ABR 96	52	-2,31
DIC 98		DIC 00	25	-1,32
JUN 01		FEB 03	21	-1,55
ENE 05		DIC 05	12	-1,26
ENTREPEÑAS	MAR 81	AGO 88	90	-1,09
	DIC 88	NOV 89	12	-0,16
	FEB 90	DIC 05	191	-1,87
FUENSANTA	ENE 83	ENE 85	25	-0,43
	ENE 90	DIC 05	192	-1,95
GABRIEL Y GALÁN	MAR 70	MAY 71	15	-0,70
	DIC 74	NOV 77	36	-1,68
	ENE 80	MAY 84	53	-2,00
	AGO 91	DIC 95	53	-2,09
	DIC 98	NOV 00	24	-1,30
	ENE 04	DIC 05	24	-1,03
GASSET	ENE 57	DIC 59	36	-1,13
	ABR 70	ABR 71	13	-0,40
	FEB 73	FEB 74	13	-0,22
	JUN 74	DIC 76	31	-0,94
	MAY 79	ABR 84	60	-1,08
	OCT 86	NOV 87	14	-0,24
	MAR 88	NOV 89	21	-0,58
	SEP 91	DIC 95	52	-1,68
	DIC 98	DIC 00	25	-0,79
	NOV 01	AGO 03	22	-0,49
	NOV 04	DIC 05	14	-0,47

CUENCA	INICIO	FIN	DURACIÓN	INTENSIDAD MÁXIMA
GUADALMELLATO	ENE 57	NOV 58	23	-0,76
	MAY 66	ENE 68	21	-0,30
	MAR 70	ABR 71	14	-0,57
	FEB 73	ABR 74	15	-0,37
	ABR 75	NOV 76	20	-0,48
	NOV 79	NOV 83	49	-0,86
	MAR 88	OCT 89	20	-0,73
	MAR 90	FEB 91	12	-0,39
	ABR 91	DIC 95	57	-1,72
	MAR 98	NOV 00	33	-0,77
	JUN 04	DIC 05	19	-0,61
LA CIERVA	DIC 57	MAY 59	18	-0,69
	ENE 60	FEB 61	14	-1,13
	FEB 65	ENE 66	12	-0,58
	ABR 66	MAR 67	12	-0,41
	JUN 67	ABR 69	23	-1,11
	FEB 70	FEB 71	13	-0,74
	JUN 76	NOV 77	18	-0,49
	FEB 78	FEB 80	25	-0,62
	JUN 80	OCT 84	53	-1,55
	NOV 86	OCT 87	12	-0,85
	ABR 93	FEB 96	35	-0,72
LA PEÑA	FEB 86	DIC 05	239	-1,74
LA TOBA	ENE 57	MAR 58	15	-0,32
	ABR 70	ABR 71	13	-0,23
	DIC 74	ENE 77	26	-1,05
	DIC 80	ENE 85	50	-1,74
	DIC 88	NOV 89	12	-0,28
	MAR 90	MAR 91	13	-0,49
	DIC 91	ENE 97	62	-2,58
	DIC 98	DIC 00	25	-1,04
	DIC 01	DIC 02	13	-0,47
	ENE 05	DIC 05	12	-0,84
LINARES DEL ARROYO	MAR 82	DIC 05	286	-1,86
PALMACES	ENE 57	NOV 58	23	-0,68
	MAR 70	ENE 72	23	-0,69
	FEB 73	MAY 75	28	-0,34
	OCT 75	DIC 76	15	-0,64
	OCT 80	JUN 88	93	-1,52
	AGO 88	OCT 89	15	-0,43
	DIC 91	DIC 95	49	-0,70
	NOV 98	DIC 00	26	-0,71
	ABR 01	FEB 03	23	-0,71
	ENE 05	DIC 05	12	-0,45
RIUDECANYES	JUL 66	OCT 67	16	-0,78
	DIC 79	SEP 94	178	-1,89
	FEB 95	ENE 96	12	-0,32
	JUN 97	JUN 99	25	-0,43
	FEB 01	ABR 03	27	-0,66
SANTA TERESA	ENE 57	FEB 58	14	-0,78
	NOV 75	DIC 76	14	-0,89
	ENE 80	MAR 85	63	-2,24
	NOV 85	NOV 87	25	-0,82
	MAY 91	ENE 96	57	-1,92
	NOV 98	DIC 00	26	-0,99
	NOV 01	NOV 02	13	-0,47
NOV 04	DIC 05	14	-1,28	
TALAVE	ENE 83	FEB 91	98	-0,52
	ENE 93	DIC 05	156	-2,21

CUENCA	INICIO	FIN	DURACIÓN	INTENSIDAD MÁXIMA
TORRE DEL ÁGUILA	ENE 57	NOV 58	23	-0,47
	MAY 64	NOV 65	19	-0,33
	MAR 66	DIC 68	34	-0,42
	MAY 70	ABR 71	12	-0,38
	ABR 72	ENE 77	58	-0,73
	NOV 79	DIC 84	62	-0,64
	MAY 86	NOV 87	19	-0,29
	MAR 88	NOV 89	21	-0,51
	FEB 90	DIC 95	71	-1,13
	ABR 98	SEP 99	18	-0,47
	NOV 99	DIC 00	14	-0,44
	ABR 01	OCT 02	19	-0,37
	NOV 04	DIC 05	14	-0,43
TRANCO DE BEAS	MAR 61	FEB 62	12	-0,22
	DIC 66	DIC 68	25	-0,69
	MAR 70	MAR 71	13	-0,26
	DIC 72	ABR 74	17	-0,46
	JUN 74	NOV 76	30	-0,66
	JUN 80	FEB 84	45	-0,68
	NOV 88	DIC 96	98	-2,23
	AGO 98	ENE 01	30	-0,85
	ABR 01	DIC 05	57	-1,02

* En rojo se marcan la sequía o sequías, en caso de que haya varias similares, de mayor importancia en cada cuenca.

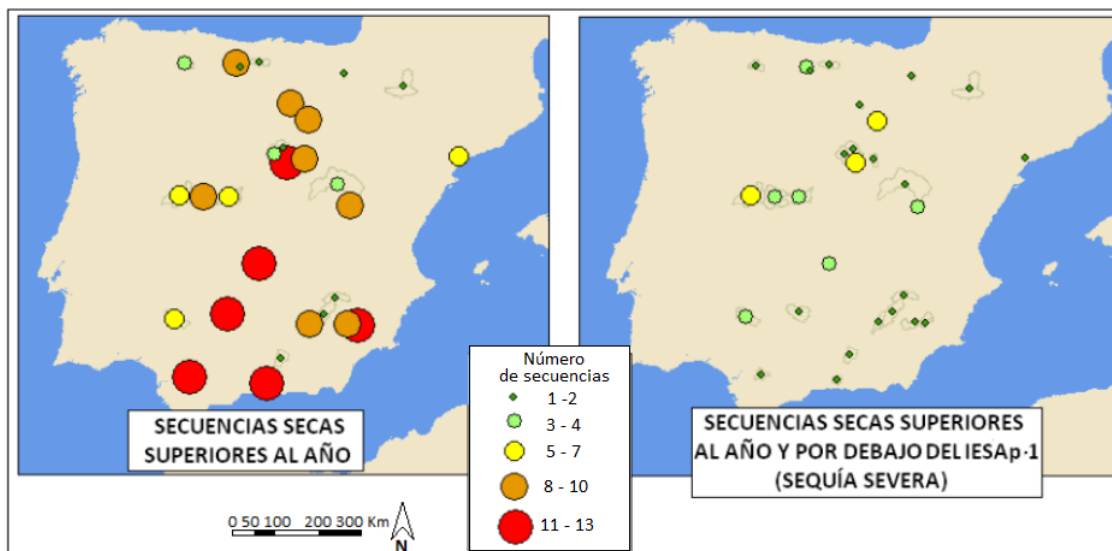
FUENTE: Elaboración propia.

En lo sucesivo, se analizarán las sequías hidrológicas expresadas en esta tabla atendiendo a las cuestiones más importantes desde el punto de vista de su estudio como riesgo natural.

- *El número de secuencias secas por serie.*

Al analizar la Tabla 6.9 y la Figura 6.14 se aprecia que se produce una tendencia hacia los extremos en cuanto al número de sequías, de manera que aparece una mitad de las cuencas con solo una o dos sequías con duración superior al año y la otra mitad tiende a presentar más de ocho, existiendo solo cuatro casos de estudio con un número moderado, sin que pueda extraerse una lógica territorial al respecto más allá del evidente predominio de las series con muchas secuencias secas en el suroeste peninsular.

FIGURA 6.14: Número de secuencias secas superiores a los 12 meses.



* A la derecha solo se cuentan las secuencias que alcanzaron un valor inferior a -1 en el índice en algún momento.
FUENTE: Elaboración propia.

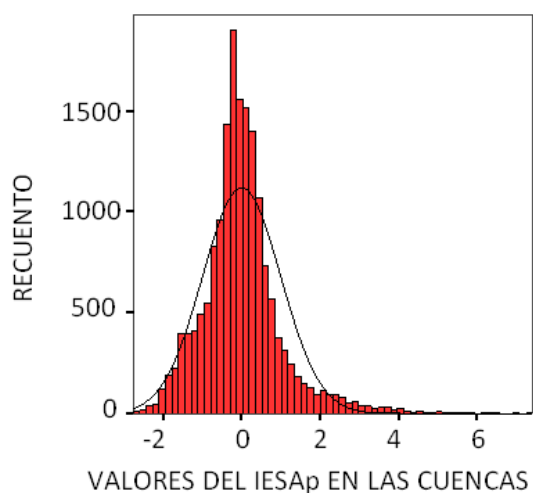
Por otra parte, si se limita el cómputo de las mismas a aquellas en las que el IESAp se excava por debajo de -1 , establecido en las precipitaciones como umbral de sequías severas, el número desciende bruscamente hasta el punto de que solamente nueve de las cuencas poseen más de dos secuencias que cumplan este precepto. Esto indica que las sequías hidrológicas son menos intensas que las pluviométricas y que además las mayores intensidades se concentran en una o unas pocas secuencias, revistiendo el resto de la serie una menor importancia.

Las sequías severas son menos abundantes que en la variedad pluviométrica y esto contradice en cierto sentido lo que aportan tanto el *Libro Blanco del Agua* como los Planes Especiales de Sequía de gran parte de las Demarcaciones cuando exponen que la aportación siempre acentúa lo que ocurre en la precipitación. Esto se debe fundamentalmente a que se utilizan unos índices que funcionan a nivel anual y que además no contemplan el carácter acumulativo del fenómeno.

Aún así es preciso establecer un umbral que sea representativo de las frecuencias de los valores del IESAp en las cuencas para definir intervalos acordes con esta realidad de intensidades más moderadas. Así, de la matriz de 29 cuencas de estudio y 588 valores

mensuales (49 años de estudio) se extrae un histograma levemente asimétrico y ostensiblemente leptocúrtico (Ver Figura 6.15), más que el de las precipitaciones. De acuerdo con la distribución, el límite -1 que en precipitaciones define una cola de en torno a un 14% de valores por debajo y se asocia a una sequía severa, como explicamos más arriba, se asimila a un umbral de $-0,85$ en las aportaciones.

FIGURA 6.15: Histograma de frecuencias de todos los valores del IESAp en las cuencas.



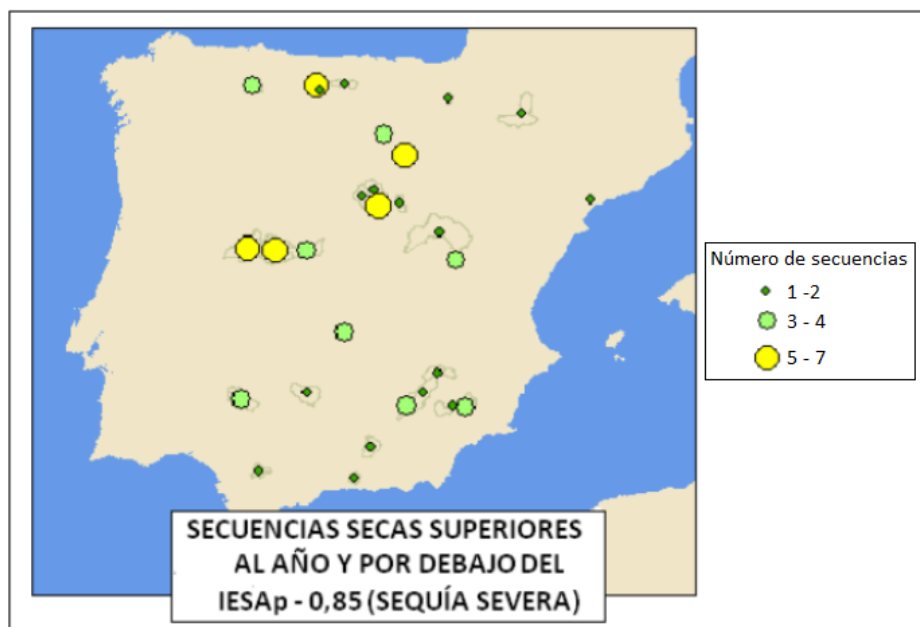
** En total son 17052 valores: 49 años (588 meses) y 29 cuencas.
FUENTE: Elaboración propia.*

Definir umbrales no es algo que deba hacerse precipitadamente y con un número limitado a las aportaciones de solamente 29 cuencas, pero es procedente usar de forma ilustrativa este valor de $-0,85$ aunque sea en exclusiva para acotar las sequías más severas en las aportaciones de los casos concretos utilizados y permitir comparaciones más precisas. No obstante, el hecho de haber identificado que la distribución de las intensidades del índice es marcadamente diferente entre ambas variables debe entenderse como un importante resultado de este trabajo.

Así, considerando este nuevo umbral para definir las sequías severas en las aportaciones aumenta el número de secuencias acontecidas en las cuencas, como es de esperar (Ver Figura 6.16), pero se sigue observando una tendencia hacia la concentración de

los meses de mayor déficit en pocas etapas, resultando el resto de secuencias irrelevantes pese a su duración superior al año.

FIGURA 6.16: Número de secuencias secas de duración superior a los 12 meses y que alcanzan un valor de -0.85 del índice de sequía hidrológica, el cual indica una sequía severa.



FUENTE: *Elaboración propia.*

- *La duración y la intensidad de las secuencias secas.*

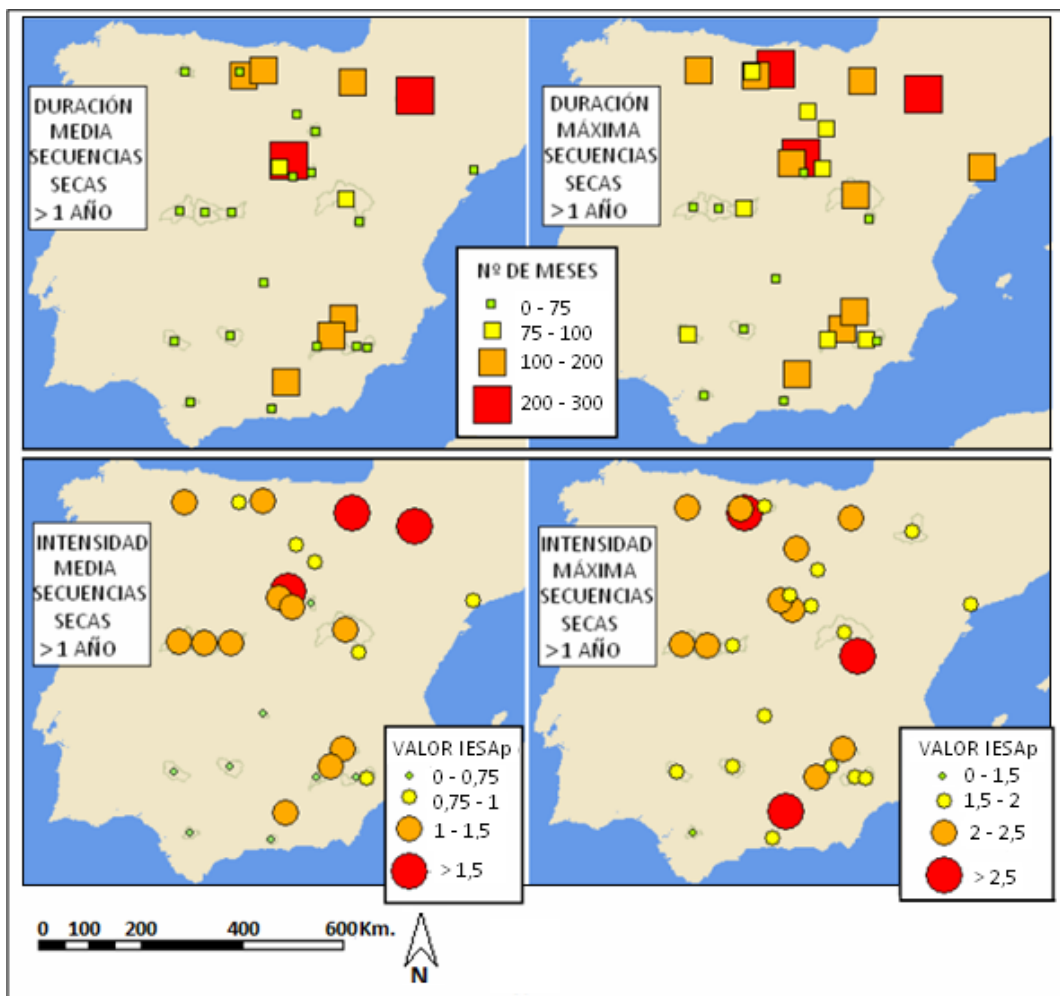
Esta tendencia a la persistencia de la sequía hidrológica se corrobora al analizar la duración media de las secuencias de más de 12 meses así como la duración total de la sequía de mayor importancia de la serie, encontrándose secuencias que llegan a durar incluso la mitad de los meses de estudio (Ver Figura 6.17).

Otra cuestión relevante que se extrae de comparar en la figura las duraciones de las máximas secuencias y sus intensidades es que éstas no son proporcionales, del mismo modo que tampoco lo eran en las precipitaciones, por lo que de nuevo la persistencia de la sequía no garantiza la acentuación de la misma.

También resulta significativo que las cuencas con mayores duraciones, tanto medias como máximas, además de poseer una sola secuencia seca, son precisamente aquellas que

mostraban entre sí unas correlaciones muy elevadas (Ver Tabla 6.6) y que aumentaban cuando el análisis se efectúa teniendo en cuenta únicamente la sequía. Esta serie de hechos excepcionales vinculará a estos casos de estudio en un grupo individual a la hora de establecer una tipología de cuencas, dado que existen razones físicas que inducen esta persistencia del IESAp y este comportamiento paralelo pese a que sus regímenes de precipitación, los hidrológicos e incluso sus sequías pluviométricas fueran diferentes.

FIGURA 6.17: Duración (arriba) e intensidad (abajo) de las secuencias secas superiores a 12 meses.



* Valores medios considerando todas las secuencias de estas características (izquierda) y valores máximos (derecha).
FUENTE: Elaboración propia.

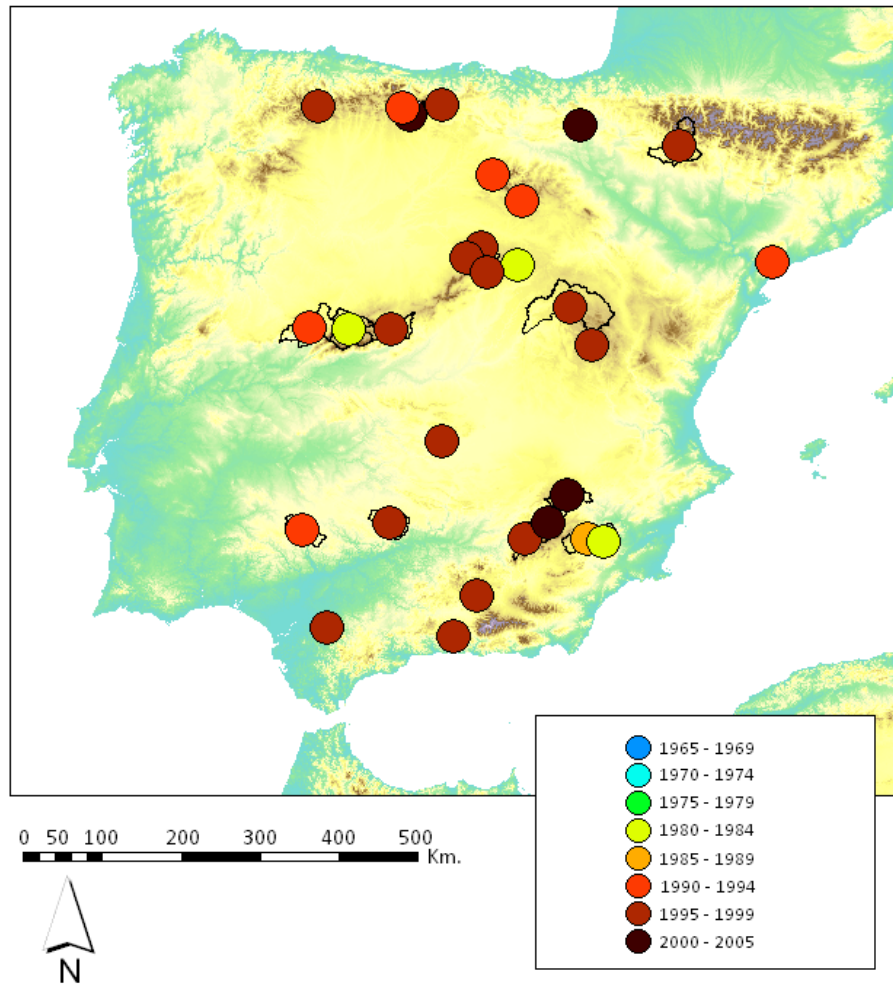
Aparte del comportamiento explicado para este grupo de cuencas, resulta complejo extraer algún otro patrón general con respecto al número de secuencias, intensidad y duración porque todos estos rasgos aparecen de manera muy heterogénea en el área de estudio, mucho más que al analizarlos en la variante pluviométrica del fenómeno, lo cual otorga un total protagonismo a las características hidrológicas de cada cuenca.

La única excepción incuestionable la constituyen las cuencas del suroeste, que muestran una clara tendencia a presentar unas secuencias más numerosas, menos duraderas y también menos intensas, tanto en promedio como considerando la sequía más importante de la serie. Aún así, se profundizará más adelante en el hecho de que esta tendencia está plenamente ligada a los regímenes tan contrastados y al papel esencial que ejerce la evapotranspiración en la hidrología de este sector del área de estudio.

Para no reducir el análisis a la sola expresión de las intensidades máximas y medias del índice de sequía hidrológica de cada serie, estudiaremos la evolución temporal de éstas en cada cuenca, tal como se hizo para el índice pluviométrico.

La primera singularidad que se aprecia con respecto a lo ocurrido en la pluviometría es que las sequías más intensas de las cuencas se agrupan aún más hacia el extremo reciente de las series, no existiendo un solo caso de estudio que presente su sequía más impactante antes de 1980 (Ver Figura 6.18). En concreto, el dominio de los dos últimos quinquenios es total, ya que 19 cuencas muestran su mayor intensidad a partir de 1995.

FIGURA 6.18: Quinquenio en el que se identificó la mayor intensidad de sequía en cada cuenca.



** Se consideraron para la identificación todas las secuencias de más de 12 meses de cada cuenca.
FUENTE: Elaboración propia.*

Antes de entrar en mayor detalle, cabe suponer que esto sucede debido a que los momentos de mayor intensidad en la sequía hidrológica tienden a retrasarse ligeramente con respecto a la pluviométrica, teniendo en cuenta que los ámbitos de estudio e intervalos temporales considerados son los mismos para ambas variables.

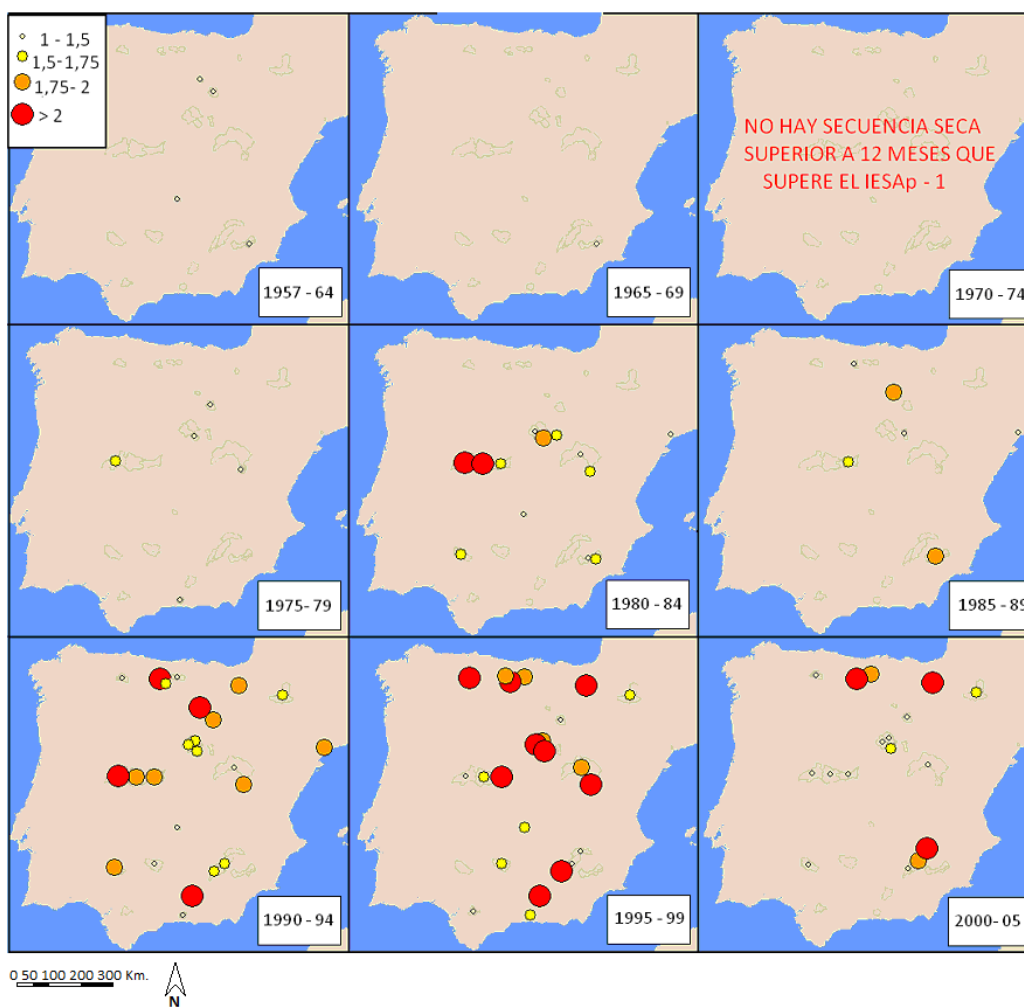
Para lograr una mayor precisión en cuanto al desarrollo temporal del índice, se ha disgregado la serie en quinquenios, de igual forma que se hizo con la variedad pluviométrica (Ver Figura 6.19), comprobándose que hasta 1975 no aparece una cuenca- Gabriel y Galán- en la que se manifieste una secuencia seca por encima del año de duración.

Otra cuestión interesante que resalta es que las mayores intensidades aparecen en la mitad norte del ámbito de estudio, ya que, incluso en los momentos de sequía más fuerte que experimentan las cuencas del sur no se supera el IESAp -2 salvo en tres de los casos: Tranco de Beas, Cubillas y Talave.

La segunda peculiaridad que se aprecia es una mayor heterogeneidad geográfica en las intensidades de la distinguida en las precipitaciones. De nuevo confirmamos que, aunque la sequía esté definida como un fenómeno geográficamente poco variable, las particularidades de las cuencas introducen variaciones muy significativas en entornos que no solamente están muy próximos, sino que presentaban desarrollos muy similares en sus sequías pluviométricas. Algunos ejemplos que ilustran que efectivamente la variante hidrológica introduce divergencias en casos donde las sequías meteorológicas eran uniformes son:

- El final de los años 90 en las cuencas del Guadalquivir,
- El principio de esta década en las cuencas más montañosas del Segura,
- Los últimos cinco años de la serie en torno a los Picos de Urbión.

FIGURA 6.19: Intensidad máxima alcanzada por las sequías de más de doce meses a lo largo del quinquenio recuadrado en cada esquina inferior derecha.

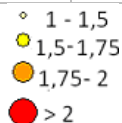


FUENTE: Elaboración propia.

Observando la Tabla 6.10, donde se muestra la misma información de la Figura 6.13 y los mismos intervalos numéricos y de color, pueden apreciarse las disparidades entre unas cuencas y otras, a pesar de que ciertamente existe una acumulación general en la segunda mitad de la serie temporal. Por ejemplo, mientras desde 1990 hasta 1994 en Camporredondo la sequía ya se había afianzado por debajo del -2 , en la cercana cuenca de Barrios de Luna apenas se había superado el -1 , del mismo modo que ocurre en el intervalo 2000- 2005 entre las adyacentes Fuensanta y Tranco de Beas.

TABLA 6.10: Intensidad máxima alcanzada por las secuencias secas de duración superior a 12 meses en el quinquenio correspondiente a cada columna.

CUENCA	1957- 64	1965- 69	1970 - 74	1975- 79	1980- 84	1985- 89	1990- 94	1995 - 99	2000- 05
ALFONSO XIII					-1,03	-1,76			
ALLOZ							-1,79	-2,01	-2,11
ARLANZON	-1,25					-1,81	-2,45		
BARRIOS DE LUNA							-1,38	-2,19	-1,28
BERMEJALES				-1,04			-1,02	-1,66	
BURGOMILLODO					-1,1		-1,6	-2,04	-1,32
CAMPORREDONDO						-1,43	-2,08	-1,82	-1,1
CERVERA- RUESGA							-1,69	-2,74	-2,76
CUBILLAS							-2,22	-2,54	
CUERDA DEL POZO	-1,04			-1,06			-1,81	-1,31	-1,34
EBRO							-1,38	-1,85	-1,85
EL BURGUILLO					-1,66	-1,61	-1,81	-2	-1,14
EL PINTADO					-1,55		-1,76		-1,01
EL VADO				-1,23	-1,81		-1,56	-2,31	-1,55
ENTREPEÑAS					-1,02		-1,34	-1,85	-1,37
FUENSANTA							-1,5	-1,45	-1,93
GABRIEL Y GALAN				-1,68	-2		-2,09	-1,35	-1,03
GASSET	-1,13				-1,08		-1,27	-1,68	
GUADALMELLATO							-1,33	-1,72	
LA CIERVA	-1,13	-1,11			-1,55				
LA PEÑA							-1,67	-1,74	-1,51
LA TOBA				-1,05	-1,74		-1,86	-2,58	
LINARES DEL ARROYO							-1,6	-1,86	-1,11
PALMACES					-1,52	-1,38			
RIUDECANYES					-1,02	-1,41	-1,89		
SANTA TERESA					-2,24		-1,92	-1,5	-1,28
TALAVE								-1,09	-2,21
TORRE DEL AGUILA								-1,13	
TRANCO DE BEAS							-1,63	-2,23	-1,02



** La leyenda de colores que aparece bajo la tabla es igual que la que se usa en la figura 6.19.
FUENTE: Elaboración propia.*

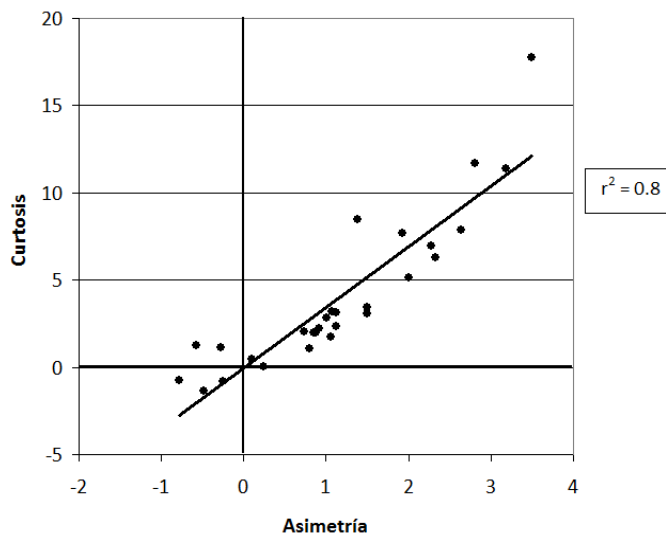
Todas estas cuestiones confirman la hipótesis planteada al evaluar las correlaciones: la sequía hidrológica es, en líneas generales, un fenómeno espacialmente mucho más heterogéneo que la variante pluviométrica, de la que procede.

- *Las distribuciones de los valores del IESAp y sus implicaciones.*

Tal y como ocurre con el índice en las precipitaciones, existe una evidente conexión entre los anteriores rasgos de las series y la forma de sus histogramas de frecuencias.

En primer lugar se pone de relieve que tanto las distribuciones de las anomalías acumuladas como los IESAp derivados de ellas presentan incluso un peor ajuste a la normal que el que mostraban los índices pluviométricos, y aparecen casos de extremas asimetrías y curtosis (Ver Figura 6.21). Por norma, surge una asimetría positiva que supone unas largas colas a la derecha de la media de la distribución y una mediana claramente inferior a ésta. Estos casos van acompañados de una elevada curtosis positiva, existiendo mayor proporcionalidad entre la magnitud de ambos parámetros que la que se observó para la precipitación (Ver Figura 6.20).

FIGURA 6.20: Diagrama de dispersión entre los valores de asimetría y curtosis en los histogramas del IESAp de las 29 cuencas.

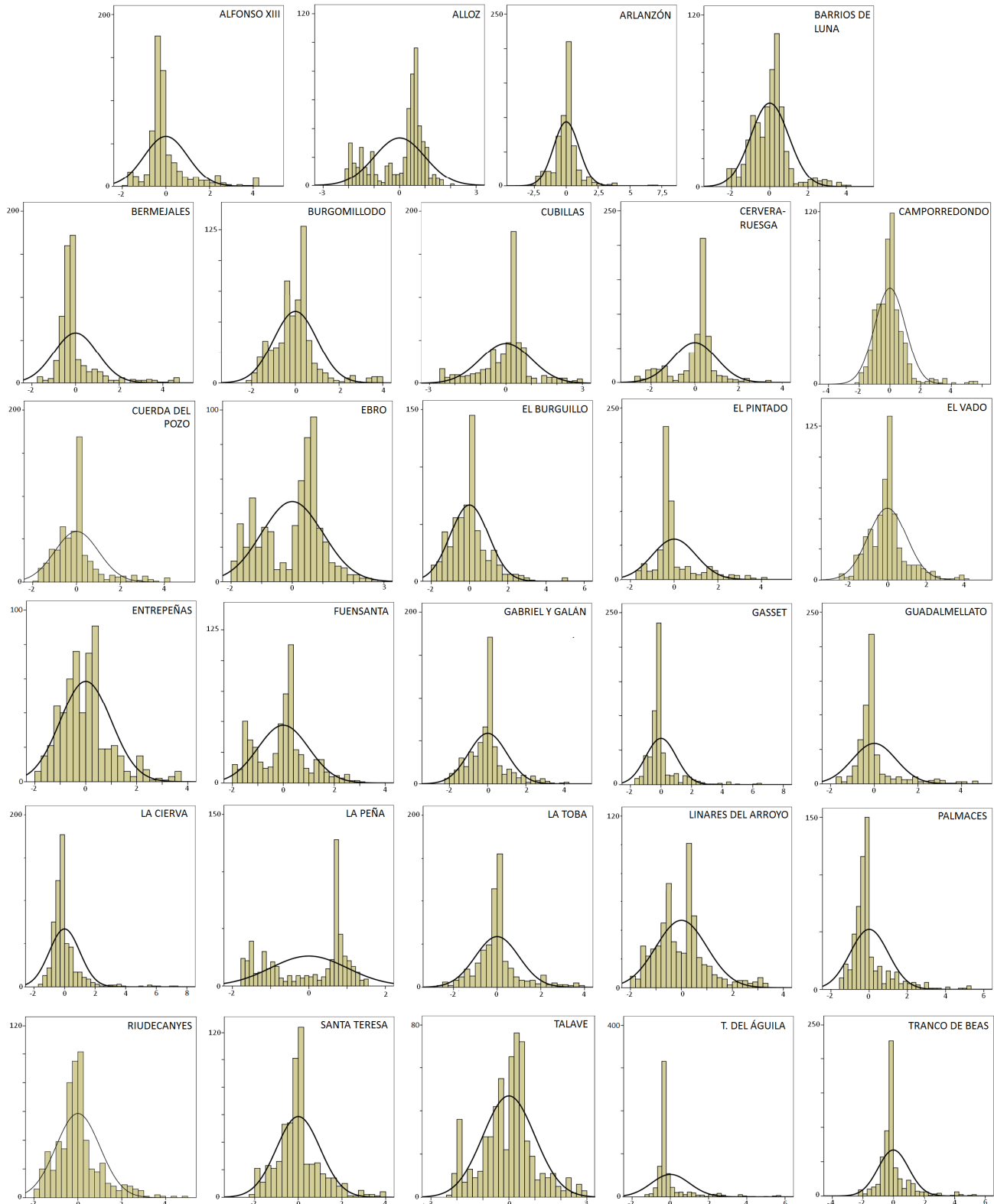


FUENTE: Elaboración propia.

En la situación opuesta se encuentran unas pocas cuencas con valores muy bajos de asimetría y curtosis, incluso negativos: Alloz, Burgomillodo, Ebro, Entrepeñas, Fuensanta, La

Peña, Linares del Arroyo y Talave; estos casos dirigen nuestra atención hacia sus histogramas, puesto que se trata de un fenómeno que no tiene lugar en la precipitación de manera tan inequívoca. Una vez que se analizan dichos histogramas, se aprecia una clara tendencia a la bimodalidad de los mismos, apareciendo solamente un par de cuencas asimétricas negativas que no son completamente bimodales: Cervera- Ruesga y Cubillas, pero que también tienden levemente hacia estas formas.

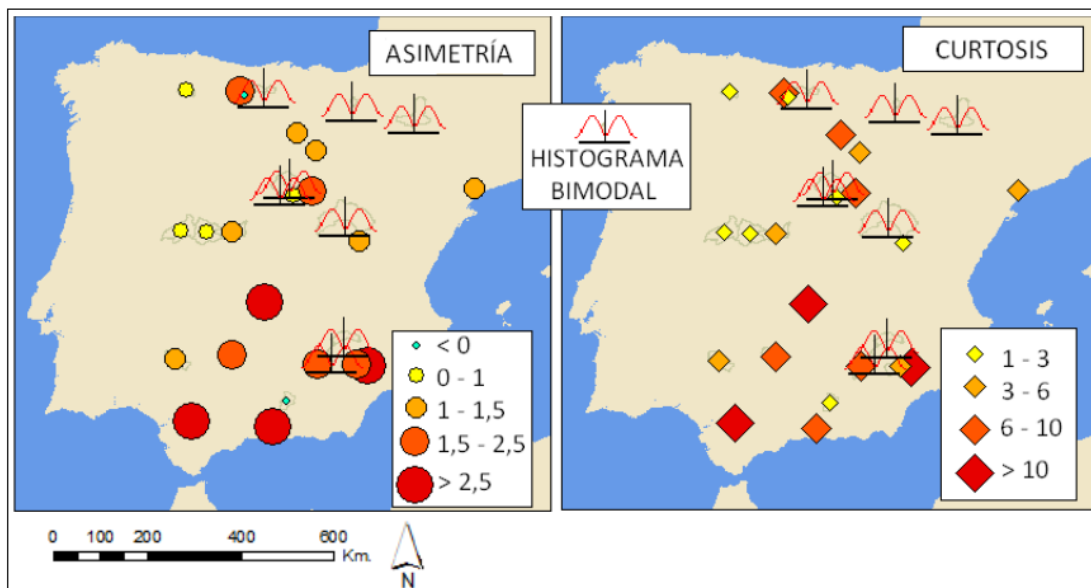
FIGURA 6.21: Histogramas de frecuencias del IESAp en las 29 cuencas de estudio.



FUENTE: Elaboración propia.

Se aprecia que los histogramas más asimétricos y cúrticos tienden a localizarse en casos de estudio de la meseta y los menos, incluido los bimodales, se ubican preferentemente en las cordilleras de plegamiento (Ver Figura 6.22) y dicha disposición no es en absoluto casual.

FIGURA 6.22: Valores de asimetría y curtosis de los histogramas del IESAp.



* Los negativos se marcan en colores fríos, en cálidos los positivos.
Los símbolos de histograma indican las cuencas donde se aprecia un histograma bimodal.
FUENTE: Elaboración propia.

Estudiando minuciosamente los diferentes desarrollos temporales del IESAp que conducen a una y otra morfología de las distribuciones de frecuencias, se deduce que los histogramas bimodales parten de circunstancias hidrológicas húmedas que cambian poco a poco y que finalmente alcanzan un nuevo estado en el que se mantienen prolongadamente. Por esto, aparecen pocas secuencias secas- o solamente una- y siempre con una duración desorbitada. Se da siempre en cuencas con multitud de surgencias al cauce, casos de estudio donde se advierte una importancia crucial del caudal subterráneo, cuyo agotamiento lento y difícil recuperación supone unas sequías hidrológicas suaves, progresivas y sobredimensionadas.

La situación completamente opuesta, de elevadas asimetrías y curtosis positivas, está asociada a regímenes muy contrastados, habitualmente ligados al efecto de la escasez

pluviométrica y la importante incidencia de la evapotranspiración, agravados en algunos casos por la inexistencia de un caudal base de regulación. En estos casos los valores habituales son bajos y por ello las medianas también, pero los extremos positivos rompen con la simetría de las distribuciones. Estas distribuciones a menudo se asocian a series temporales de índices con bastantes más secuencias secas de poca duración y más rápida recuperación.

Aunque las causas físicas que expliquen la conformación de estas variedades del histograma difieran, como es lógico, de las que las propiciaban en las precipitaciones, las justificaciones estadísticas son similares y van ligadas estrechamente a la variabilidad de los valores de las anomalías y a su distribución temporal, por lo que en este sentido los razonamientos utilizados en el apartado 6.2. son aplicables. En la sección dedicada a la explicación de las diferentes tipologías de cuenca según su respuesta hidrológica a la sequía se profundizará en las causas, variantes e implicaciones que acarrea la morfología del histograma de las anomalías acumuladas y de los IESAp.

6.4. SEQUÍA PLUVIOMÉTRICA FRENTE A SEQUÍA HIDROLÓGICA. COMPARATIVA DE LAS SITUACIONES OBSERVADAS EN LAS CUENCAS DE ESTUDIO.

Una vez puestas de manifiesto las diferencias generales que se aprecian tanto en la sequía pluviométrica como en la hidrológica entre las diferentes cuencas de estudio, llega el momento de abordar el objetivo fundamental de este trabajo y concentrar los esfuerzos en evaluar el comportamiento conjunto de ambas variedades de sequías en las mismas.

Como hipótesis general, se prevé 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.

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, M. F., 2007). De acuerdo 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, O., 2001); de manera que este será uno de los principales fenómenos que se exploren, junto con la reconocida tendencia de las secuencias hidrológicamente deficitarias a mantenerse en el tiempo más que las pluviométricas, a la luz de los datos obtenidos en los epígrafes anteriores.

Así, resulta necesario examinar la *conexión entre ambos fenómenos* y también si efectivamente estos desfases a los que se ha hecho alusión se reflejan en la práctica al aplicar los índices de sequía sobre los datos. También es preciso analizar si se aprecian pautas en ese 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.

Una vez evaluados tanto los rasgos fundamentales de ambas variedades de sequía como el vínculo temporal elemental entre ellas, se procederá a elaborar una *agrupación de las cuencas de estudio* de acuerdo con su respuesta hidrológica a la sequía, así como una descripción detallada de las pautas, mecanismos y rasgos que inducen las diferencias entre estas respuestas.

No cabe duda, a la luz de los resultados obtenidos en la comparación de los tipos de histogramas, que en adelante será útil avanzar a partir del simple cálculo del índice, ya que muy posiblemente cada tipo de sequía y variedad de cuenca se ajustará a un tipo de distribución y estas han de ser identificadas y razonadas.

6.4.1. Exploración de la conexión entre el fenómeno pluviométrico y el hidrológico.

Para conocer de manera profunda el comportamiento conjunto de ambas variedades de sequía y obtener los mecanismos que las relacionan se llevarán a cabo e interpretarán los siguientes pasos fundamentales:

- En primer lugar y a modo de exploración se valorará el *grado de conexión entre las series para cada cuenca a varios niveles*, primero atendiendo a las series completas de 588 valores correspondientes a los 49 años de índice en precipitaciones y aportaciones, después prestando atención a los momentos en que alguna de las variables- o ambas- presenta un déficit y, posteriormente, considerando solamente a

- las secuencias secas superiores a 12 meses.
- 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 hidrológicamente deficitarias 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. En este primer acercamiento se evaluará simplemente la coincidencia temporal de las secuencias deficitarias en ambas variables y se analizará si aumenta al desfazar mensualmente una serie con respecto a la otra. Complementariamente se computará cuantas secuencias acusan un retardo en manifestarse los valores negativos en los índices de las escorrentías, ya sea en el inicio o en el final de las mismas, y si puede confirmarse una resistencia tanto a acusar como a remontar la sequía, respectivamente.
 - Finalmente, y redundando en el análisis de los retardos y las intensificaciones, se repetirán *las correlaciones* establecidas en el primero de los pasos, con la particularidad de que *se desfazarán* éstas desde uno a varios meses para comprobar si de este modo mejoran las interconexiones entre uno y otro índice en las cuencas, tanto para la serie completa como en los casos particulares de las secuencias secas superiores al año. Además, en los casos en que las correlaciones sean significativas se prestará atención a los coeficientes de la ecuación de regresión que relaciona ambas series para comprobar si la variedad hidrológica de la sequía acentúa o atenúa lo registrado por los índices pluviométricos.

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

Al aplicar la correlación bivariada sobre las *series completas* de los 49 años de los IESP y los IESAp se comprueba que solamente ocho de las 29 cuencas mejora los r de Pearson

establecidos con las series de los valores mensuales de precipitaciones y aportaciones obtenidos en el capítulo anterior (Ver Tabla 6.11), siendo estas: Alloz, Arlanzón, Burgomillodo, Gasset, La Peña, La Toba y Linares del Arroyo, lo cual corrobora que el nivel de conexión es generalmente más difuso.

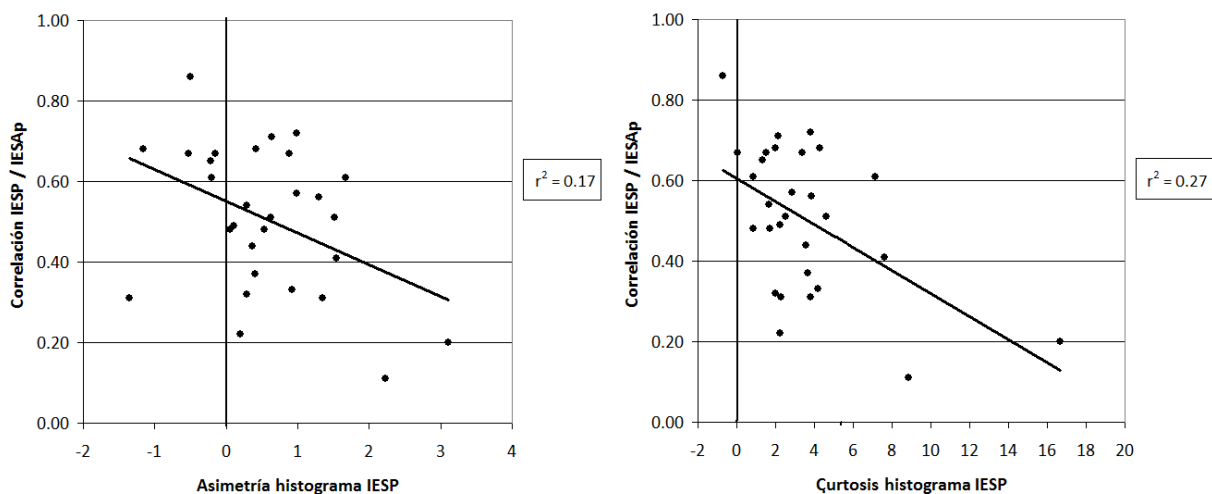
TABLA 6.11: Diferencias entre la correlación medida sobre los valores mensuales originales de precipitación y aportación y la de sus correspondientes índices de sequía.

CUENCAS	R PEARSON P / AP	R PEARSON IESP / IESAP	DIFERENCIA
ALFONSO XIII	0,63	0,32	-0,31
ALLOZ	0,54	0,86	0,32
ARLANZON	0,59	0,65	0,06
BARRIOS DE LUNA	0,61	0,41	-0,2
BERMEJALES	0,68	0,33	-0,35
BURGOMILLODO	0,54	0,61	0,07
CAMPORREDONDO	0,66	0,61	-0,05
CERVERA-RUESGA	0,71	0,11	-0,6
CUBILLAS	0,45	0,44	-0,01
CUERDADELPOZO	0,65	0,56	-0,09
EBRO	0,68	0,31	-0,37
EL BURGUILLO	0,52	0,51	-0,01
EL PINTADO	0,75	0,67	-0,08
EL VADO	0,67	0,57	-0,1
ENTREPEÑAS	0,51	0,51	0
FUENSANTA	0,59	0,37	-0,22
G.Y GALÁN	0,8	0,71	-0,09
GASSET	0,49	0,54	0,05
GUADALM.	0,75	0,72	-0,03
LA CIERVA	0,55	0,31	-0,24
LA PEÑA	0,35	0,48	0,13
LA TOBA	0,65	0,68	0,03
L. D. ARROYO	0,49	0,67	0,18
PALMACES	0,51	0,48	-0,03
RIUDECANYES	0,42	0,20	-0,22
SANTA TERESA	0,72	0,67	-0,05
TALAVE	0,3	0,22	-0,08
T. DEL ÁGUILA	0,65	0,49	-0,16
T. DE BEAS	0,73	0,68	-0,05

FUENTE: Elaboración propia.

Coincide que estas cuencas que aumentan los coeficientes de correlación son, en general, las que presentan unos histogramas en el índice pluviométrico (IESP) poco asimétricos y poco cúrticos e incluso tendentes a la bimodalidad (Ver Figura 6.23).

FIGURA 6.23: Relación entre la correlación de los índices de ambas variables y los parámetros de forma de los histogramas del IESP.

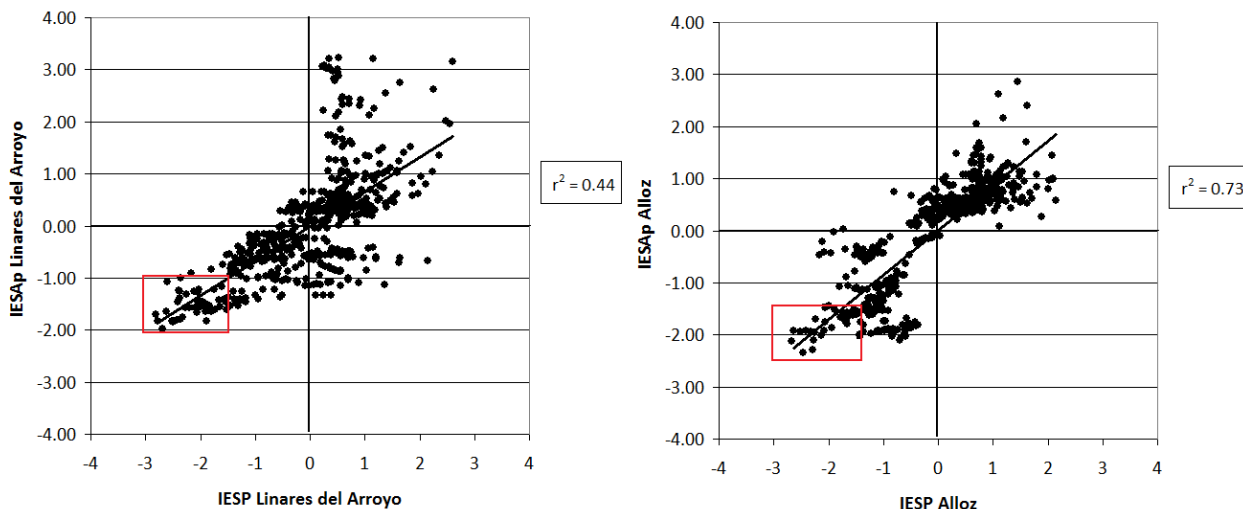


FUENTE: Elaboración propia.

Por tanto, resulta relevante analizar por separado las cuencas bimodales o tendentes a ello 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.

Prestando atención a los diagramas de dispersión que conectan IESP e IESAp en estas *cuencas bimodales* (Ver Figura 6.24) 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, 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.

FIGURA 6.24: Diagramas de dispersión IESP / IESAp en dos de las cuencas bimodales donde la correlación ha aumentado con respecto a la establecida con los valores originales de las variables.



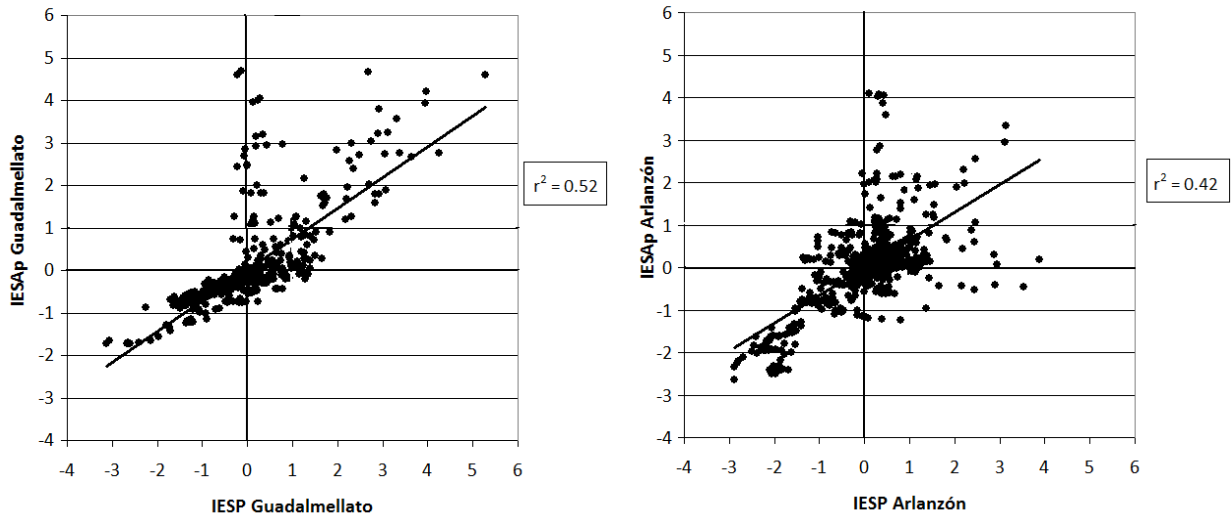
* Señalada en roja la pluma de valores negativos y elevados.
FUENTE: Elaboración propia.

Por tanto, será preciso una evaluación en profundidad de lo que ocurre solamente en este cuadrante para las cuencas bimodales, o tendentes a ello, para comprobar si se debe exclusivamente a este efecto o verdaderamente también existe una considerable armonía en el comportamiento de las secuencias secas en sí.

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, los coeficientes de correlación de Pearson decaen poco con respecto a los que se obtenían comparando las variables originales (Ver Figura 6.25) debido a que los ritmos IESP / IESAp son muy similares. En cambio, en las cuencas permeables, el r de Pearson que conecta ambos índices se reduce más porque las grafías de los IESAp de las cuencas permeables son poco abruptas y tienden a homogeneizar, e incluso a resumir múltiples sequías pluviométricas en una sola secuencia hidrológica, porque el caudal subterráneo tiene mucho peso dentro del caudal total y es más regular y depende menos de la precipitación inmediata que el superficial.

FIGURA 6.25: Diagramas de dispersión IESP / IESAp de dos de las cuencas impermeables donde la correlación se ha mantenido elevada.



FUENTE: Elaboración propia.

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 excepto en las de Arlanzón, Torre del Águila y Tranco de Beas, en este último de manera especialmente importante (Ver Tabla 6.12).

TABLA 6.12: 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 las secuencias secas largas.

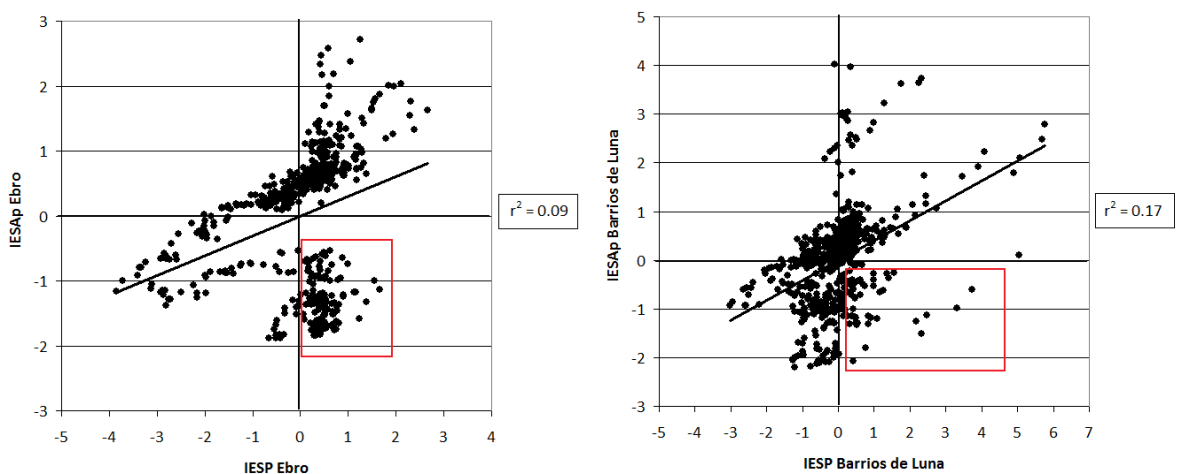
CUENCAS	CORRELACIÓN IESP / IESAp SERIE COMPLETA	CORRELACIÓN IESP / IESAp MESES QUE PRESENTEN AL MENOS UNO DE LOS ÍNDICES NEGATIVO	CORRELACIÓN MESES NEGATIVOS EN AMBOS ÍNDICES	CORRELACIÓN SECUENCIAS SECAS > 12 MESES
ALFONSO XIII	0,32	0,23	0,59	-0,11
ALLOZ	0,86	0,54	0,27	0,80
ARLANZON	0,60	0,63	0,88	-0,28
BARRIOS DE LUNA	0,41	-0,04	-0,13	0,40
BERMEJALES	0,33	0,18	0,67	0,37
BURGOMILLODO	0,61	0,47	0,66	0,28
CAMPORREDONDO	0,61	0,35	0,40	0,26
CERVERA-RUESGA	0,11	-0,25	-0,17	0,11
CUBILLAS	0,44	0,31	0,46	-0,11
CUERDADELPOZO	0,56	0,16	0,17	0,30
EBRO	0,31	-0,25	-0,35	-0,28
EL BURGUILLO	0,51	0,21	0,23	0,1
EL PINTADO	0,67	0,66	0,57	0,5
EL VADO	0,57	0,20	0,45	0,51
ENTREPEÑAS	0,51	0,22	0,31	0,35
FUENSANTA	0,37	-0,04	0,26	0,19
GABRIEL Y GALÁN	0,71	0,64	0,74	0,71
GASSET	0,54	0,45	0,59	0,60
GUADALMELLATO	0,72	0,49	0,84	0,83
LA CIERVA	0,31	0,08	0,2	0,07
LA PEÑA	0,48	0,13	0,21	0,06
LA TOBA	0,68	0,67	0,77	0,72
LINARES DEL ARROYO	0,67	0,49	0,69	0,75
PALMACES	0,48	0,18	0,17	-0,14
RIUDECANYES	0,20	-0,08	0,04	0,03
SANTATERESA	0,67	0,54	0,60	0,53
TALAVE	0,22	-0,03	0,14	0,09
TORRE DEL ÁGUILA	0,49	0,55	0,76	0,71
TRANCO DE BEAS	0,68	0,90	0,93	0,94

FUENTE: *Elaboración propia.*

Reparando primero en la norma general, el hecho de que bajen hasta arrojar incluso correlaciones negativas en siete de las cuencas se debe 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, dado que las mayores disparidades aparecen en los cuadrantes donde el IESP es negativo pero el IESAp aún no, o al revés (Ver Figura 6.26).

FIGURA 6.26: Diagramas de dispersión IESP / IESAp de dos cuencas donde la correlación es reducida a causa de los meses en los que una de las variables es negativa y la otra no.



FUENTE: Elaboración propia.

De nuevo existen mejores correlaciones en aquellos casos en que los IESP presentan curvas poco asimétricas o asimétricas negativas, platicúrticas y tendentes a la bimodalidad, por las mismas razones explicadas más arriba: la regresión se equilibra gracias a la existencia de muchos valores negativos.

Además, para que en estos casos de estudio existan buenas correlaciones cuando al menos uno de los dos índices es negativo también influye el hecho de que en los casos de estudio de IESAp bimodales exista solamente una o un par de secuencias secas, ya que por este simple motivo hay comparativamente menos meses de déficit apreciado solamente en una de las dos variables que pudieran distorsionar la covariación.

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 armónicos y paralelos.

Por último se atenderá a la *conexión entre las secuencias secas importantes*, ya identificadas para una y otra variable en las Tablas 6.3 y 6.9. Estas secuencias corresponden a los intervalos verdaderamente secos dentro de una serie, en el sentido de que son los periodos superiores a doce meses los que repercuten territorial, social y ambientalmente (Pita López, M. F., 2001; García Codrón, J. C. *et al*, 2004) y por ello resulta interesante comparar cuándo tienen lugar en una y otra variable y de qué manera covarían cuando resultan coincidentes en el tiempo.

Se aprecia una tendencia general hacia la bajada de las correlaciones que se intensifica hacia el este, pues en las cuencas de la fachada mediterránea las sequías en precipitaciones y aportaciones tienden a covariar muy poco y en ocasiones incluso de manera inversa. Este hecho arroja bastante luz sobre la necesidad de estudiar ambos fenómenos por separado, dado que aparecen cinco cuencas con sus secuencias correlacionadas en sentido inverso y otras tantas con r de Pearson por debajo del 0,1, indicando una evidente disparidad entre las etapas más severas identificadas en precipitaciones y aportaciones.

Las excepciones a esta pauta las constituyen esencialmente las series bimodales o tendentes a la bimodalidad que presentan pocas o solamente una secuencia seca superior al año en las aportaciones. En ellas se confirma que- pese a su carácter marcadamente permeable que introduce la leve distorsión entre los índices- muestran unos ritmos bastante acompasados entre IESP e IESAp durante las secuencias, y las altas correlaciones establecidas anteriormente con la serie completa no eran solamente fruto del equilibrado de los diagramas de dispersión IESP / IESAp en ellas.

No obstante y pese a estas buenas covariaciones, se aprecia en sus gráficos que en

estas cuencas los picos de máxima intensidad de la sequía hidrológica están algo desfasados con respecto a los de la precipitación (Ver Anexo 4, Grupo 1). Esto se fundamenta en la importancia del caudal subterráneo en estas cuencas, de manifestación más retardada. Estas cuestiones se detallarán más adelante, pero ha de servir esta aclaración para entender que en ocasiones unas buenas correlaciones entre las secuencias secas pueden enmascarar particularidades muy interesantes que han de ser identificadas sobre el gráfico.

Con respecto a la correspondencia de estas cuestiones con las variables morfométricas de las cuencas, se ha encontrado relación inversa entre los valores de la correlación IESP/IESAp en todos estos niveles y la Densidad de Drenaje de las cuencas, y también con el Índice de Gravelius y el de Alargamiento de las mismas (Ver Tabla 6.13), en ambos casos significativos a un nivel de 0,05, del mismo modo que sucedía con las correlaciones de los valores de las variables originales analizadas en el capítulo precedente.

Esto se justifica en el hecho de que las cuencas más compactas, redondeadas y de red de drenaje menos desarrollada evacuan de manera más rápida la precipitación, existiendo una mayor conexión entre ambas fases del ciclo hidrológico, lo cual repercute en que consecuentemente las sequías también covaríen algo mejor. Aún así, la conexión entre sequía pluviométrica e hidrológica demuestra no tener hasta el momento la fuerte vinculación con las variables de morfometría que en principio se esperaba.

TABLA 6.13: Correlaciones entre las variables morfométricas de las cuencas y la correlación registrada en ellas entre los valores del IESP y del IESAp.

VARIABLE	R DE PEARSON CON RESPECTO A LA CORRELACIÓN IESP/ IESAp
AREA	0.19
FACTOR DE FORMA	0.24
R. CIRC. MILLER	0.24
COEF. DE GRAVELIUS	-0.38
ÍNDICE DE ALARGAMIENTO	-0.35
DESNIVEL. CUENCA	0.04
T. DE CONCENTRACIÓN	0.11
PENDIENTE DEL RÍO	-0.02
RATIO AGRÍCOLA	-0.03
RATIO FORESTAL	0.05
RATIO NIEVE	-0.07
RATIO ACUIFERA	-0.02
DENS. DRENAJE	-0.40
PEND. MEDIA	-0.06
ALTURA MEDIA	0.05
PERIMETRO	0.18

FUENTE: *Elaboración propia.*

B. 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 ya se definieron en los apartados descriptivos de una y otra variedad de sequía, y son fundamentalmente el número de secuencias a lo largo de la serie, su duración y su intensidad, reflejados en la Tabla 6.14.

TABLA 6.14: Parámetros descriptivos de las secuencias secas de duración superior al año identificadas en las distintas cuencas para las precipitaciones y aportaciones.

CUENCAS	NÚMERO DE SECUENCIAS		DURACIÓN MEDIA DE LAS SECUENCIAS (MESES)		INTENSIDAD MEDIA MENSUAL (VALOR PROMEDIO DEL ÍNDICE EN LAS SEQUÍAS)		INTENSIDAD MÁXIMA EN TODA LA SERIE (VALOR DEL ÍNDICE)	
	P	AP	P	AP	P	AP	P	AP
ALFONSO XIII	6	9	28	40	1,62	0,71	2,99	1,76
ALLOZ	3	2	78	101	1,15	2,08	2,63	2,14
ARLANZON	5	9	36	25	1,24	0,83	2,89	2,45
BARRIOS DE LUNA	9	4	18	60	1,33	1,20	3,03	2,19
BERMEJALES	9	13	19	34	1,43	0,67	3,24	1,66
BURGOMILLODO	5	3	30	91	1,75	1,19	2,97	2,04
CAMPORREDONDO	10	10	16	26	1,59	0,94	2,19	2,08
CERVERA	10	1	15	145	1,46	2,76	2,02	2,76
CUBILLAS	5	2	26	103	1,93	1,33	3,47	2,54
CUERDA DEL POZO	10	9	17	27	1,52	0,99	2,44	1,81
EBRO	4	2	38	111	1,61	1,12	3,86	1,88
EL BURGUILLO	9	7	20	34	1,47	1,04	2,36	2,00
EL PINTADO	4	7	37	39	1,80	0,53	3,10	1,76
EL VADO	7	11	25	22	1,65	1,11	2,76	2,31
ENTREPEÑAS	5	3	32	98	1,69	1,04	2,48	1,87
FUENSANTA	7	2	25	109	1,86	1,19	3,33	1,95
GABRIEL Y GALAN	6	6	27	34	1,70	1,47	2,66	2,09
GASSET	6	11	26	27	1,90	0,73	3,23	1,68
GUADALMELLATO	4	11	28	26	2,12	0,69	3,13	1,72
LA CIERVA	6	11	33	21	1,66	0,81	2,41	1,55
LA PEÑA	5	1	30	239	1,62	1,74	2,88	1,74
LA TOBA	7	10	24	24	1,77	0,90	2,94	2,58
LINARES DEL ARROYO	3	1	64	286	1,82	1,86	2,80	1,86
PALMACES	8	10	18	31	1,81	0,69	2,87	1,52
RIUDECANYES	11	5	16	52	1,31	0,82	2,02	1,89
SANTA TERESA	7	8	26	28	1,55	1,17	2,56	2,24
TALAVE	7	2	24	127	1,67	1,35	3,42	2,18
TORRE DEL AGUILA	5	13	35	30	2,08	0,51	3,48	1,13
TRANCO DE BEAS	6	9	23	36	1,82	0,78	4,42	2,23

** Las columnas de las precipitaciones se marcan con la letra P y sombreado claro y las de aportaciones con AP, y sombreado oscuro.*

FUENTE: Elaboración propia.

En primer lugar, cabe señalar que tanto las intensidades promedio como las intensidades máximas registradas a lo largo de la serie son muchísimo más altas en las precipitaciones; en cambio, la duración es mayor en las aportaciones, tanto en promedio como

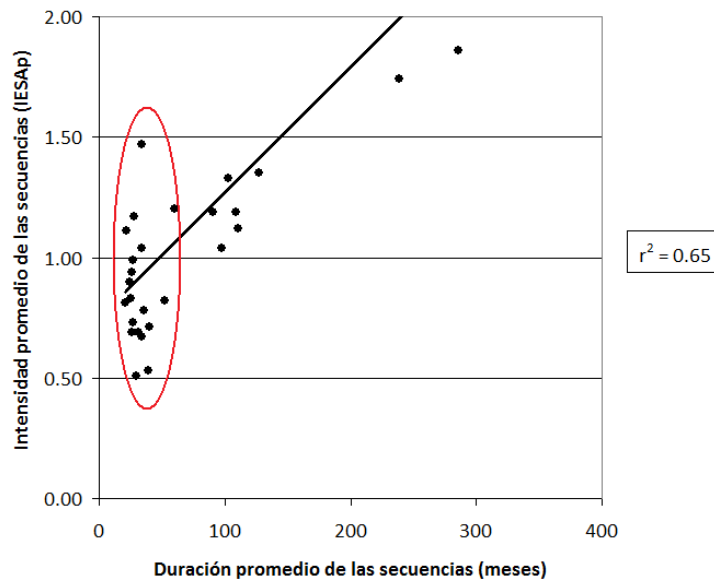
teniendo en cuenta solamente la secuencia más larga de toda la serie. Estos dos rasgos son generales, incuestionables y se distinguen en todas las cuencas sean cuales sean sus características hidrológicas y las formas del histograma de uno y otro índice.

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 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 lo que expusimos como una de nuestras hipótesis iniciales, fundamentadas en el estudio del *Libro Blanco del Agua*, ya que la sequía hidrológica verdaderamente no acentúa la pluviométrica, 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 secuencias cortas pueden tener prácticamente todo tipo de intensidades, aunque siempre desde bajas a medias. Para secuencias largas sí se verificaría que a mayor duración mayor intensidad (Ver Figura 6.27); 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.

FIGURA 6.27: Vinculación de la duración y la intensidad promedio de las secuencias secas superiores a 12 meses en las aportaciones de las 29 cuencas.



FUENTE: Elaboración propia.

Otra característica 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.

Por otra parte, de la simple observación de la tabla puede extraerse 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.

Ahora bien, como se concluyó en los apartados descriptivos de una y otra variedad de sequía, todas estas características de las series no están desvinculadas en absoluto de las formas del histograma. Por otro lado, para cada una de las dos tipologías de sequía la forma del histograma tiene una explicación y en ningún caso una determinada forma del índice pluviométrico conduce directamente a otra del índice hidrológico, aunque siempre la pluviometría imponga una leve predisposición sobre las aportaciones.

Por lo general, asimetrías y curtosis en el índice pluviométrico se mueven en un rango más reducido y sugieren de manera bastante sintética y acertada la forma en la que la precipitación y sus anomalías se han distribuido temporalmente, arrojando unos valores muy extremos en los casos en los que se han percibido excedentes o sequías desorbitadas; por el contrario, estas medidas en el índice hidrológico suelen cubrir un rango mucho mayor de valores. De hecho, en los casos en los que estos valores son muy bajos o muy altos, por sí solos arrojan mucha información extra sobre la humedad disponible en la cuenca de manera habitual, la importancia de la evapotranspiración, el régimen hidrológico, la existencia de un sustrato permeable, la incidencia de un caudal subterráneo de suficiente trascendencia, etc. y lo que es también muy importante, son fiel reflejo de la cantidad de secuencias que aparecen y su duración e intensidad.

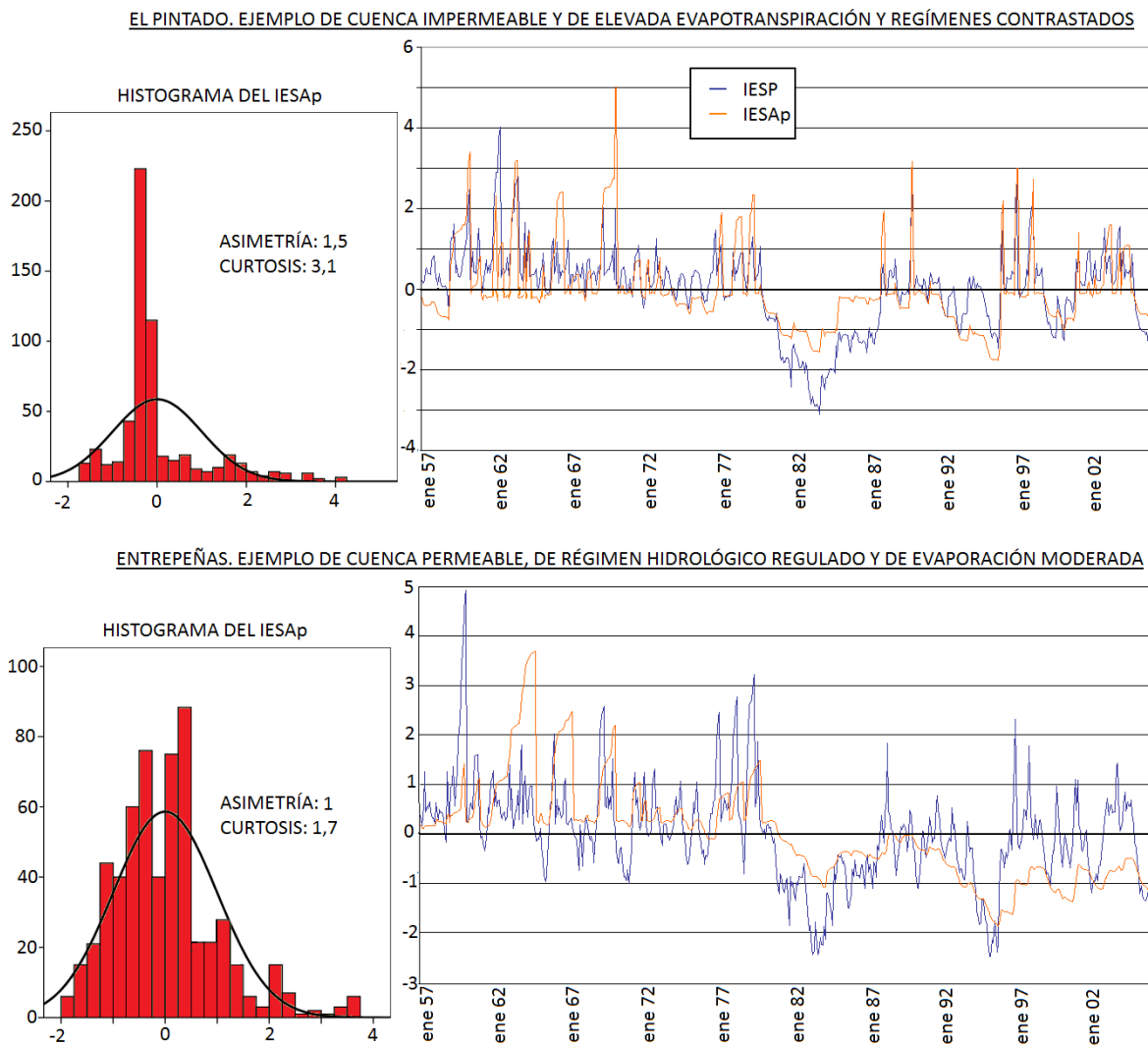
Así, los valores elevados de asimetrías y curtosis en los histogramas del IESAp están siempre ligados a cuencas de regímenes contrastados, habitualmente debido a una fuerte aridez y evaporación estival, de montaña media e impermeables o con poca influencia de la fracción subterránea de la escorrentía; en ellos se reproducen muchas secuencias secas, pero generalmente de baja intensidad y duración y mucha ligazón con las que aparecen en las precipitaciones.

Por el contrario, las cuencas de IESAp con valores bajos o negativos de asimetría y curtosis son en general claramente bimodales o tendentes a ello y reflejan un importantísimo caudal basal, drenado gracias a una o varias fuentes identificadas e inventariadas a las que se les asocia un flujo continuo y abundante. Solamente poseen una o un par de largas sequías hidrológicas que engloban a todas o a muchas de las pluviométricas

Estos escenarios serán desarrollados con enorme detalle en el epígrafe referente a la tipología de cuencas pero una muestra aparece en la Figura 6.28. En ella se han usado justamente los dos ejemplos más moderados de ambas circunstancias (asimetría y curtosis

altas; asimetría y curtosis bajas y tendencia a la bimodalidad) con la intención de ilustrar cómo incluso entre ellos aparecen unas evidentes diferencias en el devenir del IESAp sin que el índice pluviométrico sea tan considerablemente distinto en las dos cuencas. Obsérvese cómo en la segunda de las gráficas mostradas el índice hidrológico no consigue remontar una vez agotado el caudal base.

FIGURA 6.28: Ejemplo de una cuenca impermeable, con un histograma de alta asimetría positiva y curtosis, y de otra cuenca con cierta bimodalidad, fruto de una hidrología más regulada.



FUENTE: *Elaboración propia.*

Atendiendo a las sequías en la aportación y trascendiendo la evidente ligazón a la forma del histograma y a su indiscutible vinculación con la componente hidrogeológica, se ha investigado el posible enlace entre las mediciones sobre las secuencias (intensidad, duración...) y las características físicas de las cuencas pero no se ha obtenido ningún resultado suficientemente significativo.

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

Una vez ilustradas las características de las sequías en ambas variables, tanto las pautas habituales de transformación desde una tipología de sequía a otra en el contexto de todas las cuencas, como el desarrollo particular del fenómeno según las peculiaridades de los casos de estudio, es preciso evaluar si existe una clara tendencia al desfase temporal entre ambas variedades del fenómeno como tenía lugar entre los valores de las variables originales.

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 parte izquierda de la Tabla 6.15 (sombreado en oscuro), 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 esorrentía de un mes en concreto con la precipitación de uno, dos y hasta tres 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.

Con el fin de determinar de qué manera lo hace, en la parte derecha de la Tabla 6.15 (sombreada en claro) se contabilizan las sequías prolongadas en las que se ha observado un retardo en el comienzo en las esorrentías desde uno a varios meses (se ha parado en cuatro

porque continuar no mejoraba los resultados) y las que tardan desde uno a varios meses en finalizar, siempre con respecto a lo acaecido en las precipitaciones.

Los resultados no pueden ser más esclarecedores, puesto que en absolutamente todas las cuencas se aprecia al menos una secuencia en la que la aportación empieza o acaba más tarde que la precipitación, siendo especialmente importante y frecuente este último fenómeno. De hecho gran parte de las secuencias examinadas para multitud de cuencas muestran ambas manifestaciones al mismo tiempo, e incluso una misma secuencia seca hidrológica engloba el desarrollo de varias pluviométricas cortas consecutivas, indicando la mayor dificultad que encuentran las aportaciones para remontar.

El hecho de que prácticamente todas las secuencias hidrológicamente deficitarias de una cuenca terminen desde uno a incluso más de cinco meses 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 sustrato aún son muy pobres y el sistema cuenca tarda ese intervalo en restablecerlas por completo.

TABLA 6.15: Efecto del desfaseado de las series.

CUENCAS	MESES EN LOS QUE COINCIDEN LAS SECUENCIAS IESP/ IESAp	MESES EN LOS QUE COINCIDEN SI SE DESFASAN LAS SERIES:			NUMERO DE SECUENCIAS QUE EMPIEZAN MÁS TARDE EN EL IESAP					NUMERO DE SECUENCIAS QUE ACABAN MÁS TARDE EN EL IESAP					
		1 (MES)	2	3	1 (MES)	2	3	4	TOTAL SECU.	1 (MES)	2	3	4	=> 5	TOTAL SECU.
ALFONSO XIII	84	84	23	82	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0
ALLOZ	223	222	137	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
ARLANZON	137	135	146	131	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
BARRIOS DE LUNA	118	116	131	111	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	4
BERMEJALES	129	130	122	124	2	0	0	0	2	2	0	0	0	4	6
BURGOMILLODO	130	129	94	127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
CAMPORRED.	158	155	97	147	0	1	0	0	1	0	1	1	0	5	7
CERVERA- RUESGA	106	104	145	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4
CUBILLAS	112	111	122	108	0	1	1	0	2	0	0	0	0	1	1
CUERDA DEL P.	128	129	132	123	2	1	0	0	3	1	1	0	0	3	5
EBRO	82	83	96	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
EL BURGUILLO	163	168	92	173	1	3	1	0	5	0	0	2	0	5	7
EL PINTADO	149	147	143	139	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
EL VADO	143	146	155	140	4	1	1	0	6	1	1	1	0	1	4
ENTREPEÑAS	139	139	126	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
FUENSANTA	73	72	99	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
GABRIEL Y GALAN	161	163	96	162	0	3	1	0	4	1	0	0	0	2	3
GASSET	128	124	122	116	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
GUADALMELLA.	113	110	109	104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
LA CIERVA	147	143	77	133	1	1	0	0	2	0	0	0	0	1	1
LA PEÑA	121	120	64	118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
LA TOBA	156	157	86	154	1	2	0	0	3	0	1	0	0	3	4
LINARES D. A.	193	192	130	190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
PALMACES	127	126	117	117	1	0	0	0	1	2	1	0	0	2	5
RIUDECANYES	121	119	134	114	0	1	0	1	2	0	0	0	0	4	4
SANTATERESA	164	164	145	159	0	0	1	0	1	2	1	0	0	1	4
TALAVE	119	118	83	116	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
TORRE DEL A.	161	158	103	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
TRANCO DE BEAS	136	131	115	122	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

* La primera columna muestra el número de meses en los que hay sequía (> 12 meses) en ambas variables.
En las columnas oscuras aparecen los meses en los que coinciden ambas secuencias si se realiza un desfase entre ambas series.
Las columnas claras muestran cuántas secuencias muestran un retardo en la aportación en sus comienzos o finales y de cuantos meses consta éste.
FUENTE: Elaboración propia.

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 realizar el desfasado de las series*, tanto completas como usando solo las secuencias secas superiores a los doce meses.

Si se analizan las series completas de ambos índices (Ver Tabla 6.16, mitad izquierda) se observa claramente que el desfasado aumenta ampliamente las correlaciones en 23 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 reviste un enorme interés para la gestión del riesgo, puesto 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 manera que si se observa un déficit en esta última es posible anticiparse a la transmisión del mismo hacia el recurso propiamente dicho.

Atendiendo a las excepciones, en el caso de Alfonso XIII y La Cierva interesa remitir a los capítulos referentes a la descripción de las precipitaciones y aportaciones originales y sus relaciones, donde se comprobó que se trata de cuencas de extrema aridez y es por ello donde menos se garantiza la persistencia hídrica, a pesar de su sustrato permeable. Lógicamente, existiendo poca disponibilidad del recurso, su vulnerabilidad es comparativamente mayor ante posibles leves detracciones de caudal, ya sean antrópicas o bien se trate de pérdidas por evaporación o drenaje subterráneo hacia las cuencas adyacentes.

Así, la relación entre precipitación y aportación es menos estrecha que en la mayoría de las cuencas y además no se logra mantener un caudal subterráneo de suficiente entidad que fomente la inercia de los volúmenes de agua, lo cual acarrea que la sintonía entre sus variedades de sequía sea algo más fuerte a corto plazo.

Dejando los ambientes muy áridos aparte, no cabe duda de que 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.

TABLA 6.16 Correlación entre IESP e IESAp al hacer coincidir un mes del índice hidrológico con el mes o meses previos del índice pluviométrico.

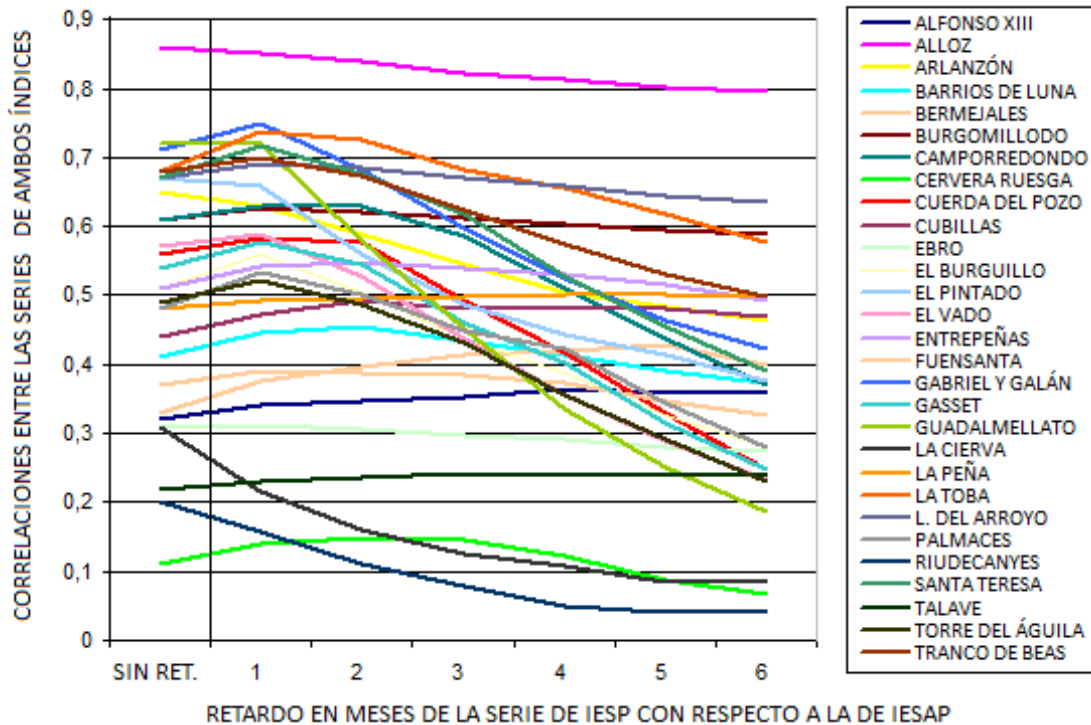
CUENCAS	CORRELACIÓN IESP/IESAp SERIE COMPLETA	CORRELACIÓN SI SE REALIZA UN DESFASE EN LAS SERIES DE:		CORRELACIÓN SECUENCIAS >12 meses duración)	CORRELACIÓN SI SE REALIZA UN DESFASE EN LAS SERIES DE:	
		1(MES)	2		1(MES)	2
ALFONSO XIII	0,32	0,33	0,33	-0,11	-0,11	-0,11
ALLOZ	0,86	0,85	0,84	0,80	0,81	0,80
ARLANZON	0,6	0,59	0,54	-0,28	-0,27	-0,29
BARRIOS DE LUNA	0,41	0,45	0,45	0,40	0,46	0,50
BERMEJALES	0,33	0,38	0,41	0,37	0,35	0,29
BURGOMILLODO	0,61	0,63	0,62	0,28	0,27	0,26
CAMPORREDONDO	0,61	0,63	0,63	0,26	0,24	0,21
CERVERA RUESGA	0,11	0,14	0,15	0,11	0,10	0,07
CUBILLAS	0,44	0,47	0,50	-0,11	-0,19	-0,24
CUERDA DEL POZO	0,56	0,58	0,58	0,30	0,36	0,37
EBRO	0,31	0,31	0,31	-0,28	-0,26	-0,24
EL BURGUILLO	0,51	0,56	0,50	0,07	0,14	0,17
EL PINTADO	0,67	0,66	0,56	0,5	0,45	0,38
EL VADO	0,57	0,59	0,53	0,51	0,57	0,59
ENTREPEÑAS	0,51	0,54	0,55	0,35	0,36	0,36
FUENSANTA	0,37	0,39	0,39	0,19	0,19	0,19
GABRIEL Y GALÁN	0,71	0,74	0,68	0,71	0,75	0,76
GASSET	0,54	0,58	0,55	0,60	0,60	0,53
GUADALMELLATO	0,72	0,72	0,58	0,83	0,77	0,71
LA CIERVA	0,31	0,22	0,16	0,07	-0,06	-0,19
LA PEÑA	0,48	0,49	0,50	0,06	0,07	0,08
LA TOBA	0,68	0,74	0,72	0,73	0,75	0,74
LINARES DEL ARROYO	0,67	0,69	0,68	0,75	0,77	0,78
PALMACES	0,48	0,52	0,50	-0,14	-0,11	-0,14
RIUDECANYES	0,20	0,19	0,11	0,03	-0,03	-0,11
SANTATERESA	0,67	0,70	0,68	0,53	0,52	0,47
TALAVE	0,22	0,23	0,25	0,09	0,08	0,08
TORRE DEL ÁGUILA	0,49	0,52	0,49	0,71	0,68	0,63
TRANCO DE BEAS	0,68	0,70	0,67	0,94	0,93	0,89

* A la derecha se muestra lo obtenido considerando solo los meses de sequías > 12 meses.

FUENTE: Elaboración propia.

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 6.29).

FIGURA 6.29: 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).



FUENTE: Elaboración propia.

La diferencia con los propios valores originales de las variables reside en que entre los índices no mejora la correlación con la suma del valor pluviométrico de un mes y su anterior, sino que es el propio índice pluviométrico del mes anterior el que ostenta una mejor covariación con el de aportación del mes en concreto. Esto no solo se debe a que el fenómeno de la sequía demuestra por sí mismo tener ambas fases algo más retardadas entre sí que los valores ordinarios de las dos variables, sino también a que el propio índice- gracias a su formulación aditiva- ya incorpora el carácter acumulativo de la sequía. Esta ventaja del índice implica que cada valor mensual del mismo es capaz de poner de manifiesto eficazmente la suma de las circunstancias hidrológicas tanto actuales como precedentes.

Se comprueba a su vez que al fijar el análisis de retardos solamente sobre los meses que forman parte de las secuencias deficitarias superiores al año en ambas variables (mitad

derecha de la Tabla 6.16), las mejoras al desfase se restringen a un menor número de cuencas, y son siempre menos significativas. La lógica de este hecho puede comprobarse en las gráficas temporales de los índices y 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 y a lo sumo se aprecia una leve separación entre los mínimos. Este fenómeno puede asociarse a que cuando el sistema cuenca se encuentra muy seco, inclusive el subsuelo y las surgencias, las oscilaciones del caudal van coligadas a las de la precipitación.

6.4.2. Tipología y clasificación de las cuencas según su respuesta hidrológica a la sequía.

Una vez probado que existe una evidente - mas no redundante- similitud entre las variedades pluviométrica e hidrológica de la sequía, se procederá en este apartado a agrupar los casos de estudio según su respuesta hidrológica a la sequía y también a pormenorizar las pautas, mecanismos y rasgos que vinculan o separan los conjuntos de cuencas entre sí. Se considera innecesario detallar en exceso lo que sucede en cada una de las cuencas de manera individual ya que de esta forma se perdería de vista la pretensión inicial, conducente a la extracción de estándares de comportamiento y a su explicación.

La metodología seleccionada para la agrupación de los casos consta de dos pasos fundamentales: una primera *vinculación exploratoria* de los mismos mediante técnicas multivariantes y una segunda fase de *confirmación empírica de las similitudes* en las trayectorias de los índices hidrológicos dentro de las fases de sequía, para cada grupo creado. La metodología de clasificación estadística tiene multitud de ventajas sobre la simple agrupación visual de las diferentes series de las cuencas porque considera toda la sucesión de valores y no simples matices o similitudes puntuales más llamativas.

Aun así, el segundo paso consiste en la observación minuciosa de las series y gráficas de ambos índices conjuntamente en cada cuenca, y es imprescindible, ya que en ocasiones puede suceder que la fuerza de la propia componente meteorológica del fenómeno encubra semejanzas entre dos cuencas clasificadas en distintos grupos y al contrario, siendo estos efectos prácticamente imposibles de evitar desde el mero punto de vista estadístico.

A. Fase de clasificación previa.

En este paso se agruparán las cuencas mediante la técnica de conglomerados jerárquicos aplicados sobre los valores de la serie del índice IESAp. Del mismo modo, esta metodología se aplicará también a los valores del IESP con el propósito de comprobar los cambios de grupos que aparecen y por qué motivos se dan, habida cuenta de que la sequía pluviométrica ha destacado por ser sobradamente más homogénea espacialmente, si bien no lo suficiente como para no considerarla como aspecto de partida a tener en cuenta en la evaluación de los conjuntos. El paso de unas agrupaciones pluviométricas a otras hidrológicas aportará la clave fundamental para identificar aquellas cuencas que introducen variantes sustanciales en su trayectoria cuyas causas han de investigarse y definirse.

- Datos usados: Cada uno de los 588 meses de medición del IESP e IESAp respectivamente serán entendidos en los análisis de conglomerados como una variable o eje sobre los que habrán de ubicarse los diferentes grupos de casos.
- Métodos: Resulta de vital importancia establecer los criterios de conglomeración correctamente y de acuerdo con lo que verdaderamente se desea obtener. No obstante, en el caso del análisis en los IESAp se ha comprobado que es tan fuerte la vinculación y homogeneidad entre las sequías de determinadas cuencas y tan diferentes entre sí unos y otros grupos de ellas que los resultados son muy similares se use el método que se use y los matices aparecen fundamentalmente en aquellas cuencas que resultan difíciles de clasificar y que por ello serán sacadas fuera y analizadas independientemente porque constituyen claros ejemplos de intervención combinada de diversos factores que inducen la peculiaridad de sus reacciones hidrológicas a la sequía.

Se ha seleccionado finalmente el método aglomerativo de la distancia euclídea sin elevar al cuadrado para no enfatizar excesivamente las diferencias en cada variable y utilizando la vinculación intragrupos para determinar qué casos o grupos de ellos se combinarán a cada paso del análisis. El método de Ward, por ejemplo, conducente a minimizar la suma de cuadrados dentro de cada grupo creado arrojaba, con matices

sumamente leves, una clasificación muy similar.

Por último se probará la clasificación realizada estableciendo con los grupos hallados- y aislando las cuencas *outliers* - una conglomeración de las K-medias para revisar los patrones promedio fundamentales que sigue el índice y comprobar que se ajustan bien a los de cada conglomerado de cuencas inicialmente identificado.

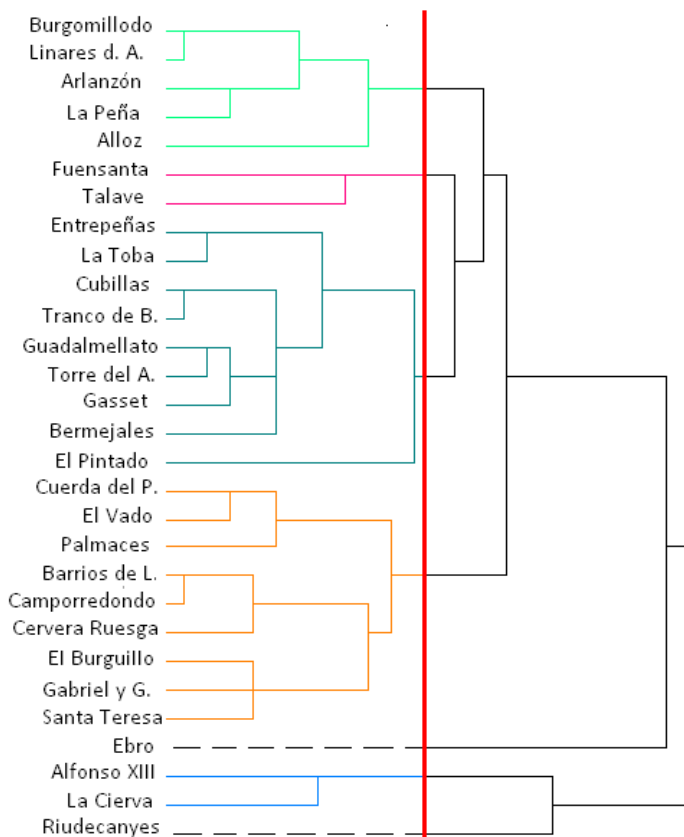
- Otras decisiones metodológicas importantes: No ha de perderse de vista que las medidas de distancia son muy sensibles a la diferencia de escalas, por lo que la decisión sobre si estandarizar o no los valores del índice en el seno de cada uno de los meses de la serie es una cuestión a tener en cuenta cuando se ejecuta una conglomeración; ahora bien, en este caso puede resultar de especial interés forzar que los meses que posean una mayor variabilidad en los índices pesen más en la clasificación de las cuencas, dado que se trata de evaluar un fenómeno extremo, por lo que se ha optado por la no estandarización de los valores dentro de cada variable mensual dado que además las unidades de medida de estas son perfectamente comparables. No obstante, se ha constatado que tampoco este matiz cambia sustancialmente el resultado final para este conjunto de datos en concreto y son de nuevo las cuencas menos clasificables las que varían su grado de ligazón con el resto cuando se aplica la técnica con y sin estandarización, sin excepción.

Es preciso puntualizar que en esta fase se utilizarán todos los meses de la serie para definir la similitud entre las cuencas sin restringir la evaluación al comportamiento de sus meses negativos o pertenecientes a secuencias secas de longitud superior a un año, porque de hacerlo de esta manera los grupos extraídos serían muchos más y más difíciles de interpretar *a priori*, dado que aumenta mucho más la variabilidad territorial al aumentar el detalle en este sentido (Pita López, M. F. *et al.*, 2002) y la pretensión de este primer paso es extraer una referencia inicial sobre la variedad de comportamientos a grandes rasgos.

Los resultados obtenidos en la *sequía pluviométrica* pueden apreciarse en el correspondiente dendrograma (Ver Figura 6.30). La distancia de corte para definir los conglomerados finales se ha establecido aproximadamente a la mitad de las distancias totales

entre grupos.

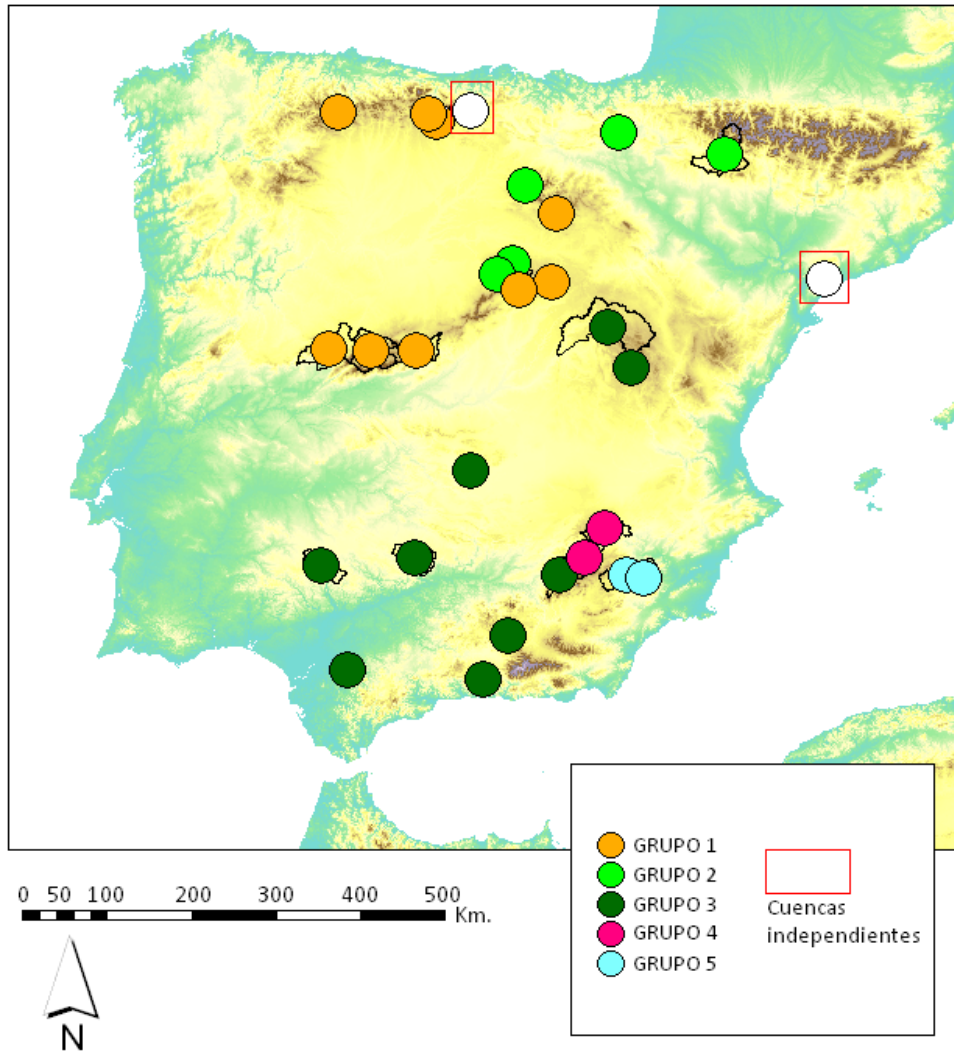
FIGURA 6.30: Dendrograma de las cuencas según sus IESP.



** Conglomerados coloreados. En rojo aparece la distancia de corte. En discontinuo se marcan las cuencas no agrupables.
FUENTE: Elaboración propia.*

Al cartografiar dichos resultado para facilitar la interpretación se aprecia que, como cabría esperar de lo establecido en el apartado descriptivo de la sequía pluviométrica, los grupos formados son territorialmente bastante homogéneos y además aparecen pocos casos aislados fuera de los cinco grupos fundamentales, solamente dos cuencas de climatología y sequía meteorológica bastante singular: Ebro y Riudecanyes (Ver Figura 6.31).

FIGURA 6.31: Mapa de los grupos de cuencas establecidos mediante conglomerados jerárquicos.



* Los grupos se han coloreado del mismo modo que en el dendrograma.
FUENTE: *Elaboración propia.*

A grandes rasgos, las cuencas del grupo 1 tienen índices pluviométricos muy oscilantes y sin grandes secuencias secas, sobre todo a partir de los años 70; en cambio el grupo 2 tiene un claro predominio de una sola sequía de final de los 80/ principios de los años 90 que en algunos casos como Allos se extiende durante más de una década; el 3º grupo se corresponde con las cuencas donde se experimentaron fuertes y largas sequías tanto a mediados de los 80

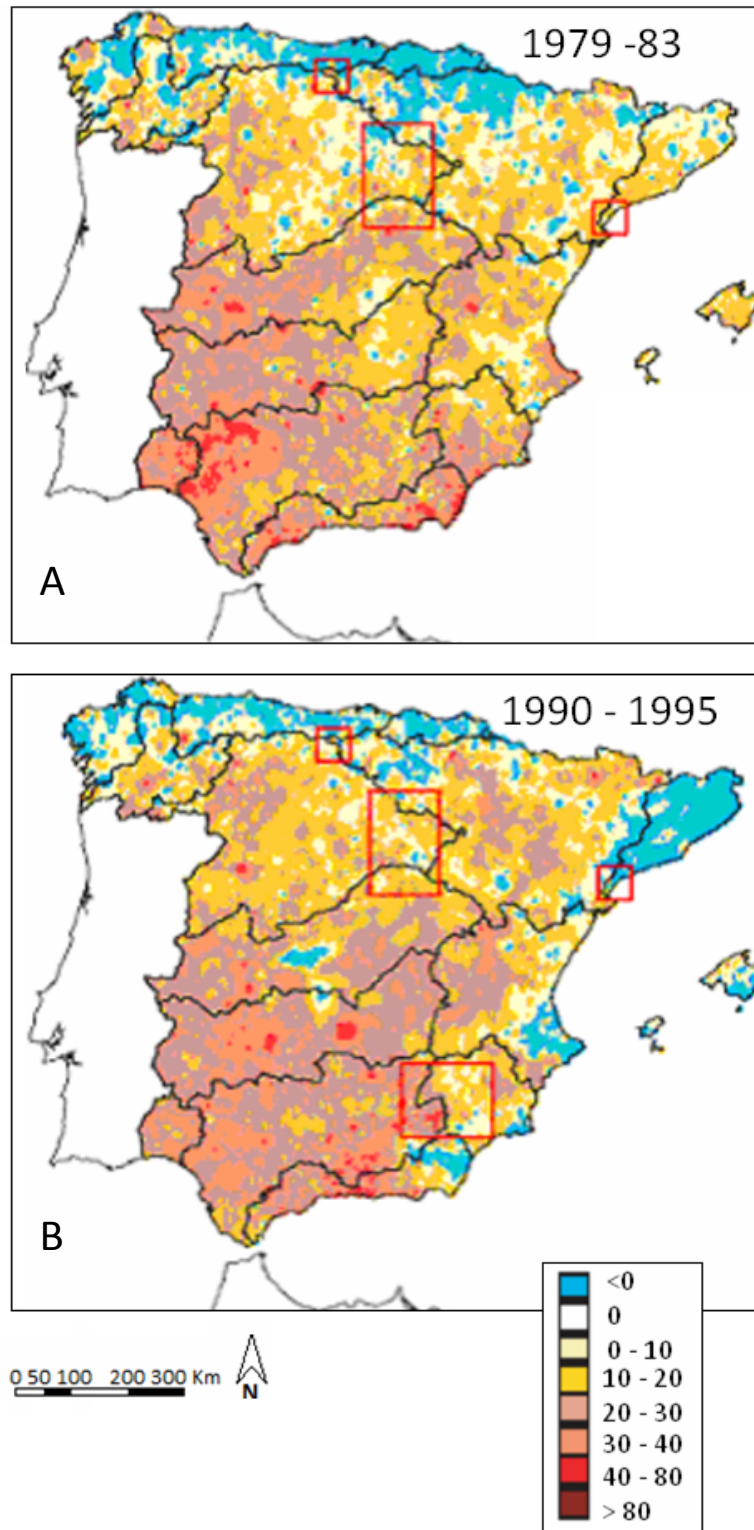
como de los 90, bastante similares en importancia pero nítidamente separadas por un significativo periodo de abundancia pluviométrica. En el 4º grupo se engloban las cuencas de la cabecera montañosa del Segura, donde existieron secuencias secas de cierta categoría a finales de los 60/ inicios de los 70 y también a lo largo de los años 80 y al final de la serie pero nunca con una importancia equiparable a la intensa sequía que se desarrolló desde 1994 hasta 1997. Por último, en el 5º grupo, correspondiente a las cuencas menos montañosas del Segura, el predominio lo ostenta una sequía desde 1982 a 1986, siendo el resto prácticamente insignificantes.

Espacialmente, el área más heterogénea se localiza en la divisoria Tajo- Ebro- Duero entre el Sistema Ibérico y el borde este del Sistema Central, donde se alternan geográficamente cuencas del grupo 1, con índices pluviométricos muy fluctuantes, con otras del grupo 2 (Linares del Arroyo o Burgomillodo), cuyas series se acercan mucho más a las de la cuenca del Ebro que al propio Tajo norte, donde los 90 no fueron especialmente secos.

Será importante observar qué sucede con la sequía hidrológica tanto en este ámbito como en la zona de divisoria entre el Guadalquivir y el Segura, donde se da una interesante gradación de modalidades pluviométricas diferenciadas entre sí fundamentalmente por la intensidad de las sequías de los 90 y de los 80; pero sobre todo en las dos cuencas inclasificables o *outliers* en cuyas singularidades habrá que incidir mucho a la hora de evaluar cómo evolucionan cuando se trasciende hacia una etapa más avanzada del ciclo hidrológico.

Efectivamente, según la estimación de la precipitación realizada con el modelo distribuido SIMPA en el *Libro Blanco del Agua* para las sequías de los 80 y 90 (Ver Figura 6.32), estas áreas complejas de las que hablamos son zonas cuyas variaciones porcentuales con respecto a la media de toda la serie se comportan en estas dos etapas secas de manera más heterogénea de lo habitual, sobre todo teniendo en cuenta que en el ámbito mediterráneo español estas dos grandes sequías pluviométricas en concreto se concibieron como un fenómeno bastante uniforme y de reducida y suave variabilidad espacial (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000).

FIGURA 6.32: Mapas de la disminución porcentual de la precipitación media en los periodos secos 1979- 83 (A) y 1990- 95 (B) con respecto a la media de 1940-1996.



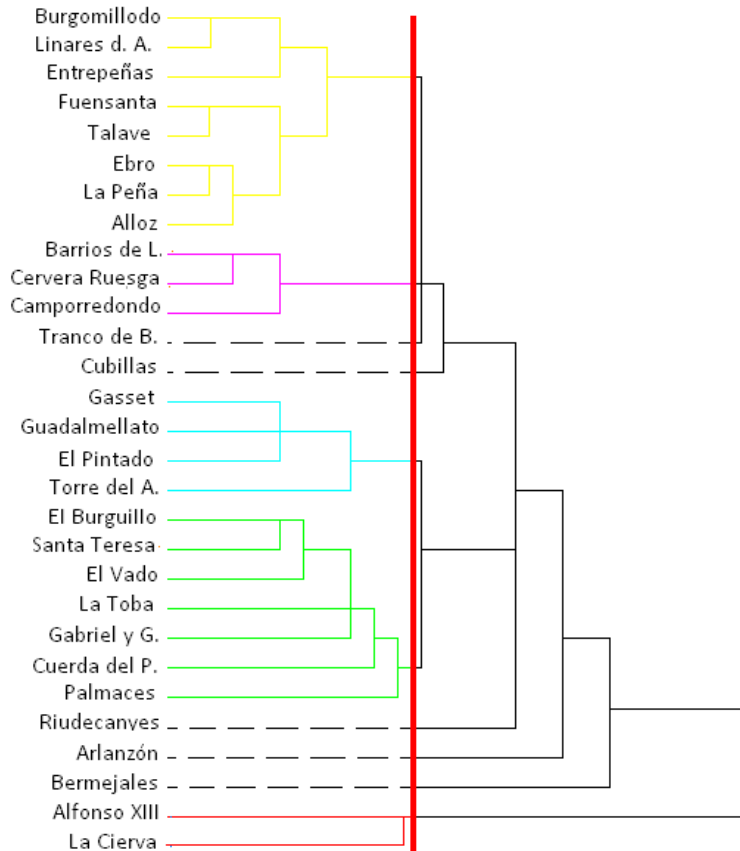
FUENTE: Libro Blanco del Agua en España (ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2000).

No puede olvidarse el hecho de que a esto habría que sumarle lo acaecido durante el resto de la serie y, por supuesto, tampoco ha de perderse de vista que el *Libro Blanco del Agua*, tal y como se aclaró anteriormente, utiliza otros indicadores más sencillos que en cambio comportan la desventaja de no tener en cuenta de manera precisa la importante componente acumulativa de la sequía (Pita López, M. F. *et al.*, 2002), con lo que posiblemente estas zonas serán, si cabe, más heterogéneas de lo que muestra este documento, corroborándose así la catalogación establecida en este apartado para ellas.

En resumen, con respecto a su IESP las cuencas de estudio se agrupan de acuerdo con una lógica territorial que muy simplificada podría definirse como cambiante en sentido NW- SE, si bien no ha de interpretarse infundadamente que esta tendencia sea necesariamente la que sigan los espacios intercuenca porque la realidad de una zona de cabecera no tiene por qué ser comparable a la de otro tipo de áreas, a pesar de que se aprecie bastante homogeneidad.

Si se efectúa el análisis sobre los datos de *sequía en la aportación* (IESAp) y se examina el dendrograma derivado de la clasificación (Ver Figura 6.33), lo primero que se evidencia es que la mayoría de las cuencas se encuentran comparativamente menos cercanas entre sí que en el caso de la sequía pluviométrica, de manera que existen pocos grupos que se formen antes de unas distancias reescaladas de 5 (aproximadamente la mitad de las distancias, elegida como distancia de corte), lo cual corrobora la afirmación de que la variante hidrológica de la sequía introduce mucha más variabilidad; otra característica del dendrograma asociada a esto último es la aparición de muchas más cuencas aisladas, cuyos comportamientos no se ajustan *a priori* a ninguna agrupación posible con el resto.

FIGURA 6.33: Dendrograma de las cuencas según sus IESAp.



** Conglomerados coloreados. En rojo aparece la distancia de corte. En línea discontinua se marcan las cuencas no agrupadas con este método.
FUENTE: Elaboración propia.*

Parece evidente que en la interpretación posterior habrá que distinguir claramente entre:

- las cuencas que se agrupan de manera similar a como lo hacían de acuerdo con sus datos de sequía pluviométrica,
- las cuencas que se agregan en conjuntos con otras en las que no necesariamente se daba la misma sequía en las precipitaciones,

- los conjuntos de cuencas que se escinden en varios subgrupos bien definidos al pasar a la sequía hidrológica y
- las cuencas *outliers*, por último, cuya comprensión resultará esencial para desentrañar los mecanismos que más influyen en el paso de una a otra variedad del fenómeno.

Por otra parte, los grupos en este caso se seleccionan con distancias bastante variables, de manera que en las regiones del dendrograma donde éstas son menores se intentará diseccionar y profundizar un poco más en las diferencias que alejan entre sí los subgrupos, mientras que en las que existen mayores distancias entre las cuencas se hará un esfuerzo por reunir las en grupos razonables desde el propio conocimiento de los casos de estudio, sin olvidar esta diversidad que habrá de ser identificada y descrita.

Es preciso anticipar que los histogramas de los índices y de las correspondientes anomalías acumuladas de las que derivan se relacionan considerablemente con la agrupación de las cuencas en el caso de la variante hidrológica, lo cual no sucedía tan manifiestamente para las precipitaciones. Esto se da sobre todo cuando aparecen unas determinadas distribuciones cuyas características no son en absoluto arbitrarias y responden a unos rasgos muy específicos de las cuencas.

De este modo, aparecen cinco grupos de distancias de convergencia variable pero características comunes fácilmente reconocibles que serán examinados minuciosamente:

- GRUPO 1 → Cuencas de histogramas bimodales o pseudobimodales: Linares del Arroyo, Alloz, Ebro, La Peña, Entrepeñas, Fuensanta, Talave y Burgomillodo. Se localizan en la mitad este peninsular, pero su nexa vinculante fundamental es el alto potencial hidrogeológico, apareciendo en todas una elevada densidad de surgencias de importante caudal.
- GRUPO 2 → Cuencas del suroeste peninsular, con IESAp poco oscilantes e histogramas con mucha curtosis y asimétricos, con acuíferos de escasa o nula incidencia en el mantenimiento del caudal y de poco carácter montañoso. La evapotranspiración juega

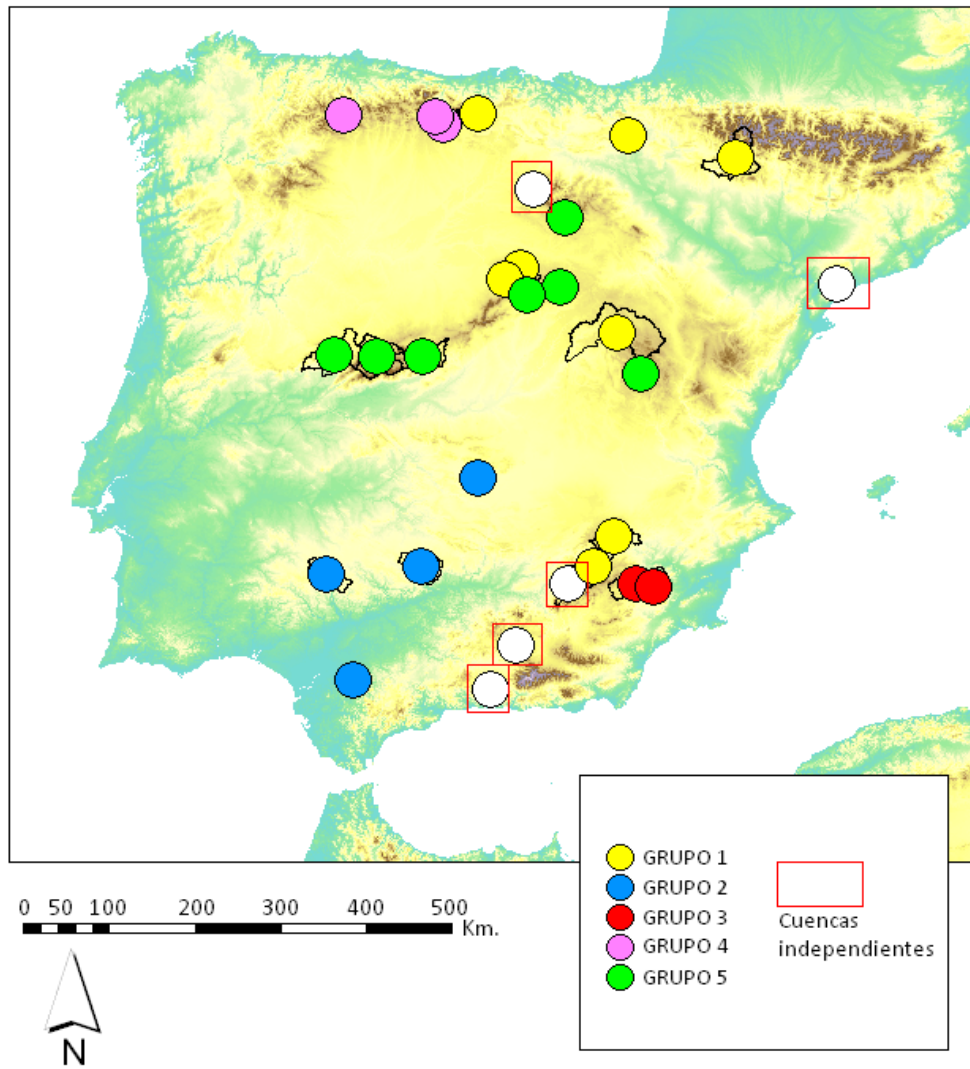
en su sequía hidrológica un papel muy relevante. Estas cuencas son El Pintado, Guadalmellato, Torre del Águila y Gasset.

- GRUPO 3 → Cuencas de ambientes de intensa aridez que, independientemente de su capacidad acuífera, poseen una escurrentía muy exigua y variable que trae consigo una respuesta muy característica a las situaciones de sequía; aunque entre ambas aparecen ciertas diferencias, estas fueron en su mayoría introducidas de partida por la propia precipitación. Este grupo engloba a los casos de Alfonso XIII y La Cierva. Sus histogramas son también en estos casos muy asimétricos y de elevada curtosis.
- GRUPO 4 → Cuencas de alta montaña en el borde norte del área mediterránea peninsular, en la cuenca del Duero, con un régimen pluvionival que, tal y como se explicará más adelante, incide en el devenir del índice y de moderada importancia del factor hidrogeológico, siendo este sin embargo lo que las distingue levemente entre sí: Cervera, Camporredondo y Barrios de Luna.
- GRUPO 5 → Cuencas de montaña media en el interior peninsular que engloban sequías pluviométricas algo diferentes pero cuyos rasgos físicos las hacen converger hacia respuestas hidrológicas bastante similares. Su potencial hidrogeológico es bajo y su régimen no puede considerarse pluvionival, aunque en algunos casos exista cierto mantenimiento de la aportación primaveral debido al agua de deshielo. Los casos englobados en este grupo son El Burguillo, Santa Teresa, El Vado, La Toba, Gabriel y Galán, Cuerda del Pozo y Palmaces.

Fuera de los anteriores grupos aparecen las cuencas orientales del Guadalquivir: Cubillas, Bermejales y Tranco de Beas, lo suficientemente dispares como para ser consideradas separadamente, al menos en esta fase inicial; la cuenca de Riudecanyes; que introduce mucha variabilidad a su ya de por sí disímil sequía pluviométrica y por último Arlanzón, cuyos rasgos implantan una respuesta a la sequía pluviométrica difícilmente comparable con algún otro caso de estudio.

La distribución geográfica de estos grupos aparece en la Figura 6.34.

FIGURA 6.34: Mapa de los grupos hallados con conglomerados jerárquicos sobre las series de IESAp.



** Los grupos se han coloreado del mismo modo que en el dendrograma.
FUENTE: Elaboración propia.*

Como puede distinguirse, exceptuando las cuencas bimodales del grupo 1 cuyo comportamiento es uniforme de acuerdo con una serie de comunalidades hidrológicas muy específicas que se detallarán en la interpretación, la agrupación sigue un patrón significativamente más latitudinal que la establecida a partir de las propias precipitaciones. Esto apunta a que el factor térmico y sus procesos asociados participantes en el ciclo

hidrológico, fundamentalmente la innivación y la evapotranspiración, juegan un importante papel en el comportamiento de la sequía hidrológica.

B. Fase de interpretación.

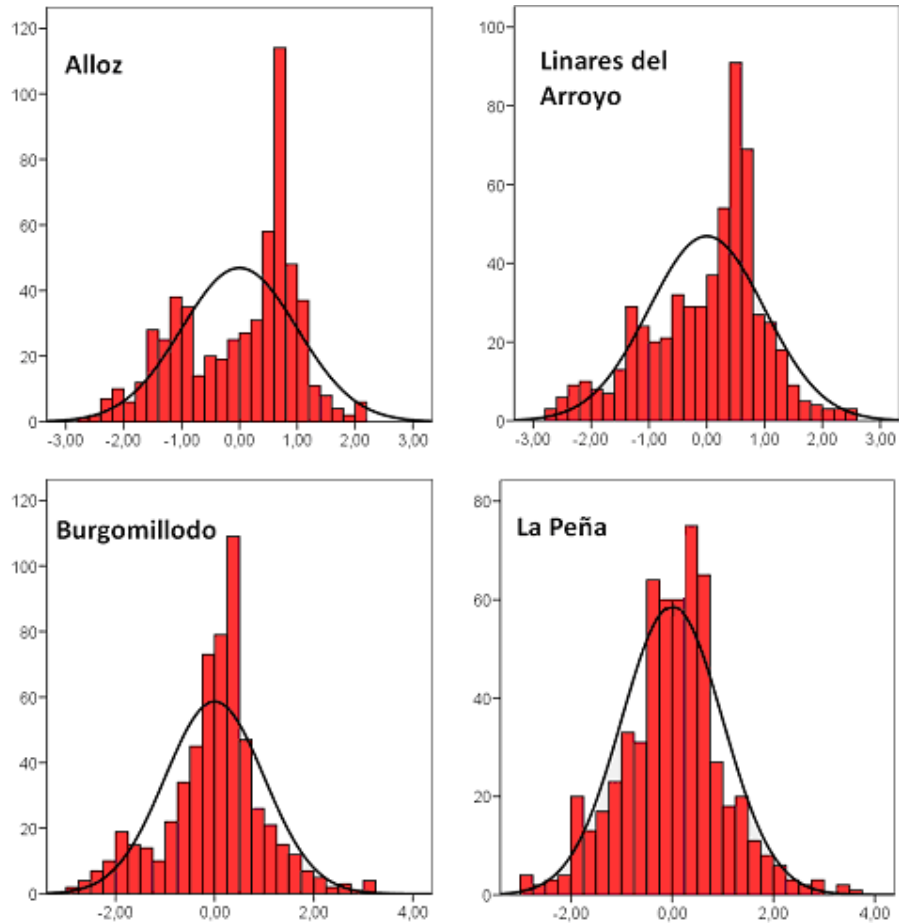
Una vez establecidos los grupos para esta variable y comprobando el cambio evidente que existe desde la clasificación establecida para la precipitación, se procederá al comentario detallado de las diferentes situaciones identificadas y se esclarecerán las causas que las propician. Cabe añadir que el tratamiento de cada grupo frecuentemente requerirá una serie de análisis específicos de acuerdo con sus características propias, si bien se intentará sistematizarlos y homogeneizarlos en la medida que sea posible.

- **GRUPO 1. Las cuencas de histogramas del IESAp bimodales o cuasi-bimodales.**

En este conjunto se engloban ocho casos de estudio que parten de regímenes pluviométricos e hidrológicos muy heterogéneos, pero cuyas sequías hidrológicas resultan tan singulares y definitorias que merecen ser agrupados y explicados simultáneamente.

De hecho, solamente dos de los ocho casos ya contaban con un IESP claramente tendente a la bimodalidad: Alloz (a partir de 1982 llueve significativamente menos que en el resto de la serie) y Linares del Arroyo; de manera mucho más leve en Burgomillodo y La Peña se aprecia una tendencia hacia estas formas del histograma (Ver Figura 6.35).

FIGURA 6.35: Histogramas de las cuatro series del IESP en las que se identifica una distribución platycúrtica, levemente tendente a la bimodalidad.



FUENTE: Elaboración propia.

En las otras cuatro se observa un histograma del índice pluviométrico bastante apartado de los cánones de la normalidad, fundamentalmente por la asimetría y la curtosis, pero no comparables con estas cuencas mencionadas y, sin duda, sin comparación con lo que en las ocho sucederá al evaluar los IESAp. Para profundizar en el resto de casos bimodales, acudir a la Figura 6.8, donde se muestran los histogramas de los IESP de todas las cuencas de estudio, y a la Figura 6.21, donde se aprecian los de los IESAp derivados.

Por otra parte, las correlaciones bivariadas entre los IESP de estas ocho cuencas entre sí no son en absoluto elevadas globalmente; en cambio, la situación es muy diferente cuando se examina el índice hidrológico, puesto que dichas correlaciones entre los IESAp superan el

0,6 en casi todos los casos. Esto fundamentalmente se asocia con la bimodalidad de sus índices hidrológicos, que implica un elevado número de valores altos y otro tanto de valores bajos distribuidos de manera aproximadamente sincrónica en las cuencas, de tal modo que las covariación es muy significativa.

Si se desciende al nivel de las pocas sequías hidrológicas superiores a los 12 meses, la correlación entre los casos de estudio no aumenta mucho con respecto a la consideración de la serie completa, ya que las oscilaciones dentro de estas macro-sequías sí que se corresponden en buena medida con las propias fluctuaciones del índice pluviométrico en cada cuenca.

No cabe duda que esta respuesta bimodal del IESAp y este cambio a partir de mitad de la década de los 80 cualesquiera que fueran las condiciones pluviométricas de partida, engloba a estas ocho cuencas en una realidad hidrológica común que ha de ser interpretada.

La característica fundamental que las une desde el punto de vista físico es que, según el Mapa Hidrogeológico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias a escala 1: 1.000.000 (IGME, 2012), no solo las cuencas reunidas en este grupo se ubican sobre unidades hidrogeológicas de elevada producción del IGME, sino que además en ellas se identifican multitud de fuentes de caudal continuo que apuntan a que la escorrentía subterránea tiene una enorme importancia. Este rasgo ha de tenerse muy en cuenta para interpretar qué está sucediendo con la escorrentía de estos ocho casos con respecto a lo que ocurre en otras cuencas cuya hidrogeología no tiene en absoluto este peso en el montante del caudal final.

Para facilitar la interpretación, se ha identificado para cada una de las cuencas el límite exacto en los años 80, donde se identifica el punto de inflexión hacia aportaciones más bajas, y se ha establecido como umbral de división de la serie en dos partes para posteriormente compararlas entre sí en ambas variables, con la finalidad de concluir qué sucede exactamente de forma distinta a partir de esos instantes y de qué manera se da ese cambio hacia unos índices de aportaciones tan intensamente negativos, constantes e irreversibles. El resultado de los análisis realizados puede apreciarse en la Tabla 2.4 del Anexo a este documento.

Efectivamente, el comportamiento que se aprecia en las cuencas es fácilmente asociable al hecho de que la aportación basal sea un importante factor dentro de sus funcionamientos, ya que este componente es capaz de atenuar los inicios de las secuencias secas si el acuífero se encuentra saturado (de hecho son cuencas en las que el retardo entre ambas series producía muy buenos resultados), y de condicionar que el volumen de

escorrentía circulante en la cuenca sea muy inferior a lo normal durante años si se encuentra lo suficientemente agotado. Esta última circunstancia se produce incluso si se vuelven a registrar valores de precipitación normales con que simplemente uno solo o unos cuantos de los meses del año sigan registrando precipitaciones anormalmente bajas de manera sistemática, como de hecho ocurre, a juzgar por los resultados de las ANOVAS que muestra la tabla del Anexo referida más arriba.

Así, la causa fundamental que conduce a que se den estas bimodalidades tan peculiares en los histogramas de los IESAp reside en el hecho de que todas estas cuencas poseen el caudal base de mayor importancia dentro de los casos de estudio considerados. Este caudal base es el encargado de un alto porcentaje del caudal total y es capaz de regular la escorrentía, retrasar y amortiguar eficazmente los posibles descensos pluviométricos siempre y cuando las etapas secas no sean muy intensas y alternantes. Ahora bien, si la anomalía en la precipitación se mantiene aguda y prolongadamente, bajará considerablemente el nivel freático de los acuíferos y, consecuentemente, la gran cantidad de surgencias que se identifican en estas cuencas aportarán un caudal subterráneo muy inferior a lo que resultaba habitual en las mismas. Esta baja aportación acuífera, a su vez, repercutirá rebajando el total de la escorrentía que llega al embalse durante un largo periodo debido a los enormes tiempos de recuperación y de flujo del agua subterránea, lo cual implicará que no solo baje mucho la media de anomalías acumuladas de la serie, sino que el índice IESAp registre valores incluso por debajo de ésta durante décadas.

De este modo *aparece la situación inicial como anormalmente húmeda y la final como excepcionalmente seca*, engrosando ambas las dos subdistribuciones que se identifican dentro del histograma bimodal.

De hecho, estas cuencas son casos en los que la sequía pluviométrica de los 80 afecta hasta tal punto al sistema que desde que se reflejan los primeros índices negativos en las aportaciones, hecho que ocurre en torno a 1985 en promedio, estos no logran volver a sus niveles normales prácticamente en todo el resto de la serie, a lo sumo algunos meses sueltos en los que el restablecimiento se debe a la mera componente superficial que se ve incentivada por un pico pluviométrico aislado pero suficientemente intenso. Tras estas ligeras y breves recuperaciones, al estar los acuíferos aún bastante esquilados, cualquier leve sequía pluviométrica vuelve a disparar inmediatamente otra sucesión de meses anormalmente secos

en la aportación.

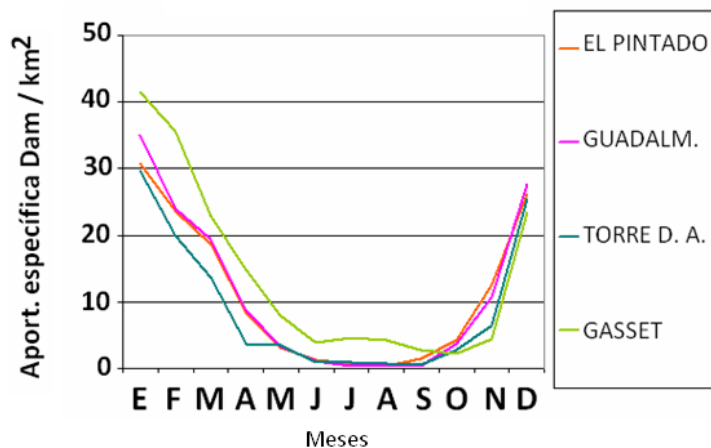
Así, puede concluirse que el factor hidrogeológico, cuando es una parte fundamental de la hidrología de una cuenca, influye sobre la sequía en sus aportaciones atenuando las intensidades y retardando la respuesta, pero sobre todo amplificándola temporalmente de manera considerable.

- **GRUPO 2. Las cuencas suroccidentales impermeables de la Península.**

En este grupo se reúnen cuatro cuencas del cuadrante suroccidental de la Península en el que ya se daban unas condiciones de sequía pluviométrica comunes: El Pintado, Guadalmellato, Torre del Águila (Guadalquivir tramos medio y bajo) y Gasset (Guadiana tramo medio). Conviene subrayar que la sequía pluviométrica las englobaba a todas ellas junto con el resto de casos de estudio de la cuenca del Guadalquivir, pero será fundamentalmente el factor hidrogeológico el que determine la separación de este grupo inicial en varios al pasar a evaluar la fase hidrológica de la sequía.

Se trata de cuencas de carácter poco montañoso, en absoluto abruptas y de altitudes máximas nunca superiores a los 1.000 metros. Otra característica fundamental que las vincula es la escasa, prácticamente nula, importancia de la componente basal de la aportación en estas cuencas, a juzgar por la cartografía hidrogeológica y confirmado mediante la observación de sus hidrogramas mensuales medios, donde aparecen unos caudales completamente debilitados en verano, casi inexistentes (Ver Figura 6.36).

FIGURA 6.36: Hidrogramas mensuales medios de las cuencas del GRUPO 2.



FUENTE: Elaboración propia.

Torre del Águila y Gasset tienen parte de su superficie permeable y se les atribuye cierta capacidad acuifera, asignándosele una productividad moderada. Sin embargo ambas cuencas son zonas de importante potencial agrícola, no en vano están cultivadas en más de un 50% de su superficie, y el poco agua que logran albergar es extraída sin que pueda contribuir a establecer un caudal base de importancia, de hecho las unidades hidrológicas del aluvial del Guadiana suele sufrir a menudo importantes problemas de sobreexplotación (López Sanz, G., 2000).

El Pintado y Guadalmellato, en cambio, están asentados sobre la Sierra Morena, litologías paleozóicas de carácter metamórfico, sin capacidad acuifera *a priori*, si bien se intercalan algunas formaciones carbonatadas discontinuas que permiten el almacenamiento de agua cuya importancia local no ha de pasarse directamente por alto. No obstante, el caudal base no logra verse suficientemente reflejado en el régimen fluvial de estos casos de estudio.

A la escasez de agua subterránea se suma el hecho de que las latitudes oscilan entre estas cuencas en un intervalo desde los 37 a los 39 grados, una franja donde las altas presiones subtropicales veraniegas ejercen un fuerte bloqueo que implica unas precipitaciones muy bajas. Por otro lado, la insolación en estos meses produce unas temperaturas altísimas que acarrearán la evaporación de prácticamente todo el escaso volumen de agua precipitado.

Todo ello trae consigo un régimen hidrológico muy contrastado en el que destaca un

caudal de estiaje leve o nulo por espacio de unos tres meses, aunque en gran parte de los años éste se prolongue de mayo a octubre, pues, como se ha comprobado en capítulos anteriores, la escorrentía a nivel mensual registra cierta inercia. Lo verdaderamente interesante es que, en otras tipologías de cuenca, la variable aportación logra homogeneizar la variabilidad que introduce la precipitación, pero en estas cuencas ocurre al contrario: la escorrentía introduce mucha más irregularidad a nivel mensual de la que de por sí impone la propia lluvia, y esto necesariamente se refleja en la forma de manifestarse la sequía hidrológica.

En estas circunstancias, la gran mayoría de los valores de aportaciones que se registran son bajos, y por ello las medianas de las series también lo son. Por otro lado, se alcanzan puntualmente valores extremos de caudal- favorecidos por la impermeabilidad- que suben mucho la media de la distribución de los valores originales de las variables, la cual se vuelve marcadamente asimétrica.

A la hora del cálculo del índice se encuentran circunstancias similares, ya que las medianas mensuales son bastante bajas, dadas estas condiciones habituales de poco caudal, pero se producen unas anomalías positivas tan extremas en épocas húmedas que, aunque no se agrupen varios meses en estas circunstancias, su acumulación resulta ya muy elevada en sí misma, arrastrando la media hacia valores muy altos e implicando que *casi toda la serie acabe, al estandarizar, reflejando IESAp negativos*.

Además, los valores de *las anomalías negativas acumuladas nunca derivan en unos valores del índice de sequía muy intensos* al tipificar⁴ porque:

- Las anomalías por exceso no tienen un tope natural, ya que teóricamente la aportación puede tomar cualquier valor. En cambio, el caudal nunca podrá ser inferior a cero y por tanto la anomalía negativa nunca será más grande que la propia mediana mensual, por definición. A su vez, esta mediana mensual es muy reducida en estas cuencas, pues el caudal a menudo es exiguuo.
- La gran variabilidad de las aportaciones implica que las desviaciones típicas sean muy elevadas, de manera que al dividir la anomalía negativa acumulada entre ellas,

⁴ Recordemos que el valor del índice de sequía es, en cada mes, la puntuación z que le corresponde al valor de la anomalía acumulada del mismo.

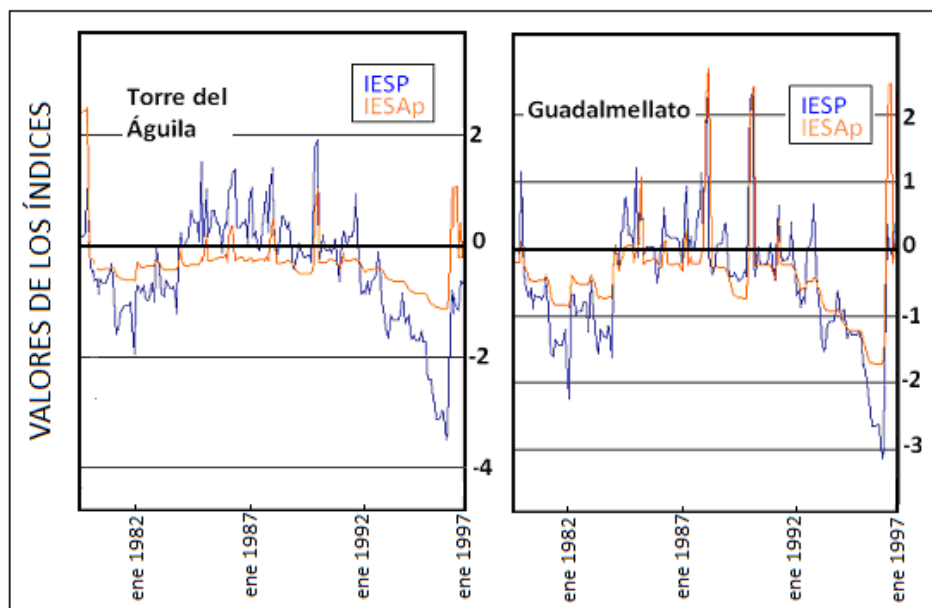
aparecen siempre unos valores muy reducidos.

En consecuencia, las secuencias verdaderamente secas no aparecen todo lo bien definidas que sería deseable y difícilmente se distinguirán del resto de los muchos valores desafortunadamente marcados con IESAp negativo.

De este modo, los valores de la serie están a menudo muy próximos a 0, habitualmente algo por debajo, y son fruto de la división del valor de la anomalía acumulada del mes menos la media de la serie de estas por una desviación típica muy alta, consecuencia de una serie muy irregular. Además, como las aportaciones son muy exiguas, lo normal es que la anomalía de cada mes sea insignificante y al acumular de un mes a otro apenas se perciba el cambio, por lo que aparecen muchos valores de anomalía acumulada- y por ende del índice - similares y correlativos.

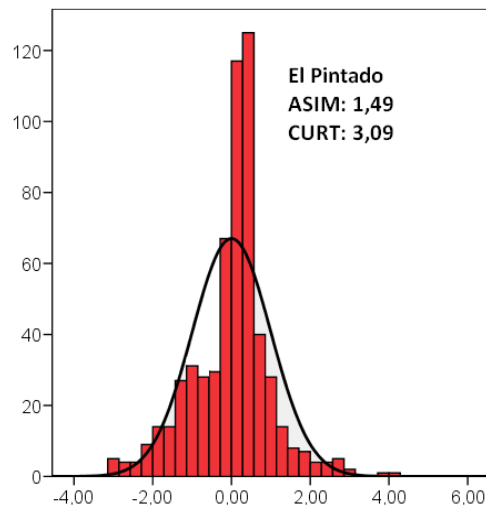
Esta es la explicación tanto de la planicie y la poca variabilidad de las gráficas de los IESAp negativos de estas cuencas, aunque el índice pluviométrico oscile mucho, especialmente en los meses de verano (Ver Figura 6.37), como de la elevada curtosis que reflejan los histogramas de las series de este grupo (Ver Figura 6.38).

FIGURA 6.37: Detalle de las dos sequías más importantes para dos de las cuencas del GRUPO 2.



FUENTE: *Elaboración propia.*

FIGURA 6.38: Histograma del caso menos asimétrico y córtico dentro del GRUPO 2, El Pintado.



FUENTE: Elaboración propia.

Por todas estas cuestiones, la solución a aplicar con este tipo de cuencas consiste en tomar la determinación de no interpretar como secas más que aquellas secuencias cuya duración e intensidad sea destacable con respecto al resto de las que aparezcan. Resulta una leve desventaja no poder tomar los IESAp por debajo de cero como indicativos directos y estrictos del déficit hidrológico por el hecho de que aparezcan demasiados valores negativos.

Sin embargo, esto no vuelve necesariamente disfuncional al índice ya que en pasos o investigaciones sucesivas éste podrá reinterpretarse, como ya detallaremos.

- **GRUPO 3. Las cuencas de ambientes de intensa aridez.**

Este grupo está compuesto por dos de las cuencas de la Confederación Hidrográfica del Segura: Alfonso XIII y La Cierva, cuyas particularidades climáticas serán en este caso absolutamente determinantes sobre la sequía hidrológica.

Estas dos cuencas ya estaban unidas en el dendrograma correspondiente a la agrupación establecida a partir del IESP, dado que en ambas aparece un claro predominio de la sequía de los 80 y una escasa importancia de la de los 90 y 2000. Las distancias en el

dendrograma del índice pluviométrico son muy superiores a las que unen las cuencas de otros grupos y, en cambio, al pasar al índice hidrológico estas distancias se mantienen. Por lo tanto, conviene mantenerlas unidas ya que ambos casos de estudio manifiestan una respuesta muy peculiar y común que además es única entre las cuencas piloto.

Recopilando la información relativa a ambas cuencas extraída a lo largo de todo el estudio, se advierte que son las únicas dos cuencas en las que no mejora la correlación entre los valores mensuales de ambas variables originales al desfazar las series y que, al efectuarlo con los respectivos índices de sequía, tampoco se obtienen las mejoras sustanciales que se aprecian con rotundidad en el resto de casos.

Sin embargo, aunque en términos generales y usando la serie completa este retardo no quede patente, observando las gráficas de los índices para una y otra variable, puede apreciarse cierta prórroga y atenuación de los picos mínimos y máximos en la aportación para ambas cuencas.

La causa fundamental que no permite que se mantenga la inercia de la humedad tan indiscutiblemente como en otros casos de estudio es la extrema aridez del ámbito geográfico al que corresponden, y pese a estar a tan solo unos 50 kilómetros de cuencas mucho más húmedas como Fuensanta o Talave, éstas últimas son cuencas montañosas que registran una altitud media muy superior. A esta fisiografía más llana se une el hecho de que Alfonso XIII y La Cierva se encuentran completamente al abrigo de los Sistemas Béticos, que proyectan sobre esta franja de la Confederación Hidrográfica del Segura una sombra pluviométrica que contrasta mucho con lo que sucede alrededor, de manera que en promedio llueve prácticamente la mitad que en Fuensanta, en torno a 350 mm. al año.

Además, los coeficientes de escorrentía han despuntado también como los más bajos de todas las cuencas piloto, y es que en estas condiciones de escasez, cualquier pérdida por infiltración (se trata de cuencas de litología permeable en algunos tramos, de acuerdo con la caracterización de sus formaciones estipulada en la cartografía hidrogeológica del IGME), por evaporación (son cuencas poco montañosas del sur peninsular) o por captaciones agrícolas (pese a que son áreas poco antropizadas y no muy intensivas), constituye un porcentaje mucho más elevado con respecto a la exigua disponibilidad del recurso del que supondría para cualquier otra cuenca más húmeda. Por ello, dada la poca recarga que reciben sus acuíferos, no está garantizado un caudal de estiaje de importante entidad.

A pesar de estas limitaciones, los regímenes hidrológicos son más uniformes y se encuentran bastante más amortiguados que, por ejemplo, los correspondientes a las cuencas impermeables del Guadalquivir pertenecientes al grupo 2. De hecho, al efectuar el análisis de las anomalías en la aportación a lo largo de los meses (Ver Tabla 6.17), se encuentra que los doce grupos mensuales de anomalías no difieren sustancialmente entre sí, sea la época del año que sea. Esto implica que tanto los resultados de la acumulación de las anomalías como el propio índice no se encuentran tan afectados por el régimen y resultan entonces más simbólicos de una situación deficitaria o excedentaria real que en las cuencas del Guadalquivir.

Esto también explica que en Alfonso XIII y La Cierva no se aprecie el efecto de índices paralelos al eje temporal tan marcado y sistemático que se identificaba en las gráficas de los IESAp del grupo 2 a causa de las minúsculas anomalías que se sucedían correlativamente en los meses del verano.

TABLA 6.17: Anova de las anomalías mensuales en las aportaciones. Variable a contrastar: anomalías, factor: meses.

ANOVA		SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	MEDIA CUADRÁTICA	F	SIGNIFICACIÓN
Anomalías en la aportación → ALFONSO XIII	Inter-grupos (meses del año)	18,76	11	1,71	1,8	0,07
	Intra-grupos (meses del año)	574,15	576	0,95		
	Total	592,91	587			
Anomalías en la aportación → LA CIERVA	Inter-grupos (meses del año)	4,77	11	0,43	1,18	0,295
	Intra-grupos (meses del año)	210,78	576	0,37		
	Total	215,54	587			

FUENTE: Elaboración propia.

Aún teniendo en cuenta este detalle, la propia precipitación y las aportaciones de ellas derivadas, son muy irregulares en este área de la Península y ocasionalmente registran unos máximos muy altos que arrastran mucho la media de las anomalías, implicando que ambas variables y para prácticamente todos los meses, muestren una distribución asimétrica positiva (Ver Tabla 6.18), y se eleve también mucho su curtosis, ya que prácticamente todo el

histograma de valores se concentra más próximo a la media que repartido uniformemente hacia los extremos, al ser estos desmedidos.

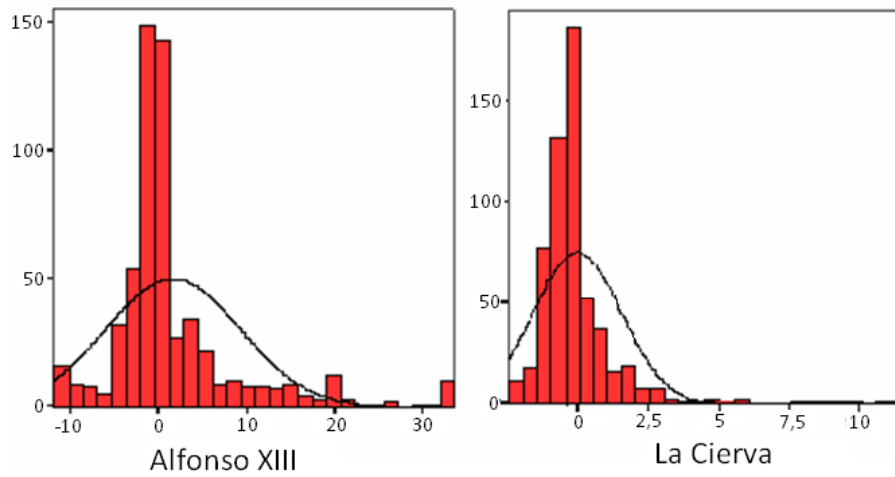
TABLA 6.18: Medias y medianas mensuales en las anomalías de las aportaciones del GRUPO 3, las cuales reflejan una clara asimetría positiva.

ANOMALÍAS EN LA APORTACIÓN POR MESES	ALFONSO XII		LA CIERVA	
	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	MEDIA
ENERO	0,57	0,67	0,23	0,40
FEBRERO	0,40	0,69	0,37	0,42
MARZO	0,32	0,70	0,39	0,47
ABRIL	0,27	0,55	0,40	0,39
MAYO	0,29	0,59	0,23	0,33
JUNIO	0,19	0,48	0,17	0,22
JULIO	0,04	0,18	0,04	0,21
AGOSTO	0,10	0,17	0,13	0,27
SEPTIEMBRE	0,18	0,72	0,24	0,48
OCTUBRE	0,27	0,98	0,16	0,44
NOVIEMBRE	0,31	0,85	0,20	0,49
DICIEMBRE	0,45	0,77	0,19	0,37

FUENTE: *Elaboración propia.*

Este tipo de distribución leptocúrtica y asimétrica se traslada a su vez hacia las anomalías acumuladas (Ver Figura 6.39), tanto más cuanto más correlativos sean estos extremos, y obviamente por lo tanto a los propios índices IESAp, que consecuentemente nunca bajan por debajo de -2 y, en cambio, se marcan como levemente negativos algunos valores que no corresponden a un déficit acumulado especialmente inusual, como sucedía en el grupo de cuencas del grupo 2.

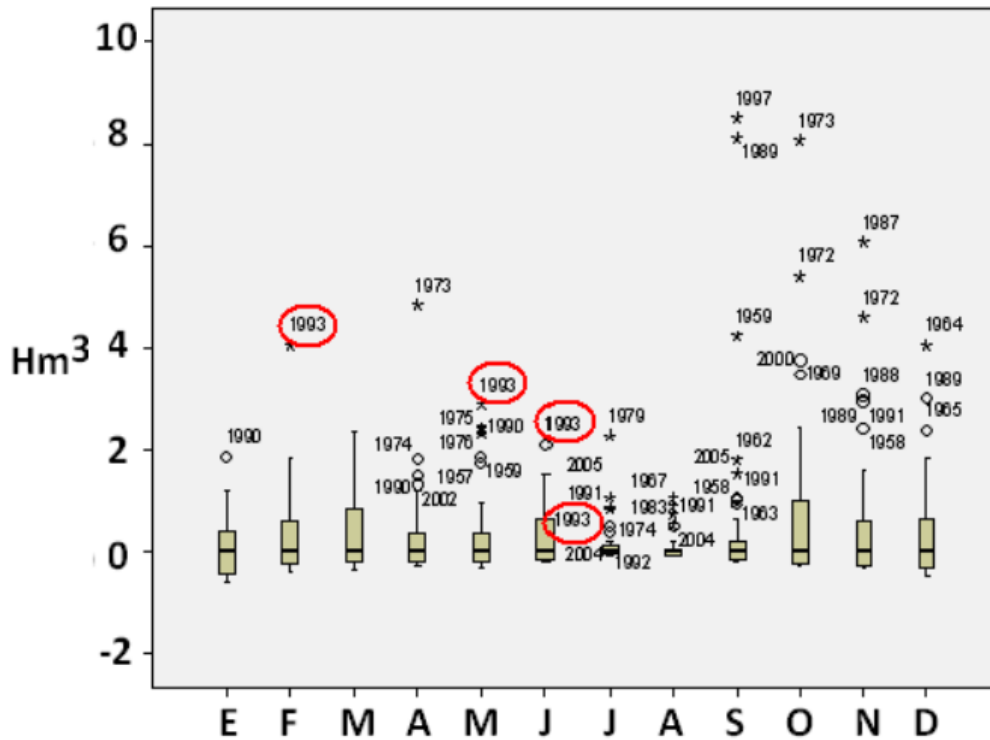
FIGURA 6.39: Histogramas de las series de anomalías acumuladas en las aportaciones del GRUPO 3.



FUENTE: Elaboración propia.

Es precisamente en los grandes excedentes donde se aprecia la mayor diferencia que introduce la aportación en los casos de estudio de este grupo frente a lo que sucede en sus precipitaciones, puesto que la cuenca al ser alargada y permeable los logra amortiguar y retardar pero también los mantiene en el tiempo mucho más que en los IESP, incluso durante casi años enteros (Ver Figura 6.40).

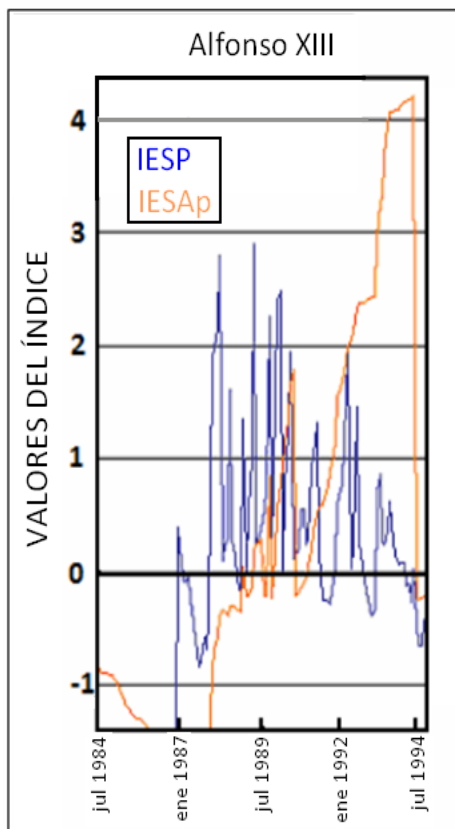
FIGURA 6.40: Diagramas de caja de las anomalías mensuales en las aportaciones en la cuenca de Alfonso XIII.



* Se señalan los valores de 1993, pues destacaron como atípicamente altos durante varios meses consecutivos, sin serlo en la precipitación.
FUENTE: Elaboración propia.

Si este efecto de mantenimiento de un caudal se prolonga hasta el verano, donde las medianas son algo menores, las anomalías crecen bastante y al acumularlas se incrementa progresivamente el pico, apareciendo unos valores correlativos bastante altos del índice que inducen la clara asimetría del histograma, mucho mayor de la que se da en las precipitaciones, donde los máximos son de carácter más puntual (Ver Figura 6.41).

FIGURA 6.41: Detalle de la respuesta del IESAp a los extremos positivos consecutivos registrados en los años 90 en el IESP de la cuenca de Alfonso XIII.



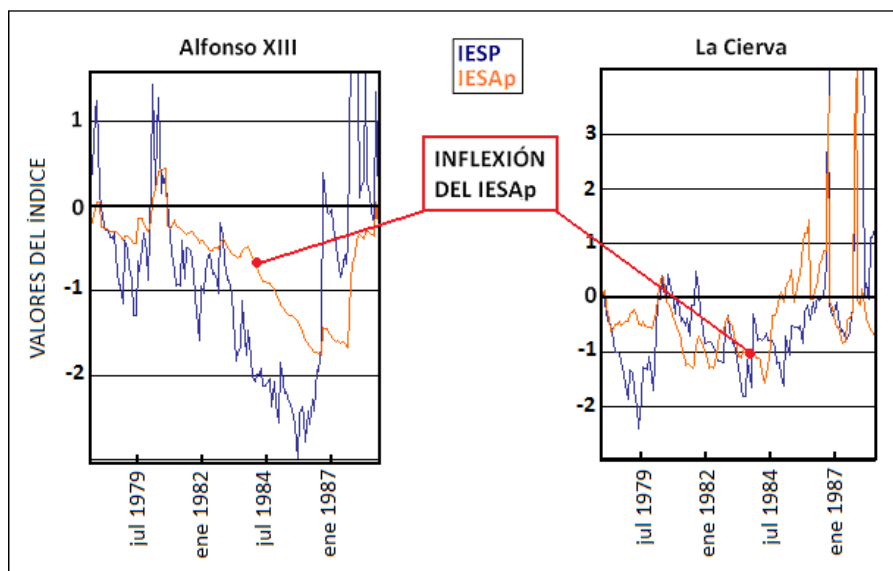
FUENTE: *Elaboración propia.*

En resumen, puede afirmarse que este grupo se compone de cuencas cuya frecuente aridez, combinada con su permeabilidad, introduce una clara dicotomía en las respuestas que se traduce en bajas correlaciones entre los índices IESP e IESAp:

- Por un lado son casos que actúan autorregulándose eficientemente en condiciones de mucha humedad, efecto que no se percibía en las cuencas más impermeables del grupo 2. Los índices hidrológicos dibujan oscilaciones suaves.
- Por contra, Alfonso XIII y La Cierva, al igual que las cuencas del anterior grupo (2), *no*

logran amortiguar la sequía de manera tan eficaz como la excedencia. Algunas sequías pluviométricas cortas e inmediatamente posteriores a una etapa de excedente, como la de los 70, no se notan en los IESAp, o lo hacen atenuadamente. En cambio, aquellas sequías que se excavan más prolongada y lentamente en la precipitación agotan también el potencial subterráneo, que de por sí es frágil. Una vez esto sucede, el acuífero en agotamiento no puede ejercer el mismo efecto regulador y se aprecia un punto de inflexión en los IESAp, el cual empieza a bajar más intensamente y más sincrónico con respecto al IESP (Ver Figura 6.42).

FIGURA 6.42: Detalle de la respuesta del IESAp al agotamiento hidrogeológico que tiene lugar durante una sequía pluviométrica prolongada.



FUENTE: Elaboración propia.

- **GRUPO 4. Las cuencas de la margen norte del Duero.**

Este grupo está formado por las cuencas que drenan hacia los embalses de Cervera-Ruesga, Camporredondo y Barrios de Luna.

En el índice pluviométrico compartían similitudes con el resto de cuencas del cuadrante noroccidental, pero al analizar los IESAp vemos que no solo se disgregan de ellas y

dibujan unas gráficas de suave oscilación sino que covarían mucho entre sí. El resto de los casos de estudio del cuadrante occidental tienen un IESAp muy fluctuante y muy acorde con el IESP.

De hecho, lo más significativo que se aprecia es que el IESAp de las cuencas de este grupo no muestran una elevada correlación con el índice pluviométrico, pero ésta mejora notablemente al desfasar las series.

Por tanto, se deduce que en su hidrología influyen factores que están introduciendo una leve persistencia. Tras analizarlas en profundidad se han identificado dos causas fundamentales que inducen este tipo de respuesta y hacen de estas cuencas un grupo individual y singular:

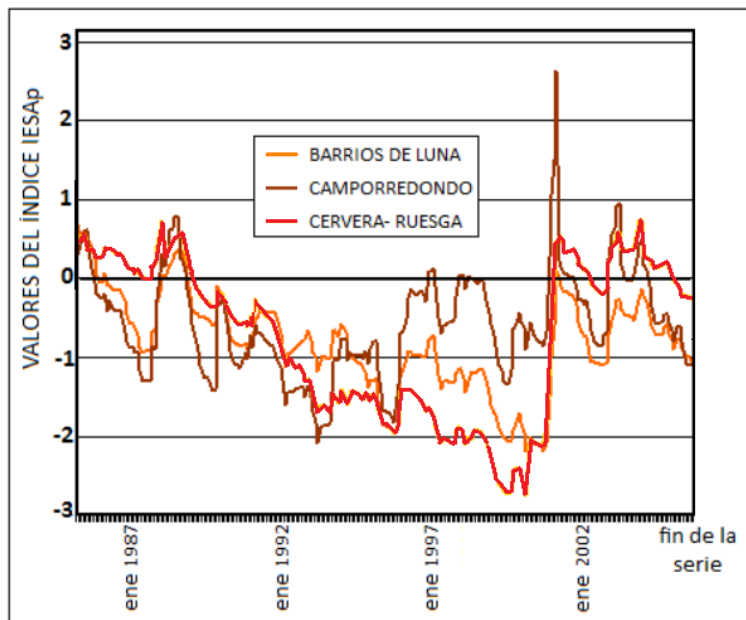
- A pesar de que son cuencas predominantemente impermeables, se ha identificado en parte de su territorio la existencia de vetas de permeabilidad desde media hasta alta que pueden albergar agua (IGME, 2012) y que, a juzgar por la tenue amortiguación de la bajada estival en los regímenes hidrológicos, así lo hacen⁵. Por tanto, la *difusión subterránea* juega cierto papel en estas cuencas.

- Son las tres cuencas de carácter más montañoso. Son muy abruptas, con unas pendientes promedio siempre superiores al 10%, y unas altitudes medias por encima de los 1.300 m. que implican que el Sistema Integrado del Agua no solo las catalogue como cuencas nivales, sino que les otorgue una de las mayores aportaciones nivales de la Península, siendo casos en los que se puede considerar el régimen fluvial como pluvionival. Esto se asocia a *retención nival de las escorrentías*, a bajas temperaturas y a *poca evapotranspiración*.

En primer lugar se aclarará la importancia de la *permeabilidad moderada* de este grupo como factor causante de una respuesta hidrológica que no se asemeja a la de ningún otro, para lo cual es ilustrativo aludir a la principal sequía en las aportaciones: la secuencia de los años 90. Aunque se trate de la sequía hidrológica más importante en las tres cuencas de este grupo, dibuja un leve desajuste entre las tres (Ver Figura 6.43). Esta es la única disconformidad importante que se aprecia entre las gráficas de los tres índices IESAp.

⁵ También se han testado con ANOVA las medianas mensuales y las anomalías en la aportación y se comprueba que no son significativamente distintas entre los meses, lo cual no solo apoya la hipótesis de que existe un potencial hidrogeológico moderado que mantiene el caudal circulante en unos niveles similares a lo largo del año, sino que conlleva que el valor de la acumulación y la excavación del propio índice no estén estadísticamente condicionados por la época del año de la que se trate como sí lo estaba en cuencas áridas.

FIGURA 6.43: Detalle de la sequía hidrológica de los años 90. IESAp de las tres cuencas.



FUENTE: Elaboración propia.

La primera cuestión interesante es que esta secuencia seca tiene lugar tanto en precipitaciones como en aportaciones, si bien es mucho más intensa y prolongada en esta última variable. Los años 90 en la precipitación muestran un IESP de carácter oscilante por encima y por debajo del 0 y en cambio en la aportación los valores del IESAp son continuos y en descenso suave hasta alcanzar un máximo en 1999; esto se explica porque los valores de las anomalías pluviométricas en este periodo no resultan significativamente bajos con respecto al resto de la serie (Ver Tabla 6.19), mientras que son tan marcadamente negativas en las aportaciones que se destacan mucho con respecto al resto de la serie (Ver Tabla 6.20), sobre todo en Cervera- Ruesga.

TABLA 6.19: Anova de las anomalías mensuales en la precipitación. Factor: meses de los años 90 y meses que no lo son.

		SUMA DE CUADRADOS	GR. LIB.	MEDIA CUADRÁTICA	F	SIGNIFICACIÓN
CERVERA- RUESGA	inter-grupos (meses de los años secos- meses de los años húmedos)	26,87	1	26,87	0,007	0,934
	intra-grupos	2.300.795,02	586	3.926,27		
	total	2.300.821,89	587			
CAMPORREDONDO	inter-grupos (meses de los años secos- meses de los años húmedos)	1.842,06	1	1.842,06	0,385	0,535
	intra-grupos	2.801.739,67	586	4.781,12		
	total	2.803.581,74	587			
BARRIOS DE LUNA	inter-grupos (meses de los años secos- meses de los años húmedos)	537,89	1	537,89	0,154	0,695
	intra-grupos	2.052.300,61	586	3.502,21		
	total	2.052.838,50	587			

FUENTE: Elaboración propia.

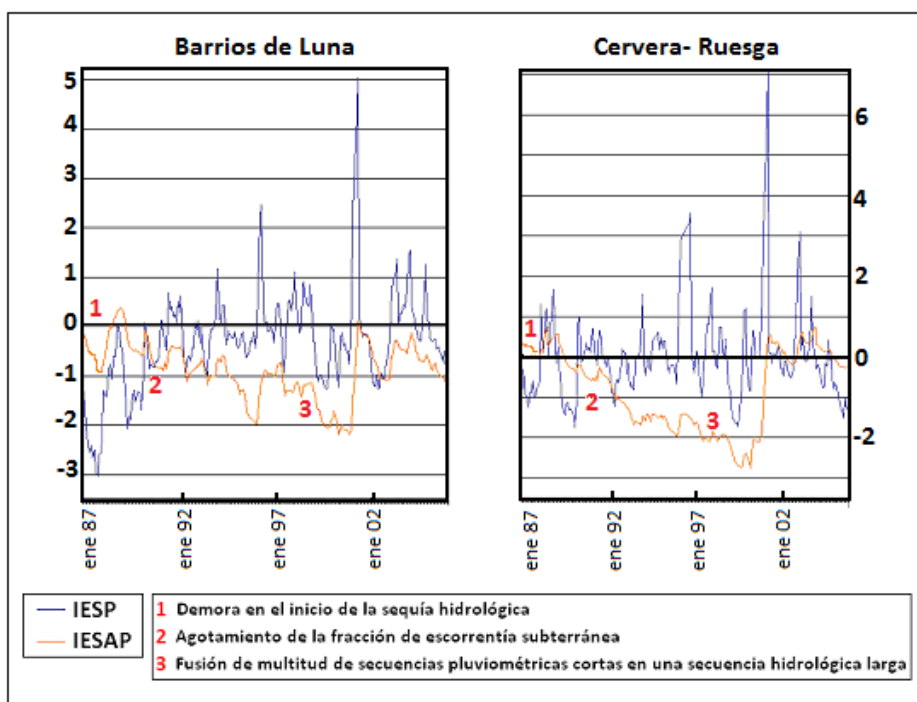
TABLA 6.20: Anova de las anomalías mensuales en la aportación. Factor: meses de los años 90 y meses que no lo son.

		SUMA DE CUADRADOS	GR. LIB.	MEDIA CUADRÁTICA	F	SIGNIFICACIÓN
CERVERA- RUESGA	Inter-grupos (meses de los años secos- meses de los años húmedos)	554,97	1	554,97	16,24	0,000
	Intra-grupos	20.015,58	586	34,15		
	Total	20.570,55	587			
CAMPORREDONDO	Inter-grupos (meses de los años secos- meses de los años húmedos)	1.407,41	1	1.407,41	7,10	0,008
	Intra-grupos	116.146,97	586	198,20		
	Total	117.554,39	587			
BARRIOS DE LUNA	Inter-grupos (meses de los años secos- meses de los años húmedos)	5.985,23	1	5.985,23	10,14	0,002
	Intra-grupos	345.756,79	586	590,02		
	Total	351.742,03	587			

FUENTE: Elaboración propia.

Vemos con este ejemplo que el caudal subterráneo provoca que un déficit pluviométrico puntual se perciba repartidamente a lo largo de varios meses en las aportaciones, e incluso no se recupere, generando una larga secuencia seca. Así, las cuencas de este grupo amortiguan el inicio de la sequía pero revisten cierta inercia una vez que ésta se excava. Para el final de las sequías hidrológicas también se observa una mayor resistencia a la recuperación e incluso se engloban en una sola secuencia seca hidrológica multitud de microsequías pluviométricas muy oscilantes que tuvieron lugar a lo largo de los años 90 (Ver Figura 6.44).

FIGURA 6.44: Detalle de los IESP y IESAp de dos de las cuencas desde mediados de los 80 al final de las series.



* Fases atribuidas a la permeabilidad moderada de las cuencas numeradas en rojo.
FUENTE: Elaboración propia.

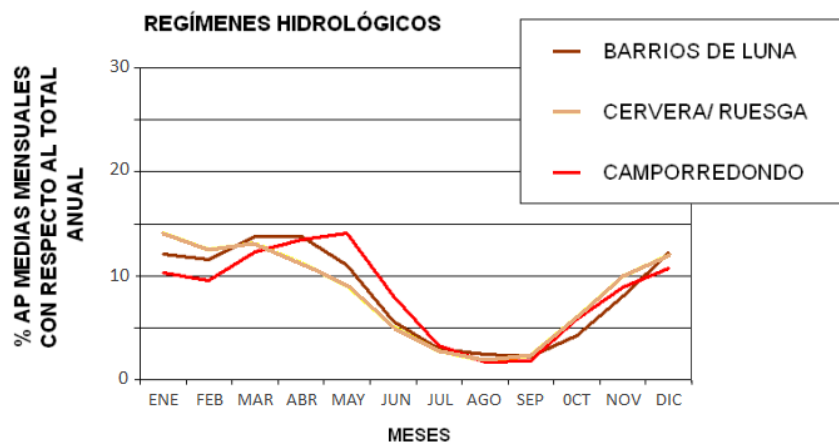
Esta respuesta es similar a lo que sucedía con las cuencas bimodales del grupo 1, pero estos casos de estudio eran mucho más permeables y sus acuíferos y manantiales mostraban mayor solvencia, de manera que sus IESAp tenían mucha más inercia y oscilaban mucho menos. Incluso en el hipotético caso de que sus sequías pluviométricas hubieran sido

semejantes a las de alguna de las cuencas del grupo 1, las cuencas del Duero norte no habrían llegado a desarrollar la bimodalidad.

Es interesante señalar que la recuperación en el invierno del 2000-01 apenas alcanzará puntualmente el valor 2 en el IESAp aunque el índice pluviométrico sea varias veces mayor y se manifieste antes; esto se debe a que, en una cuenca en escasez hídrica, el primer agua servirá para rellenar intersticios y transmitirse a través del suelo y del sustrato permeable, no llegando al aforo inmediatamente una cantidad de agua que apunte a que el déficit ha terminado, y no será hasta después de cierto tiempo- y de manera mucho más regulada- cuando se perciba el pico.

La otra cuestión relativa a estas cuencas que ha de tenerse muy en cuenta para explicar sus particulares respuestas hidrológicas a la sequía es el estudio de sus peculiares *regímenes hidrológicos*, en los que interviene la fusión nival (Ver Figura 6.45). En estos regímenes predominan los volúmenes de aportación primaveral por encima de los invernales u otoñales, que resultan mayoritarios para las precipitaciones.

FIGURA 6.45: Hidrograma medio mensual de las cuencas del GRUPO 4.
Valores expresados en porcentaje mensual con respecto a la escorrentía anual.



FUENTE: *Elaboración propia.*

La retención nival es otro mecanismo que retarda la respuesta precipitación-aportación, del mismo modo que sucede con la infiltración y la circulación subsuperficial y subterránea, y como tal, es necesario que se analice su posible intervención en la alteración del paso de la sequía pluviométrica a la hidrológica.

Es preciso entender que el retardo introducido en este caso, a diferencia del hidrogeológico, es discontinuo y solo se produce durante unos meses muy concretos cada año, específicamente de invierno a primavera, mientras la nieve permanece sólida desde que cae hasta que se funde y fluye hacia el embalse.

Así, en estas cuencas el volumen correspondiente a la aportación de la primavera proviene en gran medida de lo precipitado en forma de nieve durante el invierno, si bien en esta estación también se producen unas precipitaciones abundantes, por lo que es complicado aislar el origen preciso de las cuantías de la aportación primaveral. De acuerdo con esto, resultará también complicado identificar si una anomalía negativa en la aportación primaveral procederá de una lluvia exigua del pasado invierno o de la propia primavera en la cuenca.

Para intentar concretar el efecto de la retención nival sobre la respuesta a las sequías, primero se explorará este efecto en toda la serie y posteriormente se restringirá el análisis a las secuencias secas.

La metodología llevada a cabo para el grueso de las series desde 1957 hasta 2005 consiste en acumular las anomalías por estaciones del año- simplemente sumándolas para hallar el montante de anomalía total- tanto en las precipitaciones como en las aportaciones. Una vez calculadas se comparó cada una consigo misma entre precipitaciones y aportaciones y también cada una con la estación posterior, prestando especial atención a lo que ocurría entre la precipitación de los inviernos y la aportación de las primaveras (Ver Tabla 6.21).

TABLA 6.21: Coeficientes de Pearson entre las anomalías de precipitaciones y aportaciones de las diferentes estaciones del año separadamente.

CUENCAS	ANOM. APORTACIONES PRIMAVERALES		ANOM. APORTACIONES ESTIVALES		ANOM. APORTACIONES OTOÑALES		ANOM. APORTACIONES INVERNALES	
	P PRI. - AP PRI.	P INV. - AP PRI. (RETARDO)	P VER. - AP VER.	P PRI. - AP VER. (RETARDO)	P OTO. - AP OTO.	P VER. - AP OTO. (RETARDO)	P INV. - AP INV.	P OTO. - AP INV. (RETARDO)
CERVERA- RUESGA	0,71	0,4	0,33	0,35	0,85	-0,08	0,86	-0,06
CAMPOREDONDO	0,65	0,5	0,39	0,27	0,9	0,02	0,91	-0,10
BARRIOS DE LUNA	0,42	0,3	0,41	0,25	0,9	0,18	0,91	0,04

** Las columnas alternas muestran los valores con retardo de una estación.*

P: Precipitación, AP: Aportación, PRI: Primavera, VER: Verano, OTO: Otoño, INV: Invierno.

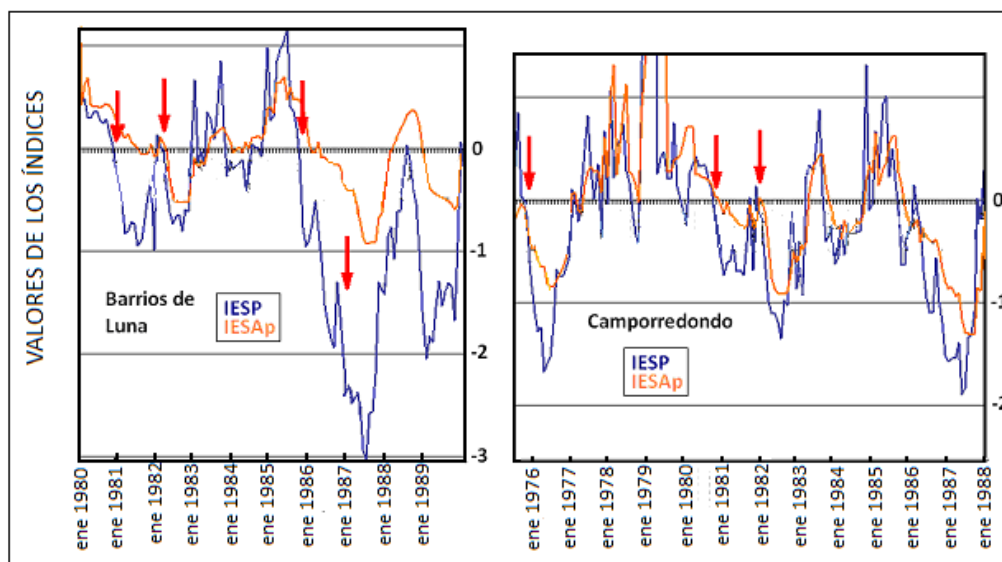
FUENTE: Elaboración propia.

Para medir el efecto del deshielo interesa lo que sucede en las aportaciones de la primavera. De las tres estaciones húmedas es, con mucho, la que menor correlación tiene consigo misma entre las anomalías de ambas variables y la que más depende de la lluvia de la estación anterior (el invierno), especialmente Camporredondo que es más nival. Como el factor hidrogeológico es más homogéneo a lo largo del año, cabe pensar que este efecto de retardo extra localizado en el invierno/ primavera puede asociarse con cierta seguridad al efecto nieve/deshielo.

Por tanto, puede afirmarse que las anomalías introducidas por un posible déficit de nieve repercuten en menores volúmenes de aportación de fusión y, consecuentemente, el índice IESAp se verá notablemente afectado por este retardo ceñido a una parte concreta del año.

Explorando lo que ocurre en las secuencias secas, se ha observado que si dentro de una sequía pluviométrica, o en el inicio de la misma, el invierno se resiente e introduce una gran anomalía, en los valores del IESAp no se nota hasta varios meses después, en el deshielo primaveral, puesto que fluye mucho menos de lo normal. En la Figura 6.46 se muestra un ejemplo de este fenómeno en dos de las cuencas, mostrando con flechas rojas algunos puntos donde el IESP desciende mucho en invierno y el descenso no se nota en el IESAp hasta después de la primavera.

FIGURA 6.46: Detalle del IESP e IESAp de dos de las cuencas del GRUPO 4.



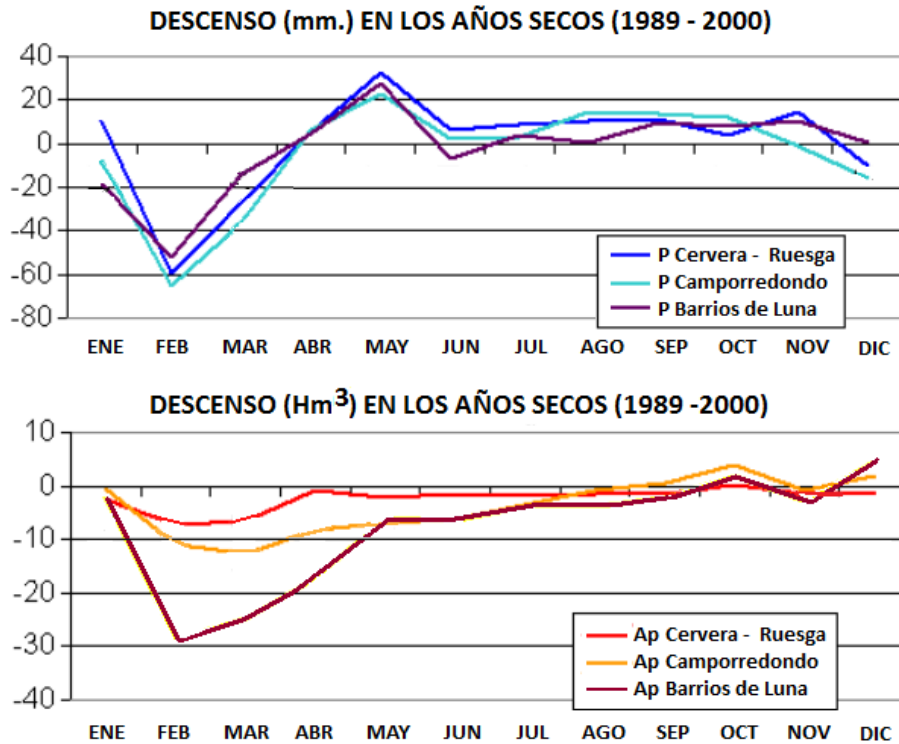
* Las flechas destacan las bajadas en el IESP en invierno que no se perciben en IESAp hasta primavera.
FUENTE: Elaboración propia.

Lo más llamativo es que se trata de un descenso que no aparece especialmente mitigado con respecto al del IESP, ni repartido a lo largo de los meses de fin del invierno y la primavera, sino un neto traslado de la intensificación de la sequía hidrológica hasta abril o mayo.

Una vez examinado lo que implica la fusión nival a lo largo de la serie, conviene evaluar si en la larga secuencia de la década de los 90 este factor interviene significativamente. Para ello se ha efectuado la comparación de las medias mensuales de los valores de precipitaciones y aportaciones entre los años catalogados como secos, desde 1989 hasta 2000, y las medias de estos meses en el resto de años de la serie.

Se aprecia como las precipitaciones aparecen muy mermadas de diciembre a marzo en los años secos, con un promedio de hasta 60 milímetros menos que en el resto de la serie, pero algo por encima de la media de mayo a noviembre. En cambio, en las aportaciones la disminución en comparación con los promedios de la serie no se ciñe a los meses invernales, sino que se prolonga hasta el verano en todas las cuencas (Ver Figura 6.47).

FIGURA 6.47: Diferencias entre las medias mensuales del periodo 1989- 2000 y las del intervalo completo de estudio.



* En el gráfico de arriba se aprecia el descenso en las medias de la precipitación con respecto a las del total de la serie, en el inferior se muestran las de aportación.
FUENTE: Elaboración propia.

Todo ello confirma la hipótesis de que una anomalía recurrente durante los inviernos, aunque se ciña a un mes, puede traer consigo una larga sequía excavada tenuemente durante muchos más meses en las aportaciones a causa del efecto del deshielo.

Ha de añadirse una última reflexión referente a la *forma de los histogramas*. Las anomalías acumuladas en la precipitación y los índices pluviométricos derivados de ellas destacan por ser asimétricos positivos y leptocúrticos (Ver Tabla 6.22). Estos valores se producen a causa de los inviernos de 1959- 60 y 2000- 01, durante los cuales cayeron más de 300 mm. mensuales, provocando un aumento progresivo de los IESP por encima de 5 en ambos.

TABLA 6.22: Asimetrías y curtosis de los IESP del GRUPO 4 en comparación con otras cuencas.

CUENCAS	ASIMETRÍA IESP	CURTOSIS IESP
BARRIOS DE LUNA	1,5	7,6
CAMPORREDONDO	1,7	7,2
CERVERA- RUESGA	2,2	8,9
MEDIA CUENCAS PILOTO	0,5	3,4
MAX. CUENCAS	3,2 (RIUD.)	16,6 (RIUD.)
MIN. CUENCAS	-1,3 (EBRO)	-0,7 (ALLOZ)

FUENTE: Elaboración propia.

Estos datos sugieren una elevada variabilidad de la precipitación en las estaciones húmedas en el área del Duero Norte, dado que aunque la pluviosidad normal ya es de por sí cuantiosa en estas cuencas, se observa la aparición eventual de episodios aislados extremos.

En cambio al evaluar estos parámetros en los histogramas de los IESAp (y las anomalías acumuladas en las aportaciones), por lo general se observa una bajada y una importante aproximación hacia la normalidad de ellos, que evidencia una mayor regularidad en los valores de esta variable (Ver Tabla 6.23).

TABLA 6.23: Asimetrías y curtosis de los IESP e IESAp del GRUPO 4.

CUENCAS	ASIMETRÍA HISTOGRAMA IESP	CURTOSIS HISTOGRAMA IESP	ASIMETRÍA HISTOGRAMA IESAp	CURTOSIS HISTOGRAMA IESAp
BARRIOS DE LUNA	1,	7,6	0,7	2,1
CAMPORREDONDO	1,7	7,2	1,9	7,7
CERVERA - RUESGA	2,2	8,9	-0,6	1,2

FUENTE: Elaboración propia.

Sin lugar a dudas los dos factores atenuantes comentados durante todo el apartado, retención nival y acuífera, son los que apoyan la moderación de los valores de las anomalías acumuladas y los IESAp.

En resumen, se trata de un grupo de cuencas cuyos rasgos físicos imponen un ligero retraso en los inicios y los finales de las sequías en la hidrología y una atenuación de los extremos con respecto a la precipitación, los cuales registran menor oscilación y menores intensidades pero mayores trayectorias temporales. Todos estos efectos son, por un lado, bastante menos apreciables que los que tendrían lugar en cuencas con un caudal base más importante y, por otro lado, bastante más perceptibles en el margen invierno- primavera, donde entran en sinergia los principales factores reguladores. Esta mezcla provoca que los efectos sobre la sequía hidrológica sean más difíciles de predecir o detectar de lo habitual, y no suele bastar con desfasar entre sí las series un determinado lapso de tiempo para que aumente la correspondencia entre las sequías pluviométricas y sequías en las aportaciones.

- **GRUPO 5. Las cuencas poco permeables de la montaña interior peninsular.**

En este grupo aparecen siete cuencas del centro peninsular: Cuerda del Pozo, El Burguillo, El Vado, Gabriel y Galán, La Toba, Palmaces y Santa Teresa. Se trata de cuencas de montaña en el interior que experimentan sequías pluviométricas algo diferentes entre sí pero que comparten ciertas características- a detallar en adelante- que las hacen aproximarse hacia comportamientos hidrológicos afines en las sequías hidrológicas.

Aun siendo de diferentes grupos por IESP, sus series entre sí muestran correlación significativa (Tabla 6.24), pues como hemos comprobado, la sequía pluviométrica es un fenómeno espacialmente poco variable.

TABLA 6.24: Correlaciones bivariadas entre las series completas de los IESP del GRUPO 5.

R DE PEARSON ENTRE LOS VALORES MENSUALES DEL IESP	CUERDA DEL POZO	EL BURGUILLO	EL VADO	GABRIEL Y GALÁN	LA TOBA	PALMACES
SANTA TERESA	0,63	0,77	0,59	0,77	0,73	0,64
CUERDA DEL POZO	-	0,52	0,80	0,64	0,70	0,76
EL BURGUILLO	-	-	0,60	0,78	0,55	0,56
EL VADO	-	-	-	0,72	0,67	0,70
GABRIEL Y GALÁN	-	-	-	-	0,66	0,55
LA TOBA	-	-	-	-	-	0,72

FUENTE: Elaboración propia.

Al evaluar el índice en las aportaciones las correlaciones apenas bajan, a pesar de que el índice hidrológico suele introducir mucha más variabilidad (Ver Tabla 6.24). Esto justifica la posición bastante unida de las siete cuencas en el dendrograma de clasificación de las mismas.

TABLA 6.25: Correlaciones bivariadas entre las series completas de los IESAP del GRUPO 5.

R DE PEARSON ENTRE LOS VALORES MENSUALES DEL IESAP	CUERDA DEL POZO	EL BURGUILLO	EL VADO	GABRIEL Y GALÁN	LA TOBA	PALMACES
SANTA TERESA	0,62	0,78	0,76	0,78	0,68	0,66
CUERDA DEL POZO	-	0,57	0,73	0,57	0,6	0,46
EL BURGUILLO	-	-	0,72	0,58	0,61	0,63
EL VADO	-	-	-	0,63	0,65	0,61
GABRIEL Y GALÁN	-	-	-	-	0,65	0,45
LA TOBA	-	-	-	-	-	0,55

FUENTE: Elaboración propia.

Además, para el índice pluviométrico, gran parte de estos casos de estudio se agrupaban con las cuencas del Duero norte detalladas en el apartado anterior, pero es la variante hidrológica la que establece una nueva reagrupación. Como en todos los casos en los

que se introduce una nueva organización, las causas de la redistribución se han de buscar en características físicas, climáticas y/o morfológicas de las cuencas que puedan separarlas de las del Duero norte.

Se trata de un grupo de cuencas no homogéneo ni en tamaño ni en forma de las mismas, pero sí comparten un par de características que suponen un comportamiento diferencial de sus sequías hidrológicas:

- En primer lugar estas cuencas comparten su carácter montañoso, que es superior a la media de los casos de estudio, sin alcanzar las cotas del grupo de las cuencas del Duero norte y sin suponer la existencia de pluvionivalidad en los regímenes hidrológicos, pero lo suficientemente alto como para imponer unas temperaturas moderadas que indican una *exigua detracción por evaporación* de volúmenes de escorrentía.
- Por otra parte se aprecia una *muy baja permeabilidad* de los sustratos de estas cuencas, siendo este el factor determinante de la conformación de este grupo. Las cuencas muestran por esta razón unos regímenes bastante contrastados, en función de un muy pobre caudal basal que impone unas fuertes diferencias entre las escorrentías de verano e invierno, enfatizando lo predeterminado por las precipitaciones.

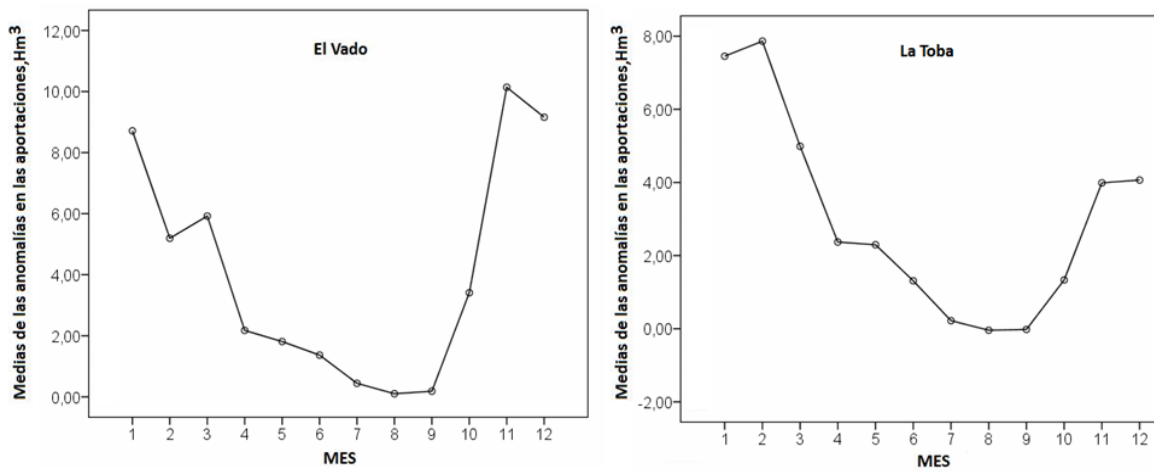
El caso excepcional para esta norma corresponde a la cuenca de La Toba, la cual posee una litología eminentemente caliza y en la Cartografía Hidrogeológica a escala 1: 1.000.000 del IGME aparece como un área de permeabilidad moderada y discontinua. No obstante se trata de una cuenca cuyo hidrograma no demuestra un importante caudal basal, y en el que se percibe un estiaje propio de áreas impermeables.

La clave se ha encontrado al revisar la documentación generada por el IGME con respecto a sus acuíferos (Montes Universales y Serranía de Cuenca) revelándose que por lo general los propios niveles piezométricos y las cotas de drenaje de los mismos suelen estar por debajo de la cuenca de La Toba, lo cual significa que la gran mayoría de las surgencias y manantiales se localizan aguas más abajo. Así, mucho del agua que se infiltra en esta cuenca

fluye hacia otras regiones más bajas de las unidades hidrogeológicas de forma que la cuenca de cabecera de La Toba es predominantemente una zona de recarga de agua al acuífero más que de salida. Esto explica que en La Toba se aprecien comportamientos similares en las sequías hidrológicas a los de las seis cuencas mucho más impermeables con las que se agrupa.

La inexistencia de un caudal base de suficiente entidad que logre homogeneizar las aportaciones a lo largo del año se confirma al observarse en las cuencas de este grupo unos regímenes hidrológicos contrastados, y al comprobar que las anomalías de las aportaciones con respecto a las medianas mensuales puedan considerarse significativamente diferentes entre unas etapas y otras del año (Ver Figura 6.48).

FIGURA 6.48: Anomalías medias mensuales en las aportaciones en Hm.³ en dos de las cuencas del GRUPO 5.



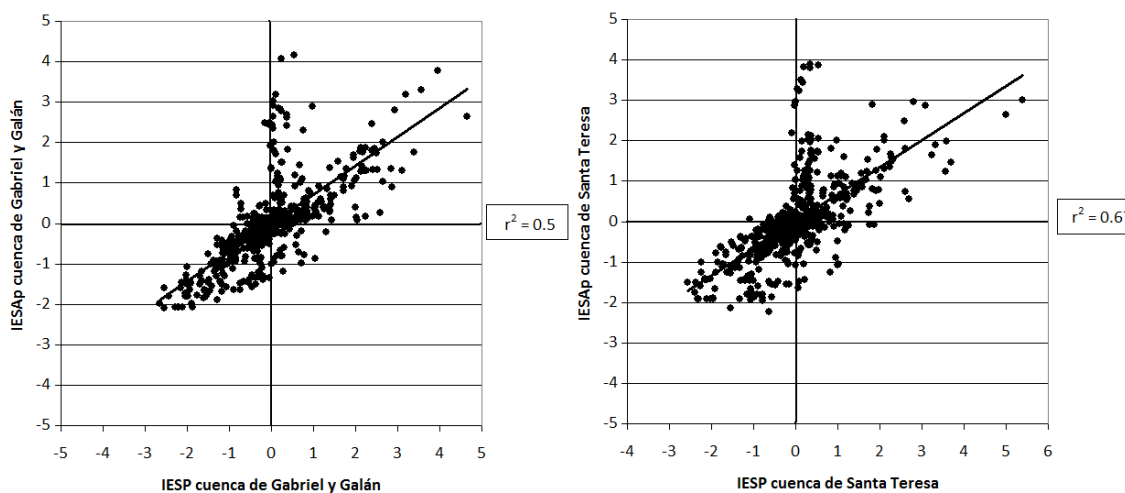
* 1= Enero; 12= Diciembre.
FUENTE: Elaboración propia.

Aunque las cuencas de este conjunto compartan impermeabilidad con las del grupo 2 (cuencas impermeables del sur) detalladas más arriba, no son tan secas como estas fundamentalmente porque no acusan una evapotranspiración tan importante. Los volúmenes detraídos por la evapotranspiración acostumbran a distorsionar la inmediatez y la evidencia del paso de precipitaciones a aportaciones, por lo que, en conclusión, *la fundamental característica de los índices de sequía hidrológica en estas cuencas es su acoplamiento casi perfecto a los índices de precipitaciones.*

Así, la conglomeración las engloba en un solo conjunto que nos sirve para identificar los casos de estudio donde no hay factores que impliquen retardos o distorsiones de la sequía hidrológica con respecto a la meteorológica.

Esto se confirma examinando los altos valores que estas cuencas arrojan en las correlaciones entre las series de sus dos índices, las cuales además se acoplan con una regresión lineal cuyos coeficientes son más cercanos a 1 que en el resto de grupos y las constantes a 0, mostrando que en cada momento ambos índices suelen tener valores muy próximos entre sí (Ver Figura 6.49).

FIGURA 6.49: Diagrama de dispersión IESP/ IESAp en dos de las cuencas del GRUPO 5.



FUENTE: Elaboración propia.

Esta hipótesis de la concordancia entre las series de sequías en ambas variables se corrobora aún más cuando se desfasan entre sí, de manera que la correlación aumenta al hacerlo un mes pero baja rápidamente si se amplían los desfases, a diferencia del resto de cuencas de estudio.

Asociado a todo esto, en las cuencas de este grupo ambos índices mantienen valores muy similares de asimetría y curtosis en sus histogramas al pasar desde el IESP al IESAp, lo cual tampoco ocurre en ningún otro conglomerado.

- **Cuencas independientes.**

Fuera de los conjuntos anteriormente descritos se hallan cinco casos de estudio dispersos por el dendrograma de clasificación de los IESAp que reflejan unas distancias con respecto a las demás cuencas lo bastante importantes como para no poder ser catalogados en ningún grupo. A lo largo de este epígrafe se detallarán sus particularidades y la cuestiones que contribuyen a que se destaquen como diferentes y no agrupables, al menos mediante los métodos estadísticos de clasificación utilizados.

Estos casos de estudio son las tres cuencas carbonatadas y permeables del Guadalquivir que se localizan en las Cordilleras Béticas: Cubillas, Bermejales y Tranco de Beas; además de la cuenca de Riudecanyes, cuya hidrología altera bastante su ya inicialmente dispar sequía pluviométrica y por último Arlanzón, un caso de estudio que presenta unas características físicas que favorecen una respuesta hidrológica a la sequía muy particular e interesante.

La clave en torno a dos de estas cuencas está en que la observación de la serie no ha mediado en la clasificación de las cuencas que iba a establecerse, pero si una vez realizada esta clasificación mediante conglomerados se analizan las gráficas de los índices hidrológicos de las cuencas independientes, puede comprobarse que Tranco de Beas y Bermejales solamente divergen en dos puntos concretos de la serie, y de hecho durante las secuencias secas registran bastante sincronización en cuanto a inicios, finales e intensidades.

Así, resulta curioso lo que ocurre si se eluden solamente cuatro años concretos: 59 y 60 en los que se inundó la cuenca del Tranco de Beas, probablemente a causa de la deforestación intensiva que tuvo lugar en la zona durante aquella época, y 97 y 98 que sucedió lo propio en Bermejales como consecuencia de dos meses de lluvias extremas. Al repetir el análisis de conglomerados sin ellos, ambas cuencas aparecen vinculadas entre sí en el dendrograma mientras que el resto de la configuración no cambia. Otra cuestión que apoya estas afirmaciones es el hecho de que las correlaciones entre las series de ambos casos de estudio, que ya eran significativas utilizando los 49 años al completo y ofrecían un moderado 0,39 de r de Pearson, suben hasta 0,6 con solo eliminar esos años.

Por ello, es útil que ambas cuencas se traten conjuntamente aunque no se hayan añadido como el sexto grupo de la clasificación por cuestiones meramente metodológicas, ya

que para su constitución es preciso una interpretación cualitativa visual.

Por otra parte, la cuenca de Cubillas, prácticamente idéntica en el índice pluviométrico a la de Tranco de Beas, evidencia un comportamiento muy diferente en el IESAp, presentando una secuencia muy larga desde 1982 hasta 1998 que se aproxima mucho más a las cuencas bimodales que a ningún otro caso de estudio; por lo tanto, esta cuenca sí que habrá de ser analizada individualmente.

De cualquier modo, estos tres casos de estudio que comparten sequía pluviométrica con el resto del sur peninsular difieren de estos últimos esencialmente porque poseen un sustrato permeable y se circunscriben en su divisoria tanto acuíferos de moderada o elevada producción como surgencias que los drenan, de modo que el caudal base de mantenimiento juega un papel importante en sus escorrentías. Este rasgo debe estar presente en sus interpretaciones, además de otros de menor incidencia que también las apartan del resto de cuencas de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

a) Bermejales y Tranco de Beas.

En primer lugar es preciso puntualizar que, tanto en la forma como en la hidrografía y orografía como en los usos del suelo, son dos cuencas bastante dispares: Tranco de Beas es muy alargada y Bermejales es muy redondeada, la primera tiene la mayor pendiente promedio de los 29 casos y es muy forestal, mientras que la segunda no destaca en estos sentidos.

En cambio, se distinguen del resto de cuencas del sur (grupo 2), localizadas en sustrato paleozoico eminentemente granítico y bastante impermeable, en su litología de predominio organoquímico, fundamentalmente calcáreo, en las que gracias a la karstificación se registra una importante permeabilidad y se identifican unidades hidrogeológicas de importante entidad catalogadas por el IGME en su inventario (IGME, 2012).

Por un lado, en la cuenca del Tranco de Beas se localiza la Unidad Hidrogeológica Prebética de Quesada- Castril. Este sistema acuífero posee una base geológica carbonatada de gran potencia que absorbe las abundantes precipitaciones que sobre él se producen debido al efecto de las barreras montañosas frente a los vientos del oeste y sur. De acuerdo con esta litología predominante, las propias aguas subterráneas incluso han labrado galerías kársticas por las cuales circulan (IGME, 2005).

Aunque en la cartografía de Hidrogeología 1:1.000.000 del IGME al grueso del acuífero de Quesada- Castril se le asigne una permeabilidad y producción moderadas de acuerdo con su litología, numerosos estudios certifican que las cotas de recarga del mismo están muy por encima de los afloramientos de máxima permeabilidad de la formación (Luque Espinar, J. y Cobos Fernández, J., 2002), lo cual indica que las capas a techo de estas que son más impermeables también logran recargarse de aguas subterráneas y alimentar a la macrounidad. Por tanto, se trata de un acuífero de bastante entidad e importantes descargas a través de las surgencias que se identifican en la cartografía; en contrapartida, en estos mismos estudios se contempla la posibilidad de que el área de la cuenca de Tranco de Beas, que es una zona de importante recarga, transfiera recursos subterráneos hacia otras formaciones que se encuentran fuera de su divisoria e incluso fuera de los límites del acuífero de Quesada- Castril.

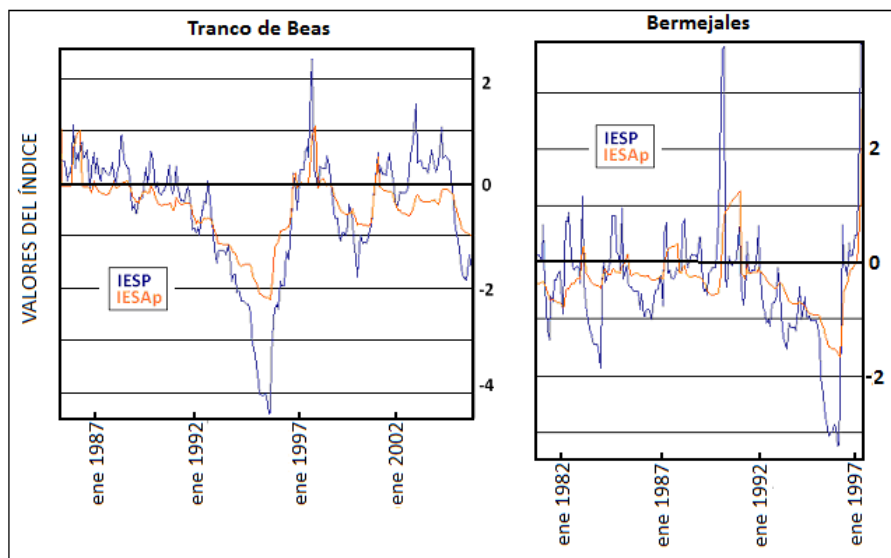
En la cuenca de Bermejales, por su parte, se localiza la sección norte de los acuíferos Alpujárrides de Tejeda- Almirajara- Las Guájaras, los cuales presentan litologías predominantemente marmóreas y calizo-dolomíticas cuya producción también es moderada/alta. Su recarga procede de la infiltración directa de las precipitaciones y en cuanto a ella sí puede considerarse un sistema más cerrado; por otro lado, la descarga se produce a través de las fuentes y tiene lugar en régimen natural porque hay poca extracción de agua en el área. Resulta interesante que, a diferencia de lo que suele suceder típicamente en los acuíferos kársticos, la descarga es muy lenta, autorregulada y amortigua bien las escorrentías, fundamentalmente previene contra un estiaje muy severo (Diputación Provincial de Granada e IGME, 1990).

Por consiguiente, para la interpretación de lo que sucede en estas cuencas piloto hay que contar con el papel regulador de las aguas subterráneas, si bien éste no será tan importante en la escorrentía que finalmente llega al aforo como el que juegan los acuíferos de otras áreas (p. e. las cuencas de histogramas bimodales del grupo 1). No obstante, les sirve para diferenciarse mucho en sus IESAp del resto de cuencas del sur peninsular (grupo 2: Gasset, El Pintado, Guadalmellato y Torre del Águila), de ahí que, pese a compartir comportamientos similares en sus sequías pluviométricas, no puedan agruparse conjuntamente con ellas.

Así, observando las gráficas de los índices de sequía hidrológica, se aprecia que en estas dos cuencas anómalas andaluzas se excavan progresivamente y a ritmos bastante constantes y

se recuperan del mismo modo aunque más rápidamente, acusando en ambos momentos un perceptible retardo con respecto a la variabilidad pluviométrica. Relacionada con estas características, los índices hidrológicos de estas dos cuencas poseen otra cualidad muy interesante que tampoco se identifica en el resto de cuencas del sur y que consiste en la amortiguación de la oscilación del índice pluviométrico durante las secuencias secas, de manera que en estos casos el IESAp se asemeja a lo que podría ser una línea de medias móviles del IESP, de ahí que también los mínimos muestren una intensidad menor pero una punta roma que indica que se mantienen más meses que en la lluvia. Esto hace al índice hidrológico más previsible, dado que tanto al excavar como al recuperarse mantiene una tasa bastante constante a pesar de la irregularidad que le impone la pluviometría (Ver Figura 6.50).

FIGURA 6.50: Detalle de las series donde se aprecia la suavización que el IESAp impone sobre la oscilación constante del IESP.



FUENTE: *Elaboración propia.*

Relacionado con todo esto está también la asimetría y la curtosis de los histogramas de los índices, que en el grupo 2 aumentaban significativamente al pasar al índice hidrológico. En cambio, en estas dos cuencas, los caudales están más regulados y por ello las anomalías a lo largo de los meses no son tan variables. En consecuencia, los extremos se reparten mejor a lo largo de los meses y no son tan exagerados, implicando una regularidad mayor en los valores de las anomalías acumuladas que necesariamente se refleja en el histograma.

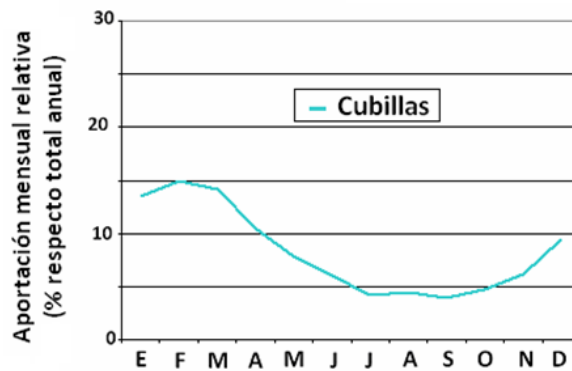
Así, la curtosis y la asimetría son bastante altas porque la precipitación de por si lo es, pero el incremento en estos parámetros desde el índice pluviométrico al hidrológico es muy inferior al del grupo 2.

b) Cubillas.

Se trata de un caso de estudio que *a priori* no sobresale por ninguna característica morfométrica o paisajística en particular.

Hidrogeológicamente podría parecer similar a los dos casos anteriores pero se distingue de ellos por la existencia de una fuente de importante caudal que drena una de las cinco unidades hidrogeológicas que se solapan en este caso de estudio, la cual se encuentra prácticamente sobre el cauce del río Cubillas, a mitad de la cuenca. Esta fuente es conocida como el manantial de Deifontes y supone tanta importancia en el régimen hidrológico que el rango de oscilación intermensual de la cuenca de Cubillas es mínimo y en absoluto comparable al resto de cuencas del sur peninsular (Ver Figura 6.51).

FIGURA 6.51: Hidrograma mensual de la cuenca de Cubillas.



FUENTE: Elaboración propia.

Según el test de comparación de medias ANOVA de un factor, las anomalías en las aportaciones de Cubillas no son significativamente diferentes por meses bajo un nivel de 0,01,

y en las cuencas del sur esto siempre lo es para las escorrentías, lo cual corrobora que el caudal basal procedente fundamentalmente de esta fuente las logra regular de manera muy eficaz.

La surgencia de Deifontes es la alimentación fundamental del río Cubillas y registra unas salidas de 30 Hm.³ de promedio anual que suponen la mitad de la escorrentía medida como entrada al embalse, si bien hay que tener en cuenta que la fuente se encuentra aún a 20 km. de éste y se han de contemplar las evidentes detracciones por infiltración y evaporación (Agencia Andaluza del Agua e IGME, 2010; Diputación Provincial de Granada e IGME, 2006). Esta fuente es la salida natural fundamental del acuífero de Sierra Arana, un anticlinal cuyo núcleo está compuesto por litología calcárea muy permeable y de eje NE- SW, dirección en la que circulan los flujos fundamentales de la unidad hidrogeológica que acaban confluyendo en el punto donde se localiza esta fuente.

Al igual que sucedía en el grupo de cuencas de histogramas bimodales, se trata de una aportación que resulta fundamental en el montante total del agua que llega al embalse por medio del cauce del Cubillas, de manera que si el acuífero se resiente, el resto de la aportación que llega al aforo no es suficiente para que se alcance una cantidad que pueda considerarse por encima de los valores normales.

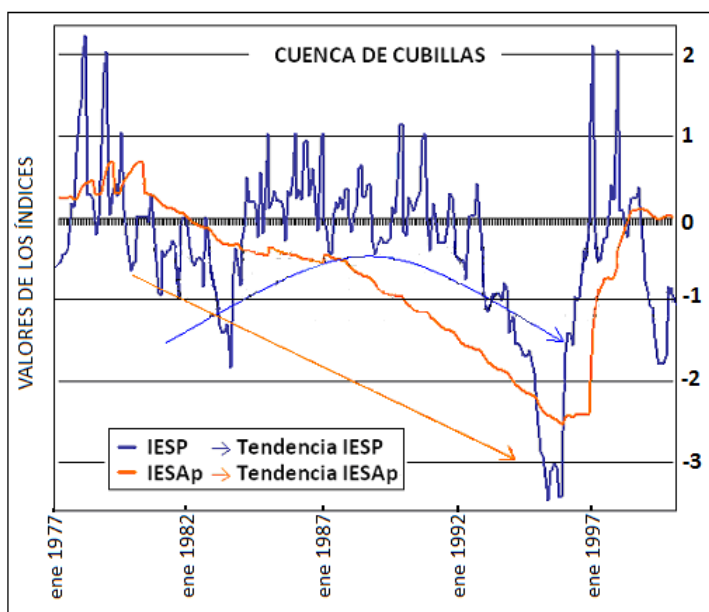
Así, si una sequía pluviométrica fuerte y/o prolongada agota el acuífero de Sierra Arana, los efectos de dicho agotamiento se extienden hasta que la lenta recarga por infiltración de la lluvia consiga devolver los niveles piezométricos previos a ella y para ello es necesario que se prolonguen mucho en el tiempo las condiciones de excedente pluviométrico.

En la cuenca hasta el año 1979 se vivieron unas condiciones muy húmedas que mantuvieron el caudal subterráneo y superficial en unos valores muy altos durante varias décadas, pero a partir de los 80 comenzó a registrarse una larga etapa de valores de lluvia muy por debajo de lo habitual y esto, a medida que avanzaban los meses, repercutió en la reducción de la escorrentía, primero levemente y afectando fundamentalmente a la aportación superficial y, una vez mermado considerablemente el acuífero a mitad de la década, con mayor intensidad por el evidente descenso del caudal basal.

Aunque la precipitación se reestablezca, aún se perciben oscilaciones ocasionales bajo el 0 del IESP durante dos décadas, por lo que el acuífero no logra remontar y su fuente sigue descargando por debajo de la normalidad, excavándose la sequía en el IESAp durante catorce

años de la serie (Ver Figura 6.52).

FIGURA 6.52: Secuencias secas en IESP e IESAp en la cuenca de Cubillas y sus principales diferencias en cuanto a tendencias a lo largo de la serie.



FUENTE: *Elaboración propia.*

La precipitación durante esos catorce años solamente aparece como sistemática y significativamente más baja durante los meses de marzo, julio y diciembre, pero en las aportaciones los 12 meses sí lo son⁶, de ahí que la sequía hidrológica se vaya excavando suavemente mientras la pluviométrica oscila.

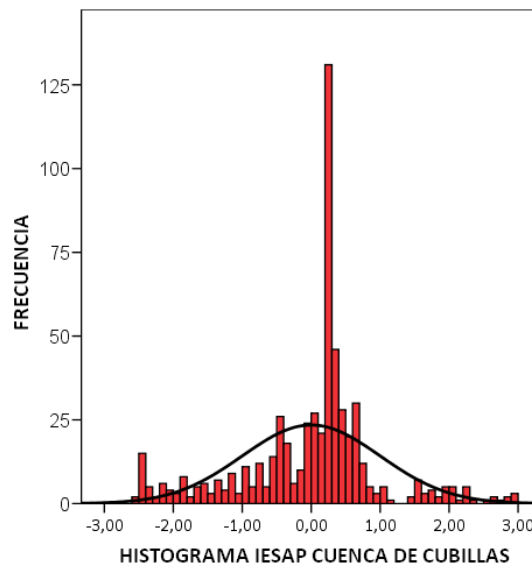
La explicación de que únicamente tres meses de un año traigan consigo una disminución de los caudales durante el año completo se encuentra en que tanto marzo como diciembre son meses de importante peso, con lo que las anomalías negativas pueden ser bastante influyentes y acarrear una gran disminución del agua disponible en el acuífero y en la propia cuenca.

Este caso de estudio se aproxima bastante a los examinados en el grupo 1 (cuencas de

⁶ Para comparar qué sucede entre los años de la gran sequía hidrológica y los demás de la serie, se han realizado pruebas no paramétricas de comparación por meses de Mann-Whitney y Kolmogorov-Smirnov.

histogramas bimodales), y solamente el hecho de que se aprecie una rápida recuperación de los caudales asociada a unas lluvias excepcionales en 1997 evita que el histograma se ajuste a los patrones de esta clase (Ver Figura 6.53).

FIGURA 6.53: Histograma de la serie completa de IESAp en la Cuenca de Cubillas.



FUENTE: *Elaboración propia.*

La existencia de un caso como el de Cubillas evidencia que, incluso bajo condiciones de lluvia muy diferentes, las cuencas que muestran un importante porcentaje de sus aportaciones procedente de una o varias surgencias tienden a atenuar y prolongar mucho las secuencias hidrológicas secas, apareciendo la mitad de la serie como anormalmente húmeda y la otra como inusualmente seca y mostrando unos histogramas del IESAP muy tendentes a la bimodalidad.

Por otra parte, este caso confirma que resulta muy sencillo identificar con la simple observación de las gráficas de los IESAP y de sus histogramas a aquellas cuencas que no solo son permeables sino cuyas descargas totales dependen de una o varias fuentes y, al contrario, se puede prever con precisión la forma de estos gráficos a partir del conocimiento a fondo de las características hidrogeológicas de las cuencas.

c) Arlanzón.

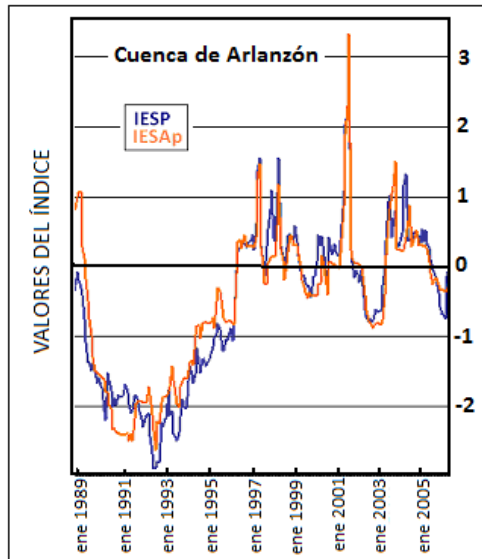
La cuenca de Arlanzón es un caso de estudio que permite corroborar algunas explicaciones desarrolladas previamente, ya que de acuerdo con su pluviometría debería poder acogerse al mismo grupo que otras cuencas del cuadrante nororiental como Linares del Arroyo o La Peña, con las que comparte las gráficas de los IESP, pero se configura como cuenca independiente debido a sus características hidrológicas, muy apartadas de estos casos de estudio.

Como rasgo distintivo, se aprecia que los ritmos y las intensidades van absolutamente acordes en ambos índices de sequía.

La explicación se encuentra fundamentalmente en que Arlanzón es de los casos de estudio más impermeables; según la cobertura de Hidrogeología a escala 1: 1.000.000 (IGME, 2012), la litología de la cuenca es metamórfica, predominando micaesquitos, filitas, pizarras, cuarcitas, grauvacas, y gneises, siendo todas ellas formaciones de muy baja permeabilidad. Casualmente, todas las cuencas que comparten sequía pluviométrica con esta cuenca están asentadas sobre sustratos permeables, de ahí que se separe.

Además, esta nula permeabilidad se une a una reducida evapotranspiración en función de una latitud y altitud muy por encima de la media de las cuencas de estudio, de manera que no hay factores que introduzcan distorsiones en la inmediatez de las respuestas a la precipitación. Tampoco es un área en la que se registren volúmenes de fusión primaverales significativos. Por último, se trata de una cuenca muy pequeña y hay poca posibilidad de pérdidas o retardos hidrológicos de cualquier clase, por lo que existe un acoplamiento perfecto de las oscilaciones y los valores de los indicadores de ambas variedades de sequía, sin existir apenas diferenciación temporal (Ver Figura 6.54).

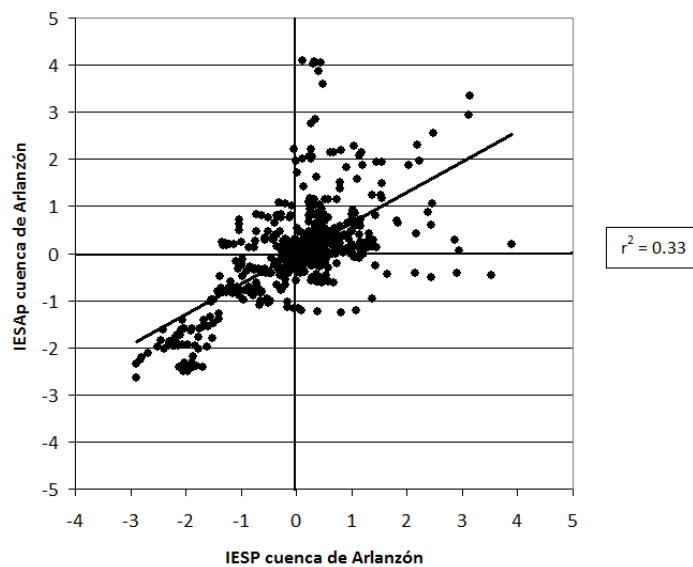
FIGURA 6.54: Detalle de las sequías de la segunda mitad de la serie en la cuenca de Arlanzón.



FUENTE: Elaboración propia.

Este acoplamiento temporal casi total de ambas series devuelve un r de Pearson de 0,65 y tiene la particularidad de ajustar a una recta de regresión con pendiente próxima a 1, lo que significa que registran valores de intensidad similares (Ver Figura 6.55).

FIGURA 6.55: Diagrama de dispersión entre las series completas de IESP e IESAp de la cuenca de Arlanzón.



FUENTE: Elaboración propia.

Todas estas apreciaciones aproximarían a la cuenca al grupo 5 de casos de estudio, donde las respuestas hidrológicas a las sequías son también inmediatas; sin embargo, la sequía pluviométrica de la que parte Arlanzón es demasiado distinta a las que sufrieron las cuencas de dicho grupo y entonces la variedad hidrológica, completamente acoplada, también resulta muy diferente y por eso el software estadístico es incapaz de percibir el parecido y agruparlas.

Así, mediante la interpretación puede confirmarse que las cuencas impermeables de montaña del interior peninsular que no muestren una importante retención nival reflejan un comportamiento común, característico y fácilmente inidentificable en cuanto a sus sequías hidrológicas y este consiste en la reproducción fidedigna de lo que acontece en la variedad pluviométrica del fenómeno.

d) Riudecanyes.

Este caso de estudio es muy interesante porque una vez más confirma algunas afirmaciones expuestas a lo largo de todo el epígrafe, ya que pese a destacarse como cuenca independiente se observa en ella una respuesta hidrológica a la sequía que tiene algunas similitudes con otras cuencas y grupos. Es preciso profundizar en qué cuestiones la unen y cuales la separan del resto de casos de estudio y a qué se deben.

En primer lugar se trata de una cuenca que destaca por ser bastante pequeña, apenas montañosa por su baja altitud promedio y mediana pendiente, y morfológicamente poco compacta ni redondeada, lo cual la lleva a ser escasamente torrencial y de escorrentía bastante regular a pesar de su reducido tamaño.

Con relación a su geografía es destacable el hecho de que se encuentre bastante separada del resto de cuencas que han podido ser utilizadas para este estudio. No cabe duda de que esta condición de caso de estudio espacialmente más aislado no sería tan importante si no correspondiese a un contexto geográfico tan diferente de los que representan el resto de cuencas como es la Cordillera Costera Catalana, al pie del Mar Mediterráneo.

Como ha podido comprobarse a lo largo del estudio, esta ubicación la sitúa en un ámbito climático que difícilmente puede compararse al de ninguna otra, ya que no solo el régimen pluviométrico es distinto a la gran mayoría del resto y responde a la clásica tipología de máximos en otoño de la vertiente mediterránea oriental, sino que las correlaciones de la

precipitación de sus 588 meses de estudio arroja valores bajos con los de todas las demás cuencas. Al evaluar el índice pluviométrico sucede algo similar: es la única cuenca que no posee ningún vínculo con otro caso de estudio por encima del 0,5 de r de Pearson si se analizan los 588 valores mensuales del IESP.

Esto refleja que la propia precipitación y su sequía asociada hacen de Riudecanyes una cuenca especial desde el origen y no hay más que comprobar su diferencia con respecto a las demás mediante la observación de la grafía de su IESP para corroborarlo. En ella se observa un índice muy oscilante en todos los sentidos, ya que no solamente no dibuja una amplia sequía que en ningún momento sobrepase los 24 meses aunque aparezcan 11 pequeñas secuencias por encima del año de duración, sino que los propios máximos y mínimos son puntuales y no se sostienen, además de coincidir bastante poco con los del resto de las cuencas de estudio.

Además, el índice de sequía pluviométrica posee la mayor asimetría y curtosis de entre todas las 29 cuencas. La causa de estas medidas tan inusitadas puede atribuirse a la existencia de lluvias torrenciales asociadas a la DANA en los septiembres de 1972 y 1992, registradas puntualmente en la provincia de Tarragona (AEMET, 2012) y precedidas por veranos húmedos; todo ello provoca una brusca acumulación de anomalía pluviométrica positiva que desestabiliza el histograma.

Ahora bien, la respuesta hidrológica de esta cuenca tiende a suavizar en parte las singularidades tan importantes que introduce la precipitación y dibuja unos regímenes de escorrentía mensuales similares pero poco contrastados estacionalmente, con unos veranos no tan secos en parte porque el mínimo pluviométrico se ciñe prácticamente a julio, y también en parte también debido a que se observa la actuación de un caudal base que pone en circulación durante estos meses un total de agua mayor del que realmente precipita en la cuenca.

Esta escorrentía subterránea se explica por la existencia de un estrato permeable en la cabecera de la cuenca sobre el resto de materiales impermeables. Estos niveles permeables superiores son capas carbonatadas con poco buzamiento, de modo que se trata de un acuífero colgado local; de hecho, el IGME las cataloga en la Memoria de la Hoja 472 de la serie MAGNA (IGME, 1980) como una zona poco investigada en este sentido y en la que se espera una porosidad secundaria (por fracturación) de cierta importancia y una producción moderada, a pesar de que debido a su pequeña superficie no haya sido catalogado en el inventario de

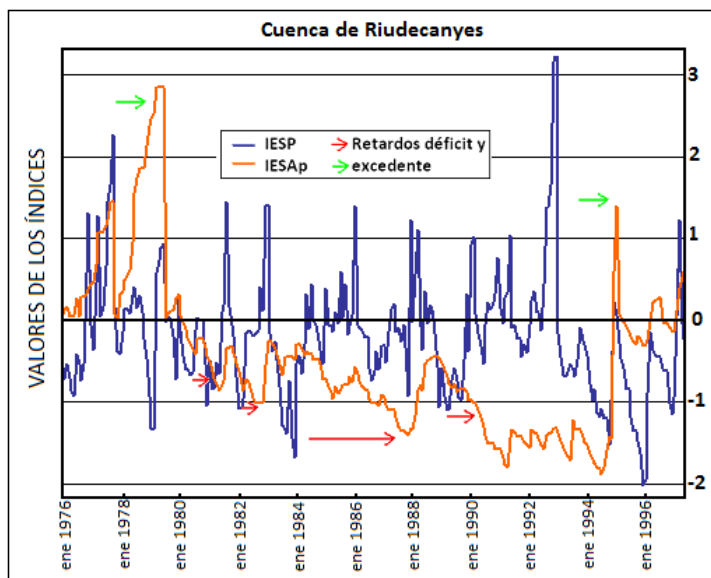
unidades hidrogeológicas del Sistema Integrado del Agua.

Por lo tanto a la cuenca de Riudecanyes se la puede clasificar entre las que revisten una cierta autorregulación en sus escorrentías y por ello se comporta de manera bastante similar a otras cuencas del mismo tipo: por un lado atenúa máximos tan importantes como estos que se han señalado en 1972 y 1992 hasta el punto de que no se noten sustancialmente hasta mucho después, por otro lado las sequías hidrológicas se acaban excavando con retraso cuando transcurren varias secuencias secas oscilantes en el IESP.

Como mejor ejemplo de este último fenómeno puede servir el caso de la secuencia seca más larga que aparece en la serie de las aportaciones, que abarca diez años durante los cuales la precipitación oscila entre excedentes puntuales y déficits largos, lo cual conduce al agotamiento lento y gradual del acuífero por disminución de la recarga.

Esta sequía dura hasta final de 1994, momento en el que varios máximos pluviométricos consecutivos acaban por notarse retardadamente en las escorrentías, una vez que propician que se recupere una situación de normalidad piezométrica en el acuífero (Ver Figura 6.56).

FIGURA 6.56: Detalle de IESP e IESAp de la cuenca de Riudecanyes durante los años más secos.



FUENTE: Elaboración propia.

Así, la intensa oscilación del IESP durante las secuencias secas en esta cuenca se ve muy atenuada por el índice IESAp, siendo este último semejante a una suave y amplia onda que une los mínimos de dicha fluctuación del índice pluviométrico.

En conclusión, esta explicación del comportamiento de la sequía hidrológica conduce a pensar que lo que se observa en este caso de estudio no difiere significativamente de lo que se concluyó más arriba en otras cuencas de cierta permeabilidad como por ejemplo Bermejales o Cervera- Ruesga, por lo que se puede confirmar que la disparidad de Riudecanyes viene introducida fundamentalmente por su muy singular sequía pluviométrica y no porque posea una respuesta hidrológica distintiva que la separe de los grupos establecidos.

6.5. SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS Y REFLEXIONES.

6.5.1. Singularidades de la sequía hidrológica.

Una vez finalizados los análisis, resulta conveniente realizar un resumen de los resultados obtenidos con respecto a la sequía hidrológica, especialmente aquéllos que resalten su diferenciación con la variedad pluviométrica del fenómeno.

- *Sobre las relaciones con la sequía pluviométrica.*
- En cuanto a la conexión de las series del IESAp con las de la sequía pluviométrica que las genera, se aprecia en la gran mayoría de los casos de estudio una tendencia hacia vinculaciones mucho menores que las que aparecían entre las dos variables originales mensuales- precipitación y aportación- en la cuenca. Las cuencas más impermeables y las que presentan parámetros morfométricos que indican una evacuación más inmediata del 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.

- Profundizando en el fenómeno del retardo en las respuestas al pasar del índice pluviométrico al hidrológico, se encuentra que 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 y que analizando lo que sucede en la pluviometría puede anticiparse lo que ha de ocurrir con el recurso fluyente. El desfase es más perceptible al inicio y al final de las secuencias secas, aunque los picos de sequía a menudo también se encuentran retardados.
 - *Sobre la homogeneidad territorial de la sequía.*

- Las sequías hidrológicas son territorialmente más variables que las sequías pluviométricas.

- Las correlaciones entre las series del IESAp de todas las cuencas divergen hacia valores muy altos o muy bajos, en comparación con los del IESP. En general, el grueso de las cuencas muestra unas correlaciones no significativas y en un gran número de casos incluso negativas; en cambio, aparecen las cuencas de gran entidad hidrogeológica e histogramas bimodales, entre las cuales las correlaciones son muy elevadas, mucho más de lo que lo eran para el índice pluviométrico.

- Además, las mayores divergencias entre las cuencas ocurren en las secuencias secas más importantes, en los déficits más agudos, excepto en el tramo de 1990 hasta 1994, que fue bastante generalizado y sincrónico en los casos de estudio.
 - *Sobre el número de secuencias secas que aparecen en las series.*

En general, aparecen menos secuencias secas severas 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.

- *Sobre las intensidades de la sequía hidrológica.*

- Los momentos de mayor intensidad de sequía hidrológica se agrupan en la gran mayoría de las cuencas mucho más hacia el final de la serie, especialmente en torno a los últimos diez años, lo cual corrobora que es un fenómeno que tiende a demorar y acumular lo que ocurre en la sequía pluviométrica.
- Además, estas máximas intensidades de cada serie en la sequía hidrológica son en la mitad norte superiores a las de la mitad sur. Pese a ello, vuelve a apreciarse que no existe un patrón de homogeneidad territorial absoluto, cada cuenca impone sus matices en función de sus características específicas.

- *Sobre el carácter persistente de la sequía hidrológica.*

- 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. El *Libro Blanco del Agua*, al no considerar la acumulación de las circunstancias previas en la formulación de los índices que aplica, solo analiza 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 esta complejidad.

- La sequía pluviométrica es más variable que la hidrológica, la cual dibuja ritmos y ondas 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.
 - *Sobre la interpretación de la forma de los histogramas de las series del IESAp.*
- Los valores de los parámetros de forma de los histogramas de los IESAp (la asimetría y la curtosis) están más vinculados entre sí que los de las series de los índices pluviométricos y, además, su interpretación y su justificación es asociable de manera sencilla a las circunstancias hidrológicas que envuelven a cada una de ellas. La sola observación del histograma de la serie permite extraer signos de cómo es la cuenca, y al contrario, es posible predecir cómo evolucionará la sequía hidrológica y como serán sus gráficas e histogramas asociados a partir del análisis de sus características.
- Las asimetrías y curtosis altas se relacionan con cuencas de regímenes hidrológicos contrastados, con una marcada aridez estival, normalmente de cuencas poco permeables de montaña media, donde la recarga y descarga de los acuíferos es escasa. En estas cuencas se reproducen muchas secuencias secas cortas, de baja intensidad y duración y por lo general sincronizadas con las de las precipitaciones. En ellas, la escorrentía introduce más irregularidad a nivel mensual de la que impone la propia lluvia, y esto se refleja en la forma de manifestarse la sequía hidrológica.

A la hora del cálculo del índice, las medianas mensuales son bastante bajas- dadas las frecuentes condiciones de poco caudal- pero se producen ocasionalmente unas anomalías positivas muy abundantes en épocas húmedas; al acumularlas, el montante resulta ya tan grande en sí mismo que impulsa la media y la desviación típica hacia valores muy altos. Por ello, al estandarizar, gran parte de la serie muestra valores

IESAp negativos y muy próximos a 0, disparando la curtosis y la asimetría. Hay muchos, muy similares y muy correlativos porque al ser lo habitual que las anomalías mensuales sean insignificantes, cuando se acumulan apenas se percibe el incremento.

- Por el contrario, las series de IESAp con valores bajos o negativos de asimetría y curtosis son bimodales o tendentes a ello y manifiestan un caudal muy regulado, siempre gracias a una o varias surgencias de cuyo mantenimiento depende la hidrología de la cuenca. Estos casos poseen pocas y largas secuencias y en su seno se engloban multitud de secuencias pluviométricas.

La explicación se encuentra en que el flujo subterráneo mantiene una cierta inercia y amortigua los inicios de las secuencias secas si estas no son fuertes y largas y si el acuífero se encuentra saturado, pero condiciona que el volumen de escorrentía circulante en la cuenca sea muy inferior a lo normal durante años cuando ya está agotado -pues la recarga es lenta- incluso si la lluvia se ha reestablecido. De este modo, aparece una de las situaciones como extraordinariamente húmeda y otra como excepcionalmente seca: las dos subdistribuciones del histograma bimodal.

- Lógicamente, entre estos dos extremos oscilan todas las situaciones intermedias estudiadas.

- *Sobre la posibilidad de establecer una tipología de cuencas de acuerdo con su sequía hidrológica.*

- Se ha demostrado la posibilidad de agrupar la cuencas según el comportamiento de su sequía hidrológica y también que éste es atribuible a cuestiones que han podido ser identificadas e interpretadas. Lo realmente útil e interesante de la tipología establecida es que las correlaciones con el índice pluviométrico, la forma de los histogramas, los retardos, los parámetros relativos a las secuencias secas (intensidad, duración, número, etc.) y todos los demás rasgos que han sido analizados a lo largo del trabajo por considerarse de interés en el estudio de la sequía hidrológica, tienen bastante homogeneidad y singularidad dentro de cada grupo.

- Cualquier nueva cuenca a estudiar podría ajustarse a alguna de las clases identificadas, ya que la clasificación está ideada para trascender los 29 casos de estudio y ser aplicable a otros ejemplos que reúnan las mismas condiciones y características. No obstante, se ha comprobado que las posibles combinaciones y mezclas de los elementos que influyen en la respuesta hidrológica a la sequía son múltiples y, pese a nuestro intento de abarcar la mayor variedad, cabe la posibilidad de que existan más clases; sin embargo, con la metodología de análisis desarrollada y las cuestiones ya aprendidas, a partir de este trabajo sería sencillo determinar cómo sería la sequía hidrológica de una cuenca solo conociendo sus características fundamentales, aunque no pudiera asignarse a un grupo de los descritos.

Un resumen sistematizado de la tipología de cuencas según la respuesta hidrológica y de las cuestiones más relevantes sobre ella puede verse en la Tabla 6.26.

TABLA 6.26: Síntesis sobre la tipología de cuencas según su respuesta hidrológica a la sequía.

TIPO	EJEMPLOS AGRUPABLES EN ESTA CLASE	CÁLCULO DEL IESAp EN ESTAS CUENCAS	SIGNOS DISTINTIVOS IDENTIFICABLES EN LAS GRÁFICAS DEL IESAp	Nº DE SEQUÍAS IESAp	INTENSIDAD DE LAS SEQUÍAS IESAp	DURACIÓN DE LAS SEQUÍAS IESAp	RETARDOS CON RESPECTO A IESP	HISTOGRAMA DEL IESAp
Cuencas de elevado potencial hidrogeológico y gran densidad de surgencias activas.	Linares del Arroyo, Alloz, Ebro, La Peña, Entrepeñas, Fuensanta, Talave y Burgomillodo (GRUPO 1). Cubillas también se ajusta.	Cae menos lluvia desde un determinado punto en meses importantes para el relleno hidrogeológico. La hidrología se resiente, sobre todo en meses que implantaban las anomalías más elevadas, como los primaverales. El acuífero y las fuentes se agotan y la escorrentía no remonta.	Se identifican una o pocas secuencias secas que se excavan suavemente y que engloban a muchas de las secuencias secas en la precipitación.	Reducido.	Moderada/alta.	Muy largas.	Tanto al inicio de la secuencia seca como en los ritmos como entre los máximos de sequía se aprecia un retardo de un par de meses.	Bimodales o tendentes a ello.
Cuencas levemente permeables de entornos muy áridos.	La Cierva y Alfonso XIII (GRUPO 3).	La mayoría de las aportaciones y las medianas que se registran son bajas aunque más regulares que en cuencas impermeables; si bien se alcanzan esporádicamente valores extremos de caudal, que aunque se distribuyen a lo largo de unos pocos meses consecutivos, logran subir mucho la media y la desv. tip. de la distribución de las anomalías acumuladas. Esto genera multitud de valores negativos y próximos a 0.	Aparecen muchas secuencias secas que se excavan levemente. En ellas se aprecia amortiguación producida por el caudal basal tras una etapa húmeda cuando el acuífero aún no está agotado.	Elevado.	Moderada.	Baja/media.	De escasa importancia, la humedad no se mantiene eficazmente mes tras mes en la cuenca, sobre todo en etapas de mucho déficit. Este es un rasgo distintivo fundamental.	Muy asimétricos y leptocúrticos.
Cuencas no permeables de montaña media del sur peninsular. Fuerte evapot.	El Pintado, Guadalme., Torre del Águila y Gasset (GRUPO 2).	La mayoría de las aportaciones que se registran son escasas, y por ello las medianas de las series también lo son; pero se alcanzan puntualmente valores extremos de caudal- propiciados por la impermeabilidad- que suben mucho la media y la desv. tip. de la distribución de las anomalías acumuladas. Así, cualquier anomalía negativa se marca como sequía leve.	Se reconocen muchas secuencias secas de poca intensidad y de desarrollo paralelo al eje temporal, por la exigüidad de las anomalías que se van acumulando.	Elevado.	Reducida.	Baja/ media Las más severas duran igual que en el IESP.	Son más leves que en otros tipos pero también aparecen.	Muy asimétricos y leptocúrticos.

TIPO	EJEMPLOS AGRUPABLES EN ESTA CLASE	CÁLCULO DEL IESAp EN ESTAS CUENCAS	SIGNOS DISTINTIVOS IDENTIFICABLES EN LAS GRÁFICAS DEL IESAp	Nº DE SEQUÍAS IESAp	INTENSIDAD DE LAS SEQUÍAS IESAp	DURACIÓN DE LAS SEQUÍAS IESAp	RETARDOS CON RESPECTO A IESP	HISTOGRAMA DEL IESAp
Cuencas moderadamente permeables del sur y el mediterráneo peninsular.	Bermejales y Tranco de Beas. La cuenca de Riudecanyes al ser interpretada presentó rasgos que la ubican en esta clase de respuesta hidrológica a la sequía.	Los caudales son moderados y regulados, pese a la sequía estival, por lo que las anomalías son bastante regulares, y por ende sus acumulaciones también. El sistema cuenca reparte el exceso o el déficit de humedad en el tiempo, de manera que el índice fluctúa poco, sus valores son progresivos, pero sin tanta inercia como en las cuencas de mayor importancia hidrogeológica.	Los IESAp atenúan la oscilación del IESP durante las secuencias secas- el IESAp se asemeja a una línea de medias móviles del IESP- y los mínimos muestran una intensidad menor pero una punta roma que indica que se mantienen más que en la lluvia.	Moderado /alto.	Moderada Algo menor que el IESP.	Media. Algo superior al IESP del que se derive porque tiende a aunar varias sequías si son seguidas.	Muy perceptible. Tanto al inicio y final de la secuencia seca como en los ritmos como entre los máximos de sequía.	Asimetría y curtosis positivas pero moderadas.
Cuencas no permeables del interior peninsular. Evapotranspiración moderada o baja.	Cuerda del Pozo, El Burguillo, El Vado, Gabriel y Galán, La Toba, Palmaces y Santa Teresa (GRUPO 5). Al interpretar comprobamos que Arlanzón cumple con estos patrones.	Los caudales son estrictamente proporcionales a la lluvia del propio mes, con poca detracción y distorsión, de forma que el cálculo del IESAp no introduce ninguna diferencia con respecto al IESP.	Como rasgo distintivo se aprecia que las gráficas del IESAp e IESP están muy acopladas, incluso en las sequías. El IESAp es tan oscilante como el IESP. No hay divergencias IESP/ IESAp.	Tanto como el IESP, suele ser elevado porque oscila mucho.	Alta, tanto como el IESP.	Tanto como duren en el IESP.	Poco apreciables o inexistentes. No se aprecia una mejora manifiesta en las correlaciones con IESP al desfasar las series.	Asimetría y curtosis positivas pero no muy distintas a las del IESP.
Cuencas pluvionivales.	Barrios de Luna, Camporredon. y Cervera-Ruesga (GRUPO 4).	La retención y fusión nival consiguen que las anomalías introducidas por la precipitación del invierno se repartan en el tiempo, de tal forma que en los valores del IESAp se alternen zonas de suaves tendencias- desde el invierno a la primavera- con regiones de la serie con mayor acoplamiento IESP / IESAp- que se corresponden con meses del resto del año- tanto menos conexión cuanto mayor componente subterránea tenga la aportación de la cuenca, lógicamente.	IESAp es persistente pero con suaves fluctuaciones. La inercia la introduce la fusión nival, que distribuye los caudales en el tiempo, pero como solo dura una parte del año, durante el resto el IESP y el IESAp fluctúan más conjuntamente. La persistencia aumenta si la cuenca es permeable.	Bajo. Aún más si son permeables.	Moderada/ alta.	Media / larga. Más cuando además son permeables.	Los repuntes de la sequía están visiblemente retardados. Importante mejora en las correlaciones al desfasar las series. En cambio, el retardo introducido en este caso es discontinuo y solo se produce durante invierno/ primavera.	Asimetría y curtosis mucho menor que la que muestra el IESP, dando idea de la regularidad de la escorrentía en este tipo de cuencas.

FUENTE: *Elaboración propia.*

6.5.2. La funcionalidad y viabilidad del índice aplicado a las aportaciones.

Habida cuenta de todo lo expuesto hasta ahora, es evidente que el índice revela multitud de comportamientos hidrológicos muy interesantes en situaciones de déficit y que incluso la sola observación de sus gráficas temporales y de los histogramas permite establecer diferenciaciones entre las cuencas y aporta mucha información complementaria a la que se aprecia a partir del simple análisis de la sequía pluviométrica.

Además, se ha comprobado que el IESAp acusa retardos con respecto al IESP y es generalmente menos variable que éste, de manera que resultaría más sencillo prever la evolución de una incipiente sequía en el recurso hídrico fluyente a partir de lo que ocurre en la precipitación, que intentar hacerlo en esta última.

No obstante, es importante aceptar con mucha reserva la posibilidad de aplicar el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica a cualquier tipo de serie mensual de aportaciones tal y como está concebido para su aplicación sobre las precipitaciones sin puntualizar que no todo lo que marca como negativo ha de ser directamente concebido como sequía en todos los casos. Por ejemplo, en las cuencas de elevadas curtosis y asimetrías positivas destaca la aparición de cortos y leves déficit con mucha frecuencia, y al contrario, en las cuencas en los que dichos parámetros son bajos o negativos a causa de la bimodalidad de los histogramas, aparece en torno a la mitad de la serie con valores negativos correlativos. En ninguno de los dos casos debiera considerarse todo valor del IESAp negativo directamente como una situación anormalmente deficitaria.

A pesar de ello, el problema en el primero de los casos se solventa de manera sencilla estableciendo un determinado umbral, bien temporal, bien de intensidad. Así, solo se marcarían las que verdaderamente reflejan una anomalía suficientemente significativa. Ha demostrado ser operativo el considerar las secuencias superiores a un año como aquéllas capaces de inducir un problema real a nivel socioeconómico, del mismo modo que está convencionalmente aceptado para la precipitación (Pita López, M. F., 1995). Como se ha estudiado en este capítulo, el umbral de intensidad -0,85 en el IESAp es otro límite que permite distinguir los meses en los que la sequía excavada ya se considera excepcionalmente severa, dado que solamente un 14% de los valores lo exceden. El caso de las cuencas de histogramas bimodales exige la restricción de los meses que se consideran verdaderamente

secos una vez dentro de la propia macro-fase seca, par alo cual existen múltiples soluciones, algunas de las cuales se propondrán como desarrollos futuros de esta investigación.

- *Propuestas y recomendaciones con respecto a la aplicación del índice a las aportaciones.*

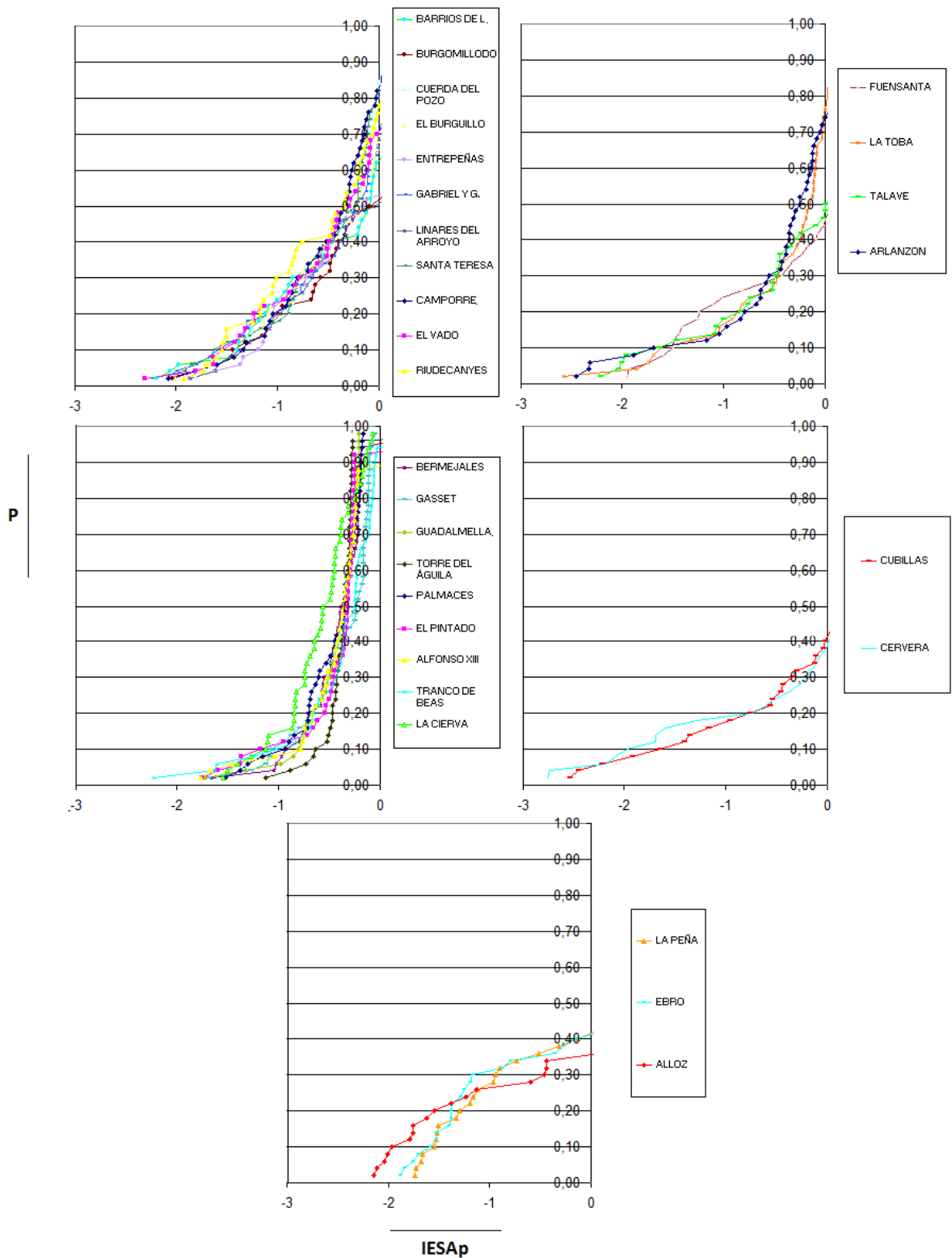
Una solución sencilla y factible para determinar los momentos de verdadera severidad en todas las cuencas consiste en aplicar la teoría de eventos extremos a las series de los IESAp. Un recurso adecuado consistiría en la obtención de los mínimos valores del IESAp anuales, es decir, los 49 picos de intensidad anual para las cuencas y, tras su ordenación de menor a mayor, calcular la frecuencia empírica de los mismos.

Se ha realizado una primera prueba con el cálculo de las probabilidades empíricas acumuladas de Weibull para las 29 cuencas y, al visualizarlas de manera gráfica, se aprecia que no todas las cuencas dibujan la misma curva de probabilidad e incluso podrían establecerse grupos, los cuales no distan significativamente de los establecidos en la tipología de cuencas (Ver Figura 6.57). Las leves diferencias con respecto a la tipología constituida en este trabajo habrán de ser analizadas en profundidad cuando esta propuesta se desarrolle por completo, pero cabe indicar que las cuencas se distribuyen en un número más reducido de grupos que los que aparecen en nuestra clasificación.

La ventaja de este paso es que a su vez estas curvas y valores pueden ajustarse a diferentes distribuciones de probabilidad, que previsiblemente serán distintas para cada uno de los grupos de cuencas pero similares dentro de cada uno, lo cual de por sí ya reviste suficiente interés porque permite realizar inferencias usando una u otra función según el tipo de cuenca de la que se trate. También supone establecer probabilidades de ocurrencia y periodos de retorno de la intensidad de sequía para cada tipo de cuenca, lo que permitiría trascender hacia la predicción y el seguimiento de las nuevas sequías, tal y como se hace para el estudio de las inundaciones y prácticamente para cualquier fenómeno extremo.

Por tanto, es importante que en estudios posteriores se desarrolle esta posibilidad para solventar de una manera sistemática las pocas objeciones que la aplicación del índice parece mostrar y que además no son causadas porque su formulación no sea la correcta, sino más bien porque la naturaleza de las aportaciones origina que se generen artefactos en los valores y las gráficas que necesitan una reinterpretación.

FIGURA 6.57: Probabilidad empírica acumulada de Weibull que se le atribuye a los valores mínimos anuales del IESAp de las cuencas de estudio.



*P: Probabilidad empírica de Weibull.
 FUENTE: Elaboración propia.

Capítulo 7

Conclusiones

Este trabajo se fundamenta en la necesidad de estudiar la sequía hidrológica y establecer un índice capaz de caracterizarla con el propósito de mejorar los actualmente existentes y de resultar práctico para la gestión de los recursos hídricos en las cuencas a distintas escalas espaciales, especialmente en detalle.

Recordemos los objetivos específicos a abordar con este estudio, fijados al inicio del mismo:

1. Caracterizar las precipitaciones y aportaciones en los ámbitos de estudio utilizados.
2. Definir físicamente las 29 cuencas usadas para recabar toda la información hidrológica posible sobre ellas.
3. Tasar la conexión temporal que tienen la precipitación y la aportación hídrica en ellas, para corroborar que un índice aplicado a esta última es procedente y útil.
4. Comprobar el beneficio y los resultados que arroja la adaptación del Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP), suficientemente testado en las precipitaciones, a los datos de escorrentías.
5. Finalmente, aprovechando que se cuenta con numerosos y muy variados casos de estudio, se pretende componer una tipología de cuencas de acuerdo con las diferentes respuestas hidrológicas a la sequía, definiendo las causas que las motivan, sin duda asociadas a los rasgos de los casos que constituyan cada grupo.

En adelante se presentará el conjunto de conclusiones generales obtenidas, clasificadas según cada uno de estos objetivos y confrontándolas con las hipótesis iniciales correspondientes.

7.1. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES PRECIPITACIÓN Y APORTACIÓN.

La selección de tan numerosos casos de estudio, repartidos de manera muy homogénea por el territorio peninsular, planteaba la *hipótesis* de que se conseguiría aunar muchas circunstancias pluviométricas e hidrológicas diferentes dentro del dominio mediterráneo, de tal forma que permitiesen la representación y estudio de muy diversas realidades. A continuación se recapitulan las cuestiones que se han concluido a partir de la caracterización de ambas variables a diferentes escalas temporales en las cuencas de estudio.

- *La escala anual.*
- Las precipitaciones de las 29 áreas de estudio representan todo el rango pluviométrico mediterráneo peninsular, encontrándose desde casos de estudio áridos (por debajo de los 500 mm. anuales) a cuencas muy húmedas que superan los 1.500 mm.
- A esta escala, las aportaciones tienen mucha mayor variabilidad que las precipitaciones, sobre todo en el sur de la Península.
- Las precipitaciones y, sobre todo, las aportaciones presentan un grado significativo de autocorrelación a nivel anual en algunas de las cuencas, por lo que no puede asumirse directamente la total independencia temporal. Las cuencas más amplias y con más superficie acuífera presentan más tendencia hacia la autocorrelación en los valores de aportaciones. Esto corrobora la hipótesis de que la escorrentía, sobre todo contando con la fase subterránea de la misma, actúa como depósito y permite la regulación del caudal circulante y la persistencia en el tiempo de las condiciones de humedad.

- *Los regímenes promedio.*
- Las precipitaciones siguen un régimen bastante similar en todas las cuencas; aun así, se han podido identificar varios grupos de regímenes de bastante continuidad espacial.
- En las aportaciones, sin embargo, se identifican más disparidades entre las cuencas piloto. Dichas diferencias no solo se atribuyen a los distintos volúmenes precipitados, sino también a diferencias en los coeficientes de escorrentía. Concretamente, los regímenes difieren mucho dependiendo de la identificación en la cuenca de:
 - a) un caudal de base que regule el flujo, especialmente importante para diferenciar los veranos,
 - b) volúmenes atribuibles a la retención y fusión nival,
 - c) una fuerte evapotranspiración en la etapa estival.

7.2. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO.

La *hipótesis* de partida en este sentido era que la posibilidad de usar tantos casos de estudio y tan repartidos garantizaría el contar con multitud de tipos de cuenca diferentes en cuanto a los factores determinantes de las relaciones entre precipitación y aportación: hidrogeológico, topográfico, morfométrico, usos del suelo, evapotranspiración, nieve o drenaje.

Se ha comprobado que, efectivamente, todas estas características muestran un amplio rango- y de manera bastante equilibrada- en los casos de estudio seleccionados. La muestra con la que se cuenta es muy representativa de la variedad de subcuencas que aparecen en el ámbito mediterráneo.

La diversidad de las cuencas se confirma al agruparlas estadísticamente de acuerdo con sus características físicas. Con este análisis se aprecia que difícilmente se encuentran dos cuencas muy similares en cuanto a sus rasgos.

Aun así, aparecen menos de una decena de grupos con cierta consistencia, tanto si consideramos el tamaño entre las variables de agrupación como si no lo hacemos. Estos

grupos han permitido disponer de una visión más sintética del tipo de casos de estudio con los que se cuentan para facilitar la interpretación de los resultados posteriores.

7.3. CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS RELACIONES EXISTENTES ENTRE PRECIPITACIONES Y APORTACIONES.

Recordemos que la *hipótesis* planteada en este punto se basa en el funcionamiento del sistema hidrológico, y establece que con mucha probabilidad en una cuenca hidrológica existirá correspondencia entre el régimen de precipitaciones y el de aportaciones; sin embargo, se espera también que existan diferencias entre ellos- imputables a las características físicas de la propia cuenca- que además justifiquen el interés de centrar la atención en la vertiente hidrológica de la sequía y no solo en la sequía pluviométrica.

Las conclusiones extraídas al respecto son las siguientes:

- A escala anual se aprecian unas correlaciones muy elevadas entre las variables, sin apenas distorsión.
- A nivel de medición mensual existe correlación significativa, directa y lineal entre las precipitaciones y las aportaciones, tanto más cuanto más húmeda sea la cuenca, pero los valores son sistemáticamente inferiores a los hallados a nivel anual. Dicha relación es lo suficientemente fuerte para comparar las secuencias secas que posteriormente se identifiquen en ambas variables, pero no tan estrecha como para que con el estudio de la sequía hidrológica se genere información redundante.
- Los meses que distorsionan esta correlación se sitúan al principio y al final de intervalos de varios meses de lluvias cuantiosas. Esto habitualmente ocurre en otoño, ya que, al inicio de las lluvias, la evaporación y la infiltración en el suelo seco agotan gran parte del volumen precipitado; en cambio, al final de ellas, la fase subterránea mantiene la aportación aunque haya dejado de llover.
- Solo a escala mensual se aprecian *retardos* en la respuesta de las aportaciones a las

precipitaciones. Específicamente, las aportaciones correlacionan mucho mejor con la suma de los volúmenes de dos o, en escasas ocasiones, más meses consecutivos de precipitaciones. Las excepciones se identifican en los siguientes casos:

- Las cuencas impermeables, pues en ellas la escorrentía se genera inmediatamente.
 - Las cuencas muy áridas, ya que el volumen captado y / o evaporado en ellas es significativo en comparación con la escasa precipitación y, por consiguiente, el acuífero no se recarga y el caudal base no logra retardar la respuesta.
- En suma, pues, la escala mensual se adapta mejor al análisis y comparación de las sequías en precipitaciones y aportaciones al ofrecer el justo nivel de covariación y correlación entre ambas variables como para no suministrar información redundante al estudiarlas por separado. La escala anual desfiguraría posibles disparidades importantes en los inicios y finales de las secuencias secas, retardos, etc.

7.4. CONCLUSIONES RELATIVAS A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA APLICACIÓN DEL ÍNDICE A PRECIPITACIONES Y APORTACIONES.

Como *hipótesis* de partida, se asumía la idoneidad del Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica para su aplicación a las aportaciones y la subsiguiente comparación entre la sequía pluviométrica y la sequía hidrológica en las cuencas de estudio. La sequía hidrológica será presumiblemente similar a la pluviométrica, pero con variaciones y cierto retardo.

En primer lugar mostraremos las conclusiones extraídas con relación a la aplicación del índice a las precipitaciones, después las obtenidas con respecto a la sequía en las aportaciones y por último las relativas a la comparación de los resultados en los casos de estudio.

- *La sequía pluviométrica en las cuencas.*
- La sequía pluviométrica no es un fenómeno muy variable territorialmente. Incluso considerando el total de las cuencas, es difícil encontrar bajos valores de correlación entre ellas. La excepción se encuentra en las cuencas del levante peninsular, con

comportamientos independientes a los del resto.

- Gran parte de las divergencias entre las series de los IESP de las cuencas las introducen las secuencias más secas, tal y como mostraban los mapas generados para el *Libro Blanco del Agua*. Por tanto, pese a la homogeneidad del fenómeno, a menudo aparecen manifestaciones locales de gran severidad que hay que saber identificar y gestionar.
- Las sequías pluviométricas más intensas de las cuencas aparecen más frecuentemente en la mitad más reciente de la serie temporal.
- En sentido SW- NE se incrementa el *número* de sequías pluviométricas reconocidas en las cuencas. La *duración* de las secuencias secas superiores al año es en general una variable muy homogénea entre los casos de estudio. En cambio, las mayores *intensidades* se aprecian en los casos de estudio del sur.
- La sola observación de *los histogramas del IESP* es reveladora de rasgos importantes de la pluviometría y la sequía en las cuencas. El contrastado régimen de precipitaciones mediterráneo favorece que dichos histogramas sean asimétricos positivos y leptocúrticos. Las pocas excepciones las constituyen cuencas habitualmente muy húmedas en las que se han experimentado deficiencias pluviométricas de mucha importancia durante periodos prolongados; en estas cuencas se perciben menos sequías, más intensas y más duraderas que en las de asimetrías y curtosis positivas.
 - *La sequía hidrológica en las cuencas.*
- Las sequías hidrológicas son más heterogéneas territorialmente que las sequías pluviométricas. En general, el índice hidrológico distorsiona las similitudes que aparecían entre las sequías pluviométricas de las distintas cuencas.

- Aun así, aparecen unas pocas cuencas de gran entidad hidrogeológica e histogramas bimodales, entre cuyos índices se aprecian unas correlaciones muy elevadas, mucho más que para el índice pluviométrico. Mientras, el resto de casos de estudio muestra unas correlaciones mucho menores entre sí, incluso negativas.
- Las mayores divergencias entre las cuencas se aprecian en las sequías más importantes de las mismas, excepto en el intervalo 1990 - 1994, que fue generalizado y sincrónico en los casos de estudio.
- Las peores sequías se agrupan en la variedad hidrológica mucho más hacia el final de la serie que en la pluviométrica, lo cual evidencia que es un fenómeno que acumula y retarda lo que sucede en la precipitación.
- No existe un patrón territorial claro con respecto a los parámetros de *intensidad*, *número* y *duración* de las secuencias secas, ya que cada cuenca impone matices de acuerdo con sus rasgos.

En general, la sequía hidrológica es un fenómeno poco variable, muy persistente y predecible, especialmente en las cuencas permeables. De acuerdo con esta afirmación, aparecen muchas menos sequías severas que en las precipitaciones, ya que una secuencia hidrológica seca suele englobar varios episodios pluviométricos secos sin lograr recuperarse. La duración de la sequía hidrológica es normalmente mucho mayor. Aun así, esta persistencia no implica necesariamente una acentuación de las intensidades de la sequía hidrológica con respecto a la pluviométrica, a diferencia de lo que postulan otros documentos tales como El *Libro Blanco del Agua*. En ellos se obvia el hecho de que son unas condiciones de déficit mucho más distribuidas y dilatadas en el tiempo, por lo que su excepcionalidad es menor; el índice utilizado tendría que considerar este hecho en su formulación, lo cual no es habitual, por lo que se cometen errores en la representación de esta complejidad.

- La observación de los *histogramas de los IESAp* revela importantes aspectos sobre las características físicas de los casos de estudio y su comportamiento hidrológico frente a

la sequía.

Ha quedado demostrado que las asimetrías y curtosis altas se asocian a cuencas de regímenes contrastados, con una marcada aridez estival asociada a baja pluviometría y elevada evapotranspiración. Son cuencas de moderada altitud, impermeables o poco permeables, donde la recarga y descarga de los acuíferos es escasa o nula.

En cambio, las cuencas con valores bajos o negativos de asimetría y curtosis en el histograma del IESAp tienden hacia las formas bimodales en éste, debido a que aparece media serie temporal como húmeda y otra media como seca, separadas ambas circunstancias por un punto de inflexión que corresponde al agotamiento del caudal. Se muestran así porque su aportación está muy regulada gracias al papel de las aguas subterráneas, que confieren una enorme resistencia tanto al agotamiento como a la recuperación de las condiciones hidrológicas.

Lógicamente, el resto de situaciones observadas oscilan entre estos dos extremos contrapuestos.

- *El paso de la sequía pluviométrica a la hidrológica.*
- La correspondencia entre las series del IESAp y las de IESP de la misma cuenca es estadísticamente significativa, con escasas excepciones. Sin duda, las mayores correlaciones entre los índices IESP e IESAp las muestran las cuencas más impermeables y viceversa. Pese a ello, se distinguen marcadas diferencias entre el comportamiento de uno y otro índice, y esto motiva que las correlaciones sean inferiores a las que se daban entre las dos variables originales: precipitaciones y aportaciones.
- Las desconexiones más evidentes entre el IESP y el IESAp se suelen apreciar durante las secuencias secas, especialmente al inicio o al final de ellas. Los déficit en ambas variables, por tanto, no fluctúan de manera estrictamente ajustada.
- De hecho, se ha comprobado que los comportamientos de ambas sequías están desfasados entre sí y, en consecuencia, la sequía pluviométrica puede anticiparse en

unos dos meses (si bien este lapso es levemente variable según las cuencas) el devenir de la sequía hidrológica. La mejor expresión de este hecho la protagonizan las cuencas más impermeables, en las cuales este retardo no existe o es muy leve.

7.5. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA REALIZACIÓN DE UNA TIPOLOGÍA DE CUENCAS DE ACUERDO CON SU RESPUESTA HIDROLÓGICA A LA SEQUÍA.

Se confirma la hipótesis de la conveniencia de agrupar las cuencas según la respuesta que en ellas presente la sequía hidrológica respecto a la pluviométrica. La agrupación establecida se basa en aspectos geográficos e hidrológicos de las cuencas, entre los que destacan:

- El carácter permeable o impermeable de la cuenca y la existencia de un caudal subterráneo importante en ella. En particular, cuando este rasgo destaca por defecto o por exceso, supone un factor que acerca mucho entre sí a las cuencas que lo comparten. Si la permeabilidad es significativa, actúa retardando y suavizando la respuesta de las aportaciones a la sequía en la precipitación.
- La evapotranspiración. Supone un factor que, por exceso, vuelve extremos los regímenes hidrológicos y distorsiona la respuesta hidrológica a la sequía, máxime porque no es uniforme a lo largo del año. Específicamente tiende a unir a las cuencas del sur porque en ellas esta característica tiene mucha influencia en verano y favorece que se reduzcan tanto las medianas como el rango de las anomalías en esta estación del año, propiciando que en ella las gráficas y los valores del IESAp no varíen nada al acumular o incluso se configuren como breves secuencias deficitarias. En el caso contrario, cuando la evapotranspiración es leve, la sequía pluviométrica y la hidrológica se asemejan mucho más.
- La retención / fusión nival. El índice IESAp se ve notablemente afectado por este retardo ceñido a una parte concreta del año, de forma que las sequías que comiencen o se acentúen en invierno en el IESP no se percibirán en las esorrentías de las cuencas

hasta bien entrada la primavera.

De hecho, aparece un grupo de cuencas que se caracterizan por no distorsionar lo que ocurre en el IESP al pasar a la fase hidrológica porque son impermeables, no presentan un régimen pluvionival ni tampoco una evapotranspiración muy importante. El resto, manifiestan uno o varios de estos factores de distorsión. Pese a que habitualmente no se presenten individualmente en las cuencas, la clasificación establecida consigue asociar eficazmente incluso las cuencas que comparten respuestas hidrológicas causadas por la interacción de varios factores, ya que el índice expresa apropiadamente las mezclas de ellos.

La viabilidad y la consistencia de la tipología establecida arroja luz sobre la posibilidad de incorporar a la misma cualquier nuevo caso de estudio, o bien a alguno de los grupos ya establecido, o bien agregando uno nuevo usando para definirlo la misma sistemática de exploración y criterios usados para delimitar el resto. Así, para establecer otra nueva categoría, esta debería ser singular en cuestiones como la forma de las gráficas, de los histogramas, en los retardos o en los parámetros concernientes a las sequías (número, intensidad, duración, etc.) y debería seguir manteniéndose la coherencia de toda la clasificación.

7.6. SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES POTENCIALIDADES Y LIMITACIONES DE LA APLICACIÓN DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE SEQUÍA PLUVIOMÉTRICA A LAS SERIES DE APORTACIONES. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.

- *Potencialidades científicas del índice.*
- Como índice, resulta más eficaz que otros cálculos utilizados en algunos estudios y documentos oficiales. La razón de ello es que el IESAp incorpora la acumulación de las circunstancias deficitarias desde el momento en que empiezan a aparecer, no utilizando un lapso temporal fijo, como ocurre en la formulación del SPI. Algunos otros índices usados en la bibliografía, como las desviaciones con respecto a medidas de tendencia central, por ejemplo, ni siquiera incorporan acumulación y obvian el impacto que el fenómeno ha causado hasta el momento, cuando la excavación

progresiva es precisamente uno de los rasgos más importantes de la sequía como riesgo.

También mejora a otros cálculos porque al usar la mediana y no otras medidas de tendencia central se ajusta mejor a las circunstancias hidrológicas mediterráneas, muy variables, y es capaz de definir mejor las situaciones habituales y las anómalas.

- El índice revela muchos comportamientos hidrológicos muy diversos e interesantes en situaciones deficitarias y el simple examen de sus gráficas temporales o de sus histogramas permite distinguir entre las cuencas e identificar los rasgos que motivan tales valores y formas.

- *Potencialidades del índice para su aplicabilidad a la gestión.*

- Los resultados de la aplicación del índice a las aportaciones son siempre más aproximados a los recursos disponibles, por estar esta variable más relacionada con el uso final del agua y con las circunstancias de potencial escasez que la precipitación.
- Se ha comprobado que el IESAp muestra retardos con respecto al IESP y es mucho menos variable que éste, con escasas excepciones. Ello determina que es posible pronosticar o anticipar la sequía hidrológica a partir de su precursora, la sequía pluviométrica.

- *Limitaciones.*

La posibilidad de aplicar el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica a cualquier tipo de serie mensual de aportaciones, tal y como está concebido y sin hacer especificaciones posteriores, implicaría que en algunas series las sequías no quedasen bien definidas e incluso que se marcasen como anómalas situaciones que en realidad no lo son.

Los principales conflictos se han apreciado al observar que las cuencas con histogramas asimétricos y leptocúrticos, propios de regímenes más extremos, no muestran intensidades suficientemente elevadas, presentando, sin embargo, demasiadas sequías cortas

y leves. Por el contrario, las cuencas de histogramas bimodales revelan pocas sequías pero muy largas y continuas porque los valores normales del caudal tardan mucho en excavarse y en recuperarse. En realidad no se trata de una deficiencia de la formulación del índice en sí misma, sino que ha de atribuirse a la naturaleza tan variable de las aportaciones, pero es preciso que se resuelva el hecho de que no todo lo destacado como negativo puede interpretarse directamente como una situación anómala.

- *Posibles ampliaciones y desarrollos futuros de la investigación.*

En primer lugar surge la necesidad de solventar en futuros trabajos la única limitación del índice comentada más arriba. Para ello existen varias opciones. Por un lado, sería posible plantear una variante del cálculo del mismo para su aplicación efectiva sobre todo tipo de regímenes de aportaciones, y no solo sobre aquellos más regulares sobre los que ha demostrado plena eficacia. En principio, tampoco se descartaría la opción de analizar qué resultados se obtendrían al transformar la variable de anomalías acumuladas de aportaciones cuando estas presenten una distribución marcadamente asimétrica y leptocúrtica.

No obstante, se ha probado preliminarmente la teoría de eventos extremos en las colas negativas de los IESAp, concretamente extrayendo la serie de las mayores intensidades de sequía anuales y asignándoles su frecuencia empírica y periodos de retorno de acuerdo con la función de Weibull. Se ha comprobado que los resultados derivados de este paso pueden a su vez ajustarse a diferentes distribuciones de probabilidad, a partir de las cuales se pueden realizar inferencias.

De este modo se podría conocer la severidad real de un determinado valor del índice en cada cuenca o en cada grupo de las que se ajustan a una misma distribución. Además, por lo concluido a lo largo del estudio, se espera que las cuencas que se comporten análogamente compartan ciertos rasgos hidrológicos, y viceversa; por lo tanto, podrían elaborarse nuevas tipologías o catálogos de cuencas según las distribuciones de probabilidad asociadas a sus IESAp, a cotejar con la clasificación de cuencas obtenida en esta tesis doctoral.

La principal ventaja de aplicar la teoría de eventos extremos y ajustar a distribuciones radica en que se evitaría el enorme esfuerzo de reformular el índice- que por otra parte ha demostrado funcionar eficazmente en la mayoría de los aspectos y casos- o de transformar

previamente las variables; al mismo tiempo, se ofrecería una metodología aplicable a todos los casos de estudio, e incluso a ambas variedades de sequía si así se desea, de manera sistemática.

Por tanto, la única objeción posible a la aplicación del índice a las aportaciones, posee esta solución conveniente y sencilla a desarrollar en investigaciones futuras.

Por otra parte, aunque consideramos que la elaboración de un índice de sequía hidrológica- expresivo de la realidad que afecta a este complejo sistema- posee entidad suficiente como para habernos detenido a reflexionar convenientemente y encontrar una solución válida, permanece el interés por ampliar posteriormente nuestros proyectos hacia las diferentes líneas del sistema de indicadores de la propuesta general dentro de la cual se inserta este estudio.

Capítulo 8

Referencias bibliográficas e índice de figuras y tablas

8.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS⁷.

- Agencia Andaluza del Agua; IGME (2010). *Caracterización Hidrogeológica de los embalses subterráneos. Estudio metodológico para la integración de recursos hídricos subterráneos, superficiales y alternativos en las comarcas de la Vega de Granada y Cornisa de Granada.* [en línea] <
http://www.igme.es/internet/sidimagenes/138000/78/138078_0000010.pdf> [ref. de 19 de noviembre de 2011].
- Agencia Española de Meteorología (2012). *Página web de la Agencia Española de Meteorología (AEMET)* [en línea] <
<http://www.aemet.es/en/serviciosclimaticos/datosclimatologicos>> [ref. de 3 de julio de 2012].
- ANDALUCÍA. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente (2012a). *Página web sobre Gestión Integral del Agua y Gestión de Riesgos* [en línea] <
http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/porta/web/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnnextoid=52b43f05548e5310VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=2e0fe3dbc95f4310VgnVCM2000000624e50aRCRD&lr=lang_es> [ref. de 4 de Noviembre de 2011].

⁷ A lo largo de todo el documento, y en este propio capítulo, se utiliza el *estilo Harvard* (autor- fecha) de citación.

- ANDALUCÍA. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente (2012b). *Subsistema de Climatología Ambiental* [en línea] <<http://www.climasig.es/metod2.html#i9>> [ref. de 3 de Noviembre de 2012].
- Aguilar Alba, M.; Pita López, M.F. (1996). Evolución de la variabilidad pluviométrica en Andalucía Occidental: su repercusión en la gestión de los recursos hídricos. En *Clima y agua. La gestión de un recurso climático*. Madrid, Tabapress, p. 299-310.
- Albentosa Sánchez, L. (1991). *El clima y las aguas*. Madrid: Síntesis. 240 p.
- Alley, W. M. (1984). The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, nº 23, p.1100-1109.
- Al-Shrafany, D.; Rico-Ramirez, M.; Han, D. (2012). Calibration of Roughness Parameters Using Rainfall–Runoff Water Balance for Satellite Soil Moisture Retrieval. *J. Hydrol. Eng.*, nº 17. p. 704–714.
- Argüelles Martín, A. (2007). *Plan Especial de actuaciones en situaciones de alerta y eventual sequía en la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. (Documento de Síntesis)* [en línea]. Sevilla. Archivo pdf. <www.chguadalquivir.es/opencms/opencms/chg-web/pics/planSequia/Plan_Sequia_11_01_07.pdf> [ref. de 26 de septiembre de 2007].
- Beran, M.A.; Rodier, J.A. (1985). Hydrological aspects of droughts. *Studies and reports in Hydrology*, nº39.Unesco. WMO.
- Blanquero, R. *et al.* (2012). Modelo estadístico para la predicción del Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP) en Andalucía. En *Cambio climático. Extremos e Impactos*. Asociación Española de Climatología y Universidad de Salamanca. p. 261-270.

- Calvo García-Tornel, F. (2000). Panorama sobre los estudios sobre riesgos naturales en la Geografía española. *Boletín de la AGE*, nº 30. p. 21 – 35.
- Camarasa, A. M.; López García, M. J.; Pascual, J. A. (2006). Análisis mediante SIG de los parámetros de producción de escorrentía. *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas*. Granada: Publ. Universidad de Granada. p. 46 – 63.
- Camarasa, A.M.; Soriano, J.; López García, M.J. (2010). The effect of observation timescales on the characterisation of extreme Mediterranean precipitation. *Advances in Geoscience*. n.º 26. p. 61-64.
- CEH CEDEX (2012). *Página web del Centro de Estudios Hidrológicos* [en línea] <<http://hercules.cedex.es/general/default.htm>> [ref. de 1 de julio de 2012].
- Chow, V.; Maidment, D.; Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: Mc Graw Hill.
- Confederación Hidrográfica del Duero (1995). *Plan Hidrológico del Duero* [en línea] Valladolid <<http://www.chduero.es/Portals/0/OficinaPlani/planhidro/PHMemoria.pdf>> [ref. de 4 de agosto de 2011].
- Confederación Hidrográfica del Duero (2007). *Plan Especial de actuaciones en situaciones de alerta y eventual sequía en la cuenca hidrográfica del Duero*. [en línea]. Valladolid. Archivo pdf. <http://www.chduero.es/Portals/0/OficinaPlani/Sequias/Documentos/070313_cap0_Portada%20y%20presentacion-V04.pdf> [ref. de 20 de septiembre de 2011].
- Confederación Hidrográfica del Duero (2011). *Los embalses del Estado en la Cuenca* [en línea] <

><http://www.chduero.es/Inicio/Infraestructuras/EmbalsesdelEstadoenlacuenca/tabid/147/Default.aspx>> [ref. de 29 de noviembre de 2011].

- Confederación Hidrográfica del Ebro (1996). *Plan Hidrológico del Ebro*. Zaragoza.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (2007). *Plan Especial de actuaciones en situaciones de alerta y eventual sequía en la cuenca hidrográfica del Ebro*. [en línea]. Zaragoza. Archivo pdf. <www.chebro.es/contenido.streamFichero.do?idBinario=5889> [ref. de 12 de septiembre de 2011].
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (1993). *Estudio de Recursos Hidráulicos de la Cuenca del Guadalquivir*. Sevilla.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (2005). *Protocolo de actuación en sequías en la cuenca del Guadalquivir* [en línea]. Sevilla. Archivo pdf. <http://www.mma.es/secciones/acm/aguas_continent_zonas_asoc/ons/medidas_ons/pdf/protocologuadalquivir.pdf> [ref. de 24 de enero de 2008].
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (2006). *Información Cartográfica. Aportaciones del Plan Hidrológico de la Cuenca, Aguas Subterráneas, Red Hidrográfica, Ámbito de la Cuenca y Embalses* [en línea]. Colección de ficheros shp. <http://www.chguadalquivir.es/opencms/opencms/chg-web/menu_izquierda/la_cuenca/informacion-cartografica/contenido.html> [ref. de 29 de noviembre de 2006]
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (2007). *Plan Especial de actuaciones en situaciones de alerta y eventual sequía en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir*. [en línea]. Sevilla. Archivo pdf. <<http://www.chguadalquivir.es/descargas/PlanEspecialSequia.pdf>> [ref. de 25 de septiembre de 2007].

- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (2008). *La cuenca* (Página web sobre los aspectos fundamentales de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir) [en línea]. <http://www.chguadalquivir.es/chg/opencms/chg-web/menu_izquierda/la_cuenca/contenido.html> [ref. de 29 de agosto de 2008].
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir; DGOH; MOTPMA (1994). *Redacción de la Propuesta del Plan Hidrológico del Guadalquivir* [en línea]. Sevilla. Colección de archivos pdf. <http://www.chguadalquivir.es/opencms/opencms/chg-web/menu_izquierda/marco-legal/plan_hidrologico_de_la_cuenca/contenido.html#17> [ref. de 30 de enero de 2007].
- Confederación Hidrográfica del Guadiana (1998). *Plan Hidrológico del Guadiana I*. Badajoz.
- Confederación Hidrográfica del Guadiana (2007). *Plan Especial de actuaciones en situaciones de alerta y eventual sequía en la cuenca hidrográfica del Guadiana*. Badajoz.
- Confederación Hidrográfica del Júcar (1997). *Plan Hidrológico del Júcar*. Valencia.
- Confederación Hidrográfica del Júcar (2007). *Plan Especial de actuaciones en situaciones de alerta y eventual sequía en la cuenca hidrográfica del Júcar*. Valencia.
- Confederación Hidrográfica del Segura (1998). *Plan Hidrológico del Segura*. Murcia.
- Confederación Hidrográfica del Segura (2007a). *Estudio general sobre la Demarcación Hidrográfica del Segura* [en línea]. Murcia. <http://www.chsegura.es/export/descargas/planificacionydma/planificacion/docsdesca_rga/Estudio_general_de_la_Demarcacion_V4.pdf> [ref. de 11 de junio de 2011].

- Confederación Hidrográfica del Segura (2007b). *Plan Especial de actuaciones en situaciones de alerta y eventual sequía en la cuenca hidrográfica del Segura*. Murcia.
- Confederación Hidrográfica del Segura (2008). *Esquema general de temas importantes*. Murcia.
- Confederación Hidrográfica del Segura (2012). *Web de la Confederación Hidrográfica del Segura. Infraestructuras* [en línea]. <
<http://www.chsegura.es/chs/cuenca/infraestructuras>> [ref. de 23 de marzo de 2012]
- Confederación Hidrográfica del Tajo (1998). *Plan Hidrológico del Tajo*. Madrid.
- Confederación Hidrográfica del Tajo (2007). *Plan Especial de actuaciones en situaciones de alerta y eventual sequía en la cuenca hidrográfica del Tajo* [en línea]. Madrid. Archivo pdf. <
<http://www.chtajo.es/DemarcaTajo/SequiasyAvenidas/Documents/Memoria.pdf>> [ref. de 18 de abril de 2011].
- Contreras, S. et al. (2006). "Desarrollo de un método para la evaluación del balance hídrico anual en regiones montañosas semiáridas. Aplicación a Sierra de Gádor (Almería)". *Actas del V Congreso Ibérico sobre Planificación y Gestión de Aguas. Área temática 5.1. Métodos y modelos de evaluación*. Faro: [s.n.], 4-8 diciembre 2006.
- Convenio Cortolima (2006). *Proyecto plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica mayor del Río Coello* [en línea]. <
http://www.cortolima.gov.co/2006/images/stories/centro_documentos/coello/B_2_A_SPECTOS%20BIOFISICOS_MORFOMETRIA_COELLO.pdf> [ref. de 20 de noviembre de 2011].
- Corporación Suna Hisca (2002). *Asesoría técnica agroambiental para la apropiación y consolidación del Parque Ecologico Distrital Entrenubes a partir de la formulación del*

Plan de Ordenamiento y Manejo. Bogotá. [en línea]
<http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/hidrologia_parque_ecologico_distrital_montana_entrenubes.pdf> [Ref. de 25 de octubre de 2011].

- Cuadrat, J. M.; Pita, M. F. (2000). *Climatología*. Madrid: Ediciones Cátedra.
- Cuadrat, J. M. *et al.* (2007). Water resources and precipitation trends in Aragon (Spain). *International Journal of Water Res. Dev.* nº 23. p.107–124
- Diputación Provincial de Granada e IGME (1990). *Atlas hidrogeológico de la provincia de Granada*. Madrid. 107 p.
- Diputación Provincial de Granada e IGME (2006). *Guía de Manantiales de Granada: Una visión sobre su origen y naturaleza*. Madrid. 287 p.
- Docampo, L. *et al.* (1989). Morfometría de las cuencas de la red hidrográfica de Bizkaia (País Vasco, España). *Limnética*. 5. p. 51-67.
- DGOH – ITGME (1994). *Libro Blanco de las Aguas Subterráneas*. Madrid: Publicaciones del Ministerio de Obras Públicas, 135 p.
- Dunne, T.; Leopold, L.B. (1978). *Water in Environmental Planning*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Eischeid, J. K.; Baker, C. B.; Karl, T.; Diaz, H. F. (1995). The quality control of long-term climatological data using objective data analysis. *Journal of Applied Meteorology*, nº 34, p. 2787–2795.

- Eischeid, J. K. *et al.* (2000). Creating a serially complete, national daily time series of temperature and precipitation for the western United States. *Journal of Applied Meteorology*, nº 39, p. 1580–1591.
- Echegaray, J. (1851). *Memoria sobre las causas de la sequía de las provincias de Almería y Murcia y de los medios de atenuar sus efectos*. Ministerio de Comercio, Instrucción y Obras Públicas. Madrid. 125 p.
- Embalses.Net (2012). *Estado de los embalses, pantanos y presas de España*. [en línea]. <<http://www.embalses.net>> [ref. de 1 de abril de 2012].
- ESPAÑA. Jefatura del Estado. Ley 29/1985. del 2 de agosto, de Aguas. *Boletín Oficial del Estado*, 8 de agosto de 1985, nº 189. p. 25123 – 25135.
- ESPAÑA. Jefatura del Estado. Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. *Boletín Oficial del Estado*, 6 julio 2001, nº 161. p. 24228 - 24250.
- ESPAÑA. Jefatura del Estado. Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. *Boletín Oficial del Estado*, 24 julio 2001, nº 176. p. 26791 - 26817.
- ESPAÑA. Jefatura del Estado. Real Decreto-ley 8/2008, de 24 de octubre, por el que se adoptan medidas urgentes para paliar los efectos producidos por la sequía en determinados ámbitos de las cuencas hidrográficas. *Boletín Oficial del Estado*, 25 de octubre de 2008, nº 258. p. 42410 – 42413.
- ESPAÑA. Jefatura del Estado. Real Decreto-ley 14/2009, de 4 de diciembre, por el que se adoptan medidas urgentes para paliar los efectos producidos por la sequía en determinadas cuencas hidrográficas. *Boletín Oficial del Estado*, 5 de diciembre de 2009, nº 293. p. 103532 – 103544.

- 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 2012]
- ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2001). *Plan Hidrológico Nacional*. Madrid.
- ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2005). *Informe resumen de los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua en la Demarcación Hidrográfica del Duero*. [en línea] <<http://www.chduero.es/descarga.aspx?fich=/OficinaPlani/dma/informe%20art%205-2.pdf>> [ref. de 12 de octubre de 2011].
- ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Orden MAM/698/2007 del 21 de marzo por la que se aprueban los Planes Especiales de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía en los ámbitos de los planes hidrológicos de cuencas intercomunitarias. *Boletín Oficial del Estado*, 23 de marzo de 2007, nº 71, p. 12820-12821.
- ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012a). *Página web de los Nuevos Planes Hidrológicos de cuencas* [en línea] <<http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/planes-cuenca/>> [ref. de 1 de octubre de 2012].
- ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012b). *Observatorio Nacional de la Sequía* [en línea] <<http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/que-es-la-sequia/>> [ref. de 31 de octubre de 2011].

- ESPAÑA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012c). *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=generate>> [ref. de 1de marzo de 2012].
- Estrela Monreal, T. (2006). *Los Planes Especiales de Sequía en España* [en línea]. Madrid. Archivo pdf. <www.chguadalquivir.es/opencms/opencms/chgweb/pics/planSequia/SequiasMadridDiciembre2006.pdf> [ref. de 26 de enero de 2007].
- Estrela Monreal, T.; Rodríguez Fontal, A. (2008). *La gestión de la sequía de los años 2004 a 2007*. Madrid: Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente. 198 p.
- Felicísimo, A.M. (1994). *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales*. [en línea]. Documento pdf, 11 p. <<http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/libromdt.pdf>> [ref. de 3 de enero de 2011].
- Fernández Larrañaga, B. (1997). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central. *Ingeniería del Agua*. Vol. 4(4), p. 37-46.
- Ferrer Polo, J. (1993). *Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de Avenidas*. Madrid: CEDEX. Monografía nº 37, 76 p.
- García Codron, J.C *et al.* (2004). *El clima, entre el mar y la montaña*. Asociación Española de Climatología, serie A, nº 4, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria. 754 p.
- García Prats, A. (2006). *Sequía. Teoría y prácticas*. Valencia: Editorial UPV. 145 p.
- Gil Olcina, A. (2007). Sequía de 1846-50 e hipótesis de cambio climático por deforestación en el sureste ibérico. *Estudios geográficos*. Vol. 68. nº 262, p. 91-117.

- Gil Olcina, A.; Morales Gil, A. (2001). *Causas y consecuencias de las sequías en España*. Alicante: Caja de Ahorros del Mediterráneo e Instituto Universitario de Geografía. 574 p.
- Global Water Partnership (2009). *A Handbook for Integrated Water Resources Management in Basins*. [en línea]. Documento pdf, 112 p. <http://www.unwater.org/downloads/gwp_inbo%20handbook%20for%20iwr%20in%20basins_eng.pdf> [ref. de 3 de marzo de 2012].
- Garrido, N. et al. (2006). *Las sequías climáticas en la cuenca del Duero* [en línea]. Instituto Nacional de Meteorología. CMT de Castilla y León.<<http://www.unizar.es/fnca/duero/docu/p209.pdf>> [ref. de 3 de octubre de 2011].
- Gyau-Boakye, P. (1993). *Filling gaps in hydrological runoff data series in West Africa*. Germany: Ruhr-University Bochum.
- Hämmerly, R. (2001). *Modelación de la evapotranspiración con métodos de balance de agua*. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fé.
- Han, D. (2012). *Concise Hydrology*. Ventus Publishing Aps.
- Han, D. (2012). *Concise Environmental Engineering*. Ventus Publishing Aps.
- Hayes, M. (1999). *Drought indices* [en línea]. National Drought Mitigation Center. University of Nebraska–Lincoln. 9 p. <<http://enso.unl.edu/ndmc>> [ref. de 12 de mayo de 2011].
- Hernández Moreno, E. (2008). *Protocolos de Actuación en Sequías. Ponencias para la Expo Zaragoza*. [en línea]

<<http://www.expozaragoza2008.es/ContenidosAgenda/tda/ST0217.pdf>>[ref. de 15 de mayo de 2010].

- Herrero Jiménez, C. M. (2007). *Gestión de Recursos Hidráulicos*. [en línea] Universidad de Salamanca. Open Course Ware. <http://gredos.usal.es/jspui/bitstream/10366/56062/1/OCW_10373_GESTION.ZIP> [ref. de 3 de febrero de 2012].
- Hollinger, S. E.; Isard, S. A.; Welford, M. R. (1993). "A New Soil Moisture Drought Index for predicting crop Yields". *8th Conf. Applied Climatology*. California: Publ. American Meteorological Society. p. 187-190.
- Ibisate (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la AGE*, nº 38. p. 311 – 329.
- Iglesias, A.; Garrido, A.; Moneo, M. (2003). *Glosario de términos proyecto MEDROPLAN*. [en línea] <<http://www.iamz.ciheam.org/medroplan/guidelines/archivos/Glossary.pdf>> [ref. del de Noviembre de 2012].
- IGME (1980). *Memoria explicativa y Hoja del Mapa Geológico de España (serie MAGNA). Escala 1: 50000, nº 472, Reus*. Madrid: Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.
- IGME (1985). *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. informe de síntesis*. Madrid.
- IGME (2005). *Actualización de la información hidrogeológica de los parques naturales de la sierra de Huétor y sierra de Castril*. [en línea] <<http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0>>

CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.igme.es%2Finternet%2Fsidimagenes%2F123000%2F621%2F123621_0000001.DOC&ei=WlIaaUO38DOed0AWsj4GQDQ&usg=AFQjCNEmiWac5RTxemmWVtLLU9YWQ8K0tw&sig2=_X0znox9-aC26wmApxOtNQ > [ref. de 4 de Noviembre de 2011].

- IGME (2008). *Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Demarcación Hidrográfica 040 Guadiana. Masa de agua subterránea 040.008 Bullaque*. [en línea] Archivo pdf <http://www.igme.es/INTERNET/SIDIMAGENES/147000/984/147984_0000003.PDF > [ref. de 1 de Noviembre de 2011].
- IGME (2012). *Mapa Hidrogeológico de España 1: 1000000. Servicios WMS del IGME* [en línea] Servicio de mapas <http://mapas.igme.es/Servicios/wms.aspx?url=http://mapas.igme.es/gis/services/eWater/HydrogeologicalMap_1000_esp/MapServer/WMSServer?service=wms__request=getcapabilities__version=1.1.1> [ref. de 23 de agosto de 2012].
- ILLES BALEARS. Govern (2009). *Plan Especial de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía en las Islas Baleares*. Palma de Mallorca.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment*. Cambridge, Cambridge University Press.
- La Calle, A. (2007). *Sequía y adaptación de la Directiva Marco del agua. La sequía en España. Directrices para minimizar su impacto*. Madrid: Dirección General del Agua. Ministerio de Medio Ambiente.
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general. Principios y aplicaciones*. Bilbao: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.

- López Sanz, G. (2000). "Humedales y agricultura de regadío: el caso de la cuenca alta del río Guadiana". *II Symposium Nacional "Los regadíos españoles"*, Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Centro y Canarias.
- Lorenzo-Lacruz, J. *et al.* (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus river (central Spain). *Journal of Hydrology*. nº 386, p. 13-26.
- Luque Espinar, J.; Cobos Fernández, J. (2002). Papel de las formaciones poco permeables en la recarga de los acuíferos de Cazorla-Segura, Quesada-Castril Y Segura-Cazorla. *Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén*. Madrid: IGME.
- Maderey Rascón, L. E. (2005). *Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico*. México: Serie Textos Universitarios, nº 1. Geografía para el Siglo XXI, Instituto de Geografía, UNAM.
- Marcos Valiente, O. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones geográficas*. nº 26. Alicante. p. 59 – 80.
- Mariano, J. (1991). *Manual de Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas*. 2a. Edición. Brasil: Universidad Federal de Santa María.
- Martín Vide, J. (2000). "The pluviometric diversity of Spain". *IGU Spanish Committee, Living with diversity*. Madrid: AGE Publicaciones. p. 415-424.
- Martín Vide, J.; Estrada Mateu, J. (1998). Una nueva propuesta metodológica de regímenes pluviométricos estacionales para la Península Ibérica. *Nimbus*. nº 1-2, p. 85 – 92.

- Martínez Cortina, L.; Llamas Madruga, M.R. (2001). La gestión de las sequías en España. Papel de las aguas subterráneas. *Revista de la Real Academia de Ciencias*. vol. 94, nº 2, Madrid. p. 205-219.
- McKee, T. B.; Doesken, N. J.; Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales". *8th Conference on Applied Climatology* (Anaheim, California, 17- 22 enero). p. 179-184.
- 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. (1994). *Riesgos Climáticos en la Península Ibérica*. Madrid: Penthalon-Acción Divulgativa.
- Olcina Cantos, J. (2001). Causas de las sequías en España. Aspectos climáticos y geográficos de un fenómeno natural, en Gil Olcina, A. y Morales Gil, A.: *Causas y consecuencias de las sequías en España*. Alicante: Caja de Ahorros del Mediterráneo e Instituto Universitario de Geografía.
- Olcina Cantos, J.; Rico Amorós, A. (1995). Sequías y golpes de calor en el sureste ibérico: efectos territoriales y económicos. *Investigaciones Geográficas*. nº 13. p.47 – 79.
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. *Research Paper*. nº 45. Washington D. C.: United States Department of Commerce Weather Bureau.
- Paneque Salgado, P. (2012). Los Bancos Públicos del Agua en el marco de los nuevos modelos de gestión de la sequía en Andalucía. *Actas de CONAMA 2012*. 20 p.

- Parrilla Alcalá, E. (2004). “El cálculo de la escorrentía superficial mediante Sistemas de Información Geográfica: validación e índice de sensibilidad de los parámetros del método del Soil Conservation Service”. Trabajo de investigación inédito realizado para obtener el Diploma de Estudios Avanzados en Geografía. Universidad de Sevilla.
- Pérez Cueva, A. (1983). La sequía de 1978-1982 ¿excepcionalidad o inadaptación? *Agricultura y Sociedad*. nº 27. p. 225 – 245.
- Pérez Cueva, A. (1988). Notas sobre el concepto, los métodos de estudio y la génesis de las sequías. *Cuadernos de geografía*. nº 44. p. 139-144
- Pita López, M. F. (1988). *Los riesgos hídricos en Andalucía: sequías e inundaciones*. Junta de Andalucía, Consejería de Gobernación.
- 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. et al. (1999). *Riesgos Catastróficos y Ordenación del Territorio en Andalucía*. Sevilla: Publicaciones de la Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía. 225 p.
- Pita López, M.F. (2000). Un nouvel indice de sécheresse pour les domaines méditerranéens. Application au bassin du Guadalquivir (sudeste de l’Espagne), *Public. de l’Association Internationale de Climatologie*, vol. 13. Nice, p. 225-234.
- 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).
- Pita López, M.F.; Aguilar Alba, M. (1996). Evolución de la Variabilidad Pluviométrica en Andalucía Occidental: su Repercusión en la Gestión de los Recursos Hídricos. *Clima y Agua: la Gestión de un Recurso Climático.* Madrid: Tabapress. p. 299-310.
- Rico Amorós, A.; Hernández Hernández, M. (2008). Ordenación del territorio, escasez de recursos hídricos, competencia de usos e intensificación de las demandas urbano-turísticas en la Comunidad Valenciana. *Documentos de Análisis Geográfico.* nº 51. p. 79-109.
- Rico Sinobas (1851). *Memoria sobre las causas meteorológico- físicas que producen las constantes sequías de Murcia y Almería, señalando los medios de atenuar sus efectos.* Madrid: D. S. Compagni. 392 p.
- SAIH Ebro (2012). *Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca del Ebro.* [en línea] Base de datos alfanuméricos y cartográficos < <http://195.55.247.237/saihebro/index.php?url=/datos/mapas/tipoestacion:E> > [ref. de 15 de junio de 2012].
- SAIH Guadalquivir (2008). *Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca del Guadalquivir.* [en línea]. Datos de aportaciones reales a los embalses de la cuenca.< <http://Saih.chguadalquivir.es/> > [ref. de 20 de marzo de 2008].

- Sala, M.; Batalla, R.J. (1996). *Teoría y métodos en Geografía física*. Madrid: Síntesis.
- Saladié, O. *et al* (2002). Evolución de la precipitación en el sector suroriental de la Depresión del Ebro durante la segunda mitad del siglo XX. En: Guijarro, J.A. *et al.* (Eds.). *El agua y el clima*. Serie A, nº 3. Palma de Mallorca : AEC Publ. 594 p.
- Sánchez Muniosguren, L. (1991). Definición de sequía. Clima y sequía. La predicción de sequías. Sequías en la Península Ibérica. *Las Sequías en España*. Madrid: Real Academia de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. p. 11-30.
- Sánchez San Román, J. (2006). *Los grandes acuíferos de la cuenca del Duero*. [en línea] Archivo pdf < <http://www.unizar.es/fnca/duero/docu/p105.pdf> > [ref. de 3 de Noviembre de 2011].
- Sanz Donaire (2007). El índice xerocórico. Un indicador geográfico de la sequía pluviométrica (España y Polonia). *Estudios Geográficos*. LXVIII, 263.
- Sen, Z. (1980). Statistical analysis of hydrologic critical droughts. *Journal of Hydrology*. Div. ASCE. Vol 106 (HY1), p. 99-115.
- Sistema Cartográfico de Andalucía (2009). *Base de Datos Espaciales de Andalucía a Escalas Intermedias (DEA100)* [CD ROM]. Junta de Andalucía.
- Strahler, A.N.; Strahler, A.H. (1989). *Geografía Física*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- UNION EUROPEA. Agencia Europea de Medio Ambiente (2000). *Datos raster del CORINE Land Cover*. [en línea] < <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-raster-2> > [ref. de 24 de septiembre de 2010].

- UNIÓN EUROPEA. PARLAMENTO Y CONSEJO (2000). Directiva 2000/60/CE de 23 de octubre, que establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*. de 22-12-00. n.º L 327.
- UNESCO / OMS (1992). *Glosario Internacional de Hidrología*. 2º Ed. [en línea] Base de datos <<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/HINDES.HTM>> [ref. Del 23 de septiembre de 2012].
- U.N. Water (2008). *Status Report on Integrated Water Resources Management and Water Efficiency Plans*. United Nations Publications. 53 p.
- Universidad de Alcalá de Henares (2006). *Informe para la Sostenibilidad en España 2006*. Madrid: Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Universidad Politécnica de Valencia (200?). *Geología de la Comunidad Valenciana. La Bética*. [en línea] < http://www.upv.es/dit/Itinerarios/Betica_General.htm> [ref. de 24 de Julio de 2011].
- U.S. Water Resources Council (1981). *Estimating peak flow frequencies for natural ungaged watersheds. A proposed nationwide test*. Hydrology Subcomité. U.S. Water Resources Council, 346 p.
- Vanderlinden, K. (2003). "Análisis de procesos hidrológicos a diferentes escalas espacio-temporales"[en línea]. Tesis doctoral. <<http://hdl.handle.net/10396/208>> [ref. del 24 de septiembre de 2012].
- Vicente Serrano, S. (2004). *Evaluación de las consecuencias ambientales de las sequías en el Sector Central del valle del Ebro mediante imágenes de satélite: posibles estrategias de mitigación*. Zaragoza: CESA 2004. 346 p.

- Vicente Serrano, S.; López Moreno, J.I., (2005). Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. nº 9, p. 523-533.
- Vicente Serrano, S., Cuadrat, J. M. (2007). Trends in drought intensity and variability in the middle Ebro valley (NE of the Iberian Peninsula) during the second half of the twentieth century. *Theor. Appl. Climatology*. nº 88. p. 247–258.
- Vicente Serrano S.; Beguería, S.; López Moreno, J.I., (2010). A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index –SPEI. *Journal of Climate*, nº 23. p. 1696-1718.
- Vogt, J. V.; Somma, F. (2000). *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Berlin: Springer. 330 p.
- Wan Jaafar, W. Z.; Han, D. (2012). Catchment Characteristics Derivation for Index Flood Estimation. *ICE Water Management*. nº 165. p. 179 – 189.
- Ward, R. C.; Robinson, M. (1990). *Principles of Hidrology*. New York: Mc Graw Hill. 365 p.
- WWF (2012). *Medidas para abordar la escasez de agua y la sequía en España*. WWF Informe 2012. Madrid: WWF España.
- Young, K. C. (1992). A three- way model for interpolating monthly precipitation values. *Monthly Weather Review*. nº 120. p. 2561 – 2569.
- Zaidman, M.D.; Rees, H.G.; Young, A.R. (2001). Spatio-temporal development of streamflow droughts in north-west Europe. *Hydrology and Earth System*. 5(4), p. 733–751.

8.2. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.

Figuras, gráficos y mapas	Página
FIGURA 1.1: Demarcaciones Hidrográficas de tipología climática mediterránea que poseen todo o parte de su territorio en España.	18
FIGURA 1.2: Subcuencas hidrográficas seleccionadas para el estudio.	20
FIGURA 1.3: Evolución del valor mediano de la aportación del mes de marzo según el intervalo temporal considerado. Cuenca de Tranco de Beas.	24
FIGURA 1.4: Evolución del valor mediano de la aportación del mes de septiembre según el intervalo temporal considerado. Cuenca de Alloz.	24
FIGURA 2.1: Procesos fundamentales que intervienen en el ciclo hidrológico dentro de una cuenca.	28
FIGURA 2.2: Desviaciones unitarias anuales acumuladas en la precipitación y sus medias móviles en 5 años. Periodo 1940-1996.	39
FIGURA 2.3: Desviaciones unitarias anuales acumuladas en la aportación y sus medias móviles en 5 años. Comparación con las precipitaciones. Periodo 1940-1996.	39
FIGURA 2.4: Mapa de disminución porcentual de la aportación media en el periodo 1990- 1995 respecto a la media del periodo 1940- 1996 para todo el territorio español.	41
FIGURA 2.5: Mapa de precipitaciones espacializadas para todo el territorio español.	42
FIGURA 2.6: Aportaciones naturales anuales el la desembocadura del Guadalquivir.	44
FIGURA 2.7: Gráfico de las variables- factores antrópicos y factores naturales- que aparecen en el SIA.	47
FIGURA 2.8: Precipitaciones totales anuales en la Cuenca Hidrográfica del Tajo 1940- 2000.	53

FIGURA 2.9: Aportaciones totales anuales en la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir 1942- 1996.	53
FIGURA 3.1: Tamaño de las 29 cuencas en Km. ² .	61
FIGURA 3.2: Diagrama de dispersión de la compacidad y la circularidad de las cuencas mostrando que existe poca correlación entre ambos parámetros.	63
FIGURA 3.3: Forma y circularidad de las 29 cuencas.	65
FIGURA 3.4: Compacidad de las 29 cuencas.	66
FIGURA 3.5: 29 valores de altitud y pendiente promedio.	69
FIGURA 3.6: Mapa de las altitudes (msnm.) y pendientes (%) medias en las 29 cuencas de estudio utilizadas.	71
FIGURA 3.7: Diagrama de dispersión de las altitudes y pendientes en las cuencas.	72
FIGURA 3.8: Diagrama de dispersión de la longitud de cauce y el tiempo de concentración en las cuencas.	75
FIGURA 3.9: Longitud del cauce y tiempo de concentración con y sin la cuenca de Entrepeñas.	76
FIGURA 3.10: Diagrama de dispersión entre las pendientes de los ríos y las de la propia cuenca en sí.	77
FIGURA 3.11: Variables sobre hidrogeología.	80
FIGURA 3.12: Mapas del número de manantiales identificados por cuenca y de la proporción del área de estas que pertenece a una Unidad Hidrogeológica del inventario del IGME.	81
FIGURA 3.13: Diagrama de dispersión entre la ratio de superficie agrícola y la de superficie forestal en las cuencas de estudio.	84

FIGURA 3.14: Superficies agrícolas y forestales en las cuencas de estudio.	85
FIGURA 3.15: Mapa de la proporción agrícola en la cuenca.	85
FIGURA 3.16: Dendrograma de la agrupación por cuencas.	93
FIGURA 3.17: Dendrograma de la agrupación por cuencas sin incluir el factor 1 (tamaño).	95
FIGURA 4.1: Comparación de regímenes de aportaciones reales y estimadas mediante el modelo precipitación- escorrentía SACRAMENTO al embalse de Guadalmellato durante el periodo común 1965-1996.	103
FIGURA 4.2: Comparación de los totales anuales de aportaciones reales y estimadas mediante el modelo precipitación- escorrentía SACRAMENTO al embalse de Tranco de Beas durante el periodo común 1965-1996.	103
FIGURA 4.3: Diagramas de dispersión de los valores reales frente a los estimados con el modelo SACRAMENTO a escala mensual y anual en la cuenca de Torre del Águila.	104
FIGURA 4.4: Precipitaciones totales anuales en el entorno de las cuencas de estudio.	111
FIGURA 4.5: Regímenes pluviométricos observados en las 29 cuencas de estudio.	114
FIGURA 4.6: Tipos de regímenes hídricos observados en las cuencas de estudio.	129
FIGURA 4.7: Diferentes modelos de escorrentía según los volúmenes mensuales por kilómetro cuadrado de cuenca (aportación específica).	132
FIGURA 4.8: Promedios mensuales de las aportaciones específicas de todas las cuencas englobadas en cada uno de los cuatro modelos identificados.	133
FIGURA 5.1: Esquema resumen de la relación física existente entre las precipitaciones y las aportaciones, así como los procesos del ciclo que intervienen en el paso del agua de una a otra variable.	135

FIGURA 5.2: Regresión entre los totales de precipitación y aportación de las Demarcaciones Hidrográficas.	137
FIGURA 5.3: Regresión entre los totales anuales de precipitación y aportación estimados con SIMPA para todo el territorio nacional.	137
FIGURA 5.4: Ejemplo de regresión potencial muy ajustada entre los datos totales anuales de precipitaciones y las aportaciones. Cuenca del Guadalquivir.	138
FIGURA 5.5: Expresión gráfica de los cinco diferentes patrones de cambio en el coeficiente promedio de escorrentía mensual (Ap. / P.) y las cuencas en las que se identifican.	142
FIGURA 5.6.: Cuencas de baja correlación mensual entre ambas variables.	147
FIGURA 5.7: Cuencas de elevada correlación mensual entre ambas variables.	148
FIGURA 5.8: Pluviograma e hidrograma de un episodio anómalo en el caso de estudio de Cubillas y la correspondiente ubicación de los diferentes meses del mismo en el diagrama de dispersión de la cuenca.	150
FIGURA 5.9: Mapa de los valores de la correlación entre los valores mensuales de precipitaciones y aportaciones.	151
FIGURA 5.10: Mapa de los valores de la TABLA 5.2.	153
FIGURA 5.11: Conexión entre la precipitación total anual y las correlaciones entre ambas fases del ciclo hidrológico, con y sin retardo entre las series.	156
FIGURA 5.12: Gráficos de sedimentación del Análisis de Componentes Principales correspondiente a las 12 correlaciones mensuales P. / Ap. (variables) en las 29 cuencas (casos).	159
FIGURA 5.13: Mapa de las puntuaciones factoriales correspondientes a las 29 cuencas obtenidas con el análisis de componentes principales.	162
FIGURA 5.14: Valores de precipitación y aportación para los 49 noviembreres de estudio en la cuenca de Gasset. Pluviohidrogramas mensuales asociados a algunos casos atípicos identificados.	165
FIGURA 5.15: Coeficientes de variación hallados en las precipitaciones (izquierda) y aportaciones (derecha) de las cuencas de estudio.	168
FIGURA 5.16: Diagrama de dispersión de los 49 valores anuales de precipitación y aportación en la cuenca de Arlanzón.	170

FIGURA 5.17: Ejemplo de la cuenca de Bermejales.	.....173
FIGURA 5.18: Valores anuales tipificados de precipitación, aportación y coeficiente de escorrentía. Cuenca de Camporredondo.	.....173
FIGURA 6.1: Dos ejemplos de la relación entre los índices de sequía de dos cuencas.	.....188
FIGURA 6.2: Disminución porcentual de la precipitación media en el periodo 1979- 83 respecto a la media de 1940-1996.	.....189
FIGURA 6.3: Disminución porcentual de la precipitación media en el periodo 1990- 95 con respecto a la media de 1940-1996.	.....190
FIGURA 6.4: Número de secuencias secas > 12 meses.	.....195
FIGURA 6.5: Duración (arriba) e intensidad (abajo) de las secuencias secas > 12 meses.	.....196
FIGURA 6.6: Quinquenio en el que se identificó la mayor intensidad de sequía pluviométrica en cada cuenca.	.....198
FIGURA 6.7: Intensidad máxima alcanzada en cada quinquenio.	.....200
FIGURA 6.8: Histogramas de frecuencia de los IESP de las cuencas.	.....203
FIGURA 6.9: Valores de asimetría y curtosis de los histogramas del IESP.	.....204
FIGURA 6.10: Histogramas de los IESP de Riudecanyes.	.....207
FIGURA 6.11: Histogramas de los IESP de Tranco de Beas.	.....208
FIGURA 6.12 Diagramas de dispersión entre los IESAp de las cuencas con sequía en los 80: Gabriel y Galán y El Pintado.	.....212

FIGURA 6.13: Disminución porcentual de la aportación media en el periodo 1990- 95 con respecto a la media de 1940-1996.	.....215
FIGURA 6.14: Número de secuencias secas superiores a los 12 meses.	.....220
FIGURA 6.15: Histograma con los 17052 valores del IESAp en las cuencas.	.....221
FIGURA 6.16: Número de secuencias secas superiores a los 12 meses por debajo del valor -0.85 del índice, el cual indica una sequía severa.	.....222
FIGURA 6.17: Duración (arriba) e intensidad (abajo) de las secuencias secas superiores a 12 meses.	.....223
FIGURA 6.18: Quinquenio en el que se identificó la mayor intensidad de sequía en cada cuenca.	.....225
FIGURA 6.19: Intensidad máxima de las secuencias de más de doce meses a lo largo del periodo de estudio recuadrado en cada esquina inferior derecha.	.....227
FIGURA 6.20: Diagrama de dispersión entre los valores de asimetría y curtosis en los histogramas del IESAp de las 29 cuencas.	.....229
FIGURA 6.21: Histogramas de frecuencias del IESAp en las 29 cuencas de estudio.	.....231
FIGURA 6.22: Valores de asimetría y curtosis de los histogramas del IESAp.	.....232
FIGURA 6.23: Relación entre la correlación de los índices de ambas variables y los parámetros de forma de los histogramas del índice en la precipitación.	.....237
FIGURA 6.24: Diagramas de dispersión IESP / IESAp en dos de las cuencas bimodales donde la correlación ha aumentado con respecto a la establecida con los valores originales de las variables.	.....238
FIGURA 6.25: Diagramas de dispersión IESP / IESAp de dos de las cuencas impermeables donde la correlación se ha mantenido elevada.	.....239
FIGURA 6.26: Diagramas de dispersión IESP / IESAp de dos cuencas donde la correlación es reducida a causa de los meses en los que una de las variables es negativa y la otra no.	.....241
FIGURA 6.27: Vinculación de la duración y la intensidad promedio de las secuencias secas superiores a 12 meses en las aportaciones de las 29 cuencas.	.....247

FIGURA 6.28: Ejemplo de una cuenca impermeable, con un histograma de alta asimetría positiva y curtosis, y de otra cuenca con cierta bimodalidad, fruto de una hidrología más regulada.	.....249
FIGURA 6.29: 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).	.....255
FIGURA 6.30: Dendrograma de las cuencas según sus IESP.	.....259
FIGURA 6.31: Mapa de los grupos hallados con conglomerados jerárquicos.	.....260
FIGURA 6.32: FIGURA 6.32: Mapas de la disminución porcentual de la precipitación media en los periodos secos 1979- 83 (A) y 1990- 95 (B) con respecto a la media de 1940-1996.	.....262
FIGURA 6.33: Dendrograma de las cuencas según sus IESAp.	.....264
FIGURA 6.34: Mapa de los grupos establecidos con conglomerados jerárquicos sobre las series de IESAp.	.....267
FIGURA 6.35: Histogramas de las cuatro series del IESP en las que se identifica una distribución platicúrtica, levemente tendente a la bimodalidad.	.....269
FIGURA 6.36: Hidrogramas mensuales medios de las cuencas del GRUPO 2.	.....273
FIGURA 6.37: Detalle de las dos sequías más importantes para dos de las cuencas del GRUPO 2.	.....275
FIGURA 6.38: Histograma del caso menos asimétrico y cúrtico dentro del GRUPO 2, El Pintado.	.....276
FIGURA 6.39: Histogramas de las series de anomalías acumuladas en las aportaciones del GRUPO 3.	.....280
FIGURA 6.40: Diagramas de caja de las anomalías mensuales en las aportaciones en la cuenca de Alfonso XIII.	.....281
FIGURA 6.41: Detalle de la respuesta del IESAp a los extremos positivos consecutivos registrados en los años 90 en el IESP de la cuenca de Alfonso XIII.	.....282
FIGURA 6.42: Detalle de la respuesta del IESAp al agotamiento hidrogeológico que tiene lugar durante una sequía pluviométrica prolongada.	.....283

FIGURA 6.43: Detalle de la sequía hidrológica de los años 90. IESAp de las tres cuencas.	285
FIGURA 6.44: Detalle de los IESP y IESAp de dos de las cuencas desde mitad de los 80 al final de las series.	287
FIGURA 6.45: Hidrograma medio mensual de las cuencas del GRUPO 4. Valores expresados en porcentaje mensual con respecto a la escurrentía anual.	288
FIGURA 6.46: Detalle del IESP e IESAp de dos de las cuencas del GRUPO 4.	291
FIGURA 6.47: Diferencias de precipitación y de aportación entre las medias mensuales del periodo 1989- 2000 y el intervalo completo de estudio.	292
FIGURA 6.48: Anomalías medias mensuales en las aportaciones en Hm.3 en dos de las cuencas del GRUPO 5.	297
FIGURA 6.49: Diagrama de dispersión IESP/ IESAp en dos de las cuencas del GRUPO 5.	298
FIGURA 6.50: Detalle de las series donde se aprecia la suavización que el IESAp impone sobre la oscilación constante del IESP.	302
FIGURA 6.51: Hidrograma mensual de la cuenca de Cubillas.	303
FIGURA 6.52: Secuencias secas en IESP e IESAp en la cuenca de Cubillas y sus principales diferencias en cuanto a tendencias a lo largo de la serie.	305
FIGURA 6.53: Histograma de la serie completa de IESAp en la Cuenca de Cubillas.	306
FIGURA 6.54: Detalle de las sequías de la segunda mitad de la serie en la cuenca de Arlanzón.	308
FIGURA 6.55: Diagrama de dispersión entre las series completas de IESP e IESAp de la cuenca de Arlanzón.	308
FIGURA 6.56: Detalle de IESP e IESAp de la cuenca de Riudecanyes durante los años más secos.	311
FIGURA 6.57: Probabilidad empírica acumulada de Weibull que se le atribuye a los valores mínimos anuales del IESAp de las cuencas de estudio.	322

Tablas	Página
TABLA 1.1: Área de las Demarcaciones Hidrográficas mediterráneas en territorio español.	.....17
TABLA 1.2: Subcuencas seleccionadas para el estudio.	.....19
TABLA 2.1: Comparativa de las aportaciones totales anuales medias por Demarcación Hidrográfica.	.....43
TABLA 2.2: Comparativa de las variables que aparecen en el SEIH y los análisis estadísticos que las acompañan.	.....46
TABLA 3.1: Área en Km. ² de las cuencas seleccionadas.	.....60
TABLA 3.2: Parámetros de forma de las cuencas de estudio.	.....64
TABLA 3.3: Parámetros orográficos de las cuencas de estudio.	.....68
TABLA 3.4: Parámetros referentes al drenaje en las cuencas.	.....74
TABLA 3.5: Datos referentes a la hidrogeología de las cuencas.	.....78
TABLA 3.6: Parámetros de usos del suelo predominantes en las cuencas de estudio.	.....83
TABLA 3.7: Correlaciones bivariadas entre las variables morfométricas estudiadas. r de Pearson.	.....87
TABLA 3.8: Varianza total explicada por los factores extraídos.	.....88

TABLA 3.9: Matriz de Componentes Principales rotados con Varimax.	88
TABLA 3.10: Puntuaciones factoriales de cada cuenca en los cuatro factores extraídos.	91
TABLA 3.11: Promedio de los factores y variables consideradas para la agrupación en los 8 conjuntos identificados.	94
TABLA 3.12: Promedio de los factores y variables consideradas para la agrupación en los 8 conjuntos identificados.	96
TABLA 4.1: Correlación entre las precipitaciones y las aportaciones mensuales; a la izquierda con los datos medidos de entrada a los embalses (SAIH, ROEA), a la derecha con los datos procedentes del modelo SACRAMENTO. Intervalo 1960- 1996.	105
TABLA 4.2: Correlaciones entre las series mensuales promedio de las cuencas de estudio.	109
TABLA 4.3: Cuencas que presentan autocorrelaciones totales (arriba) y parciales (abajo), expresándose el retardo al que estas aparecen y su coeficiente de autocorrelación.	112
TABLA 4.4: Características fundamentales de las series observadas de aportaciones a los embalses de las 29 cuencas piloto.	120
TABLA 4.5: Correlaciones entre las series mensuales promedio de las 29 cuencas de estudio.	122
TABLA 4.6: Cuencas que presentan autocorrelaciones totales (arriba) y parciales (abajo), expresándose el retardo al que estas aparecen y su coeficiente de autocorrelación.	125
TABLA 5.1.: Correlaciones entre las series mensuales de precipitación y aportación.	145
TABLA 5.2.: coeficientes r de Pearson entre la suma de la precipitación de varios meses consecutivos y la aportación del último de ellos.	154
TABLA 5.3: Cargas factoriales correspondientes a las doce variables (meses) tenidas en cuenta en el análisis de componentes principales.	160

TABLA 5.4: Puntuaciones factoriales correspondientes a las 29 cuencas.	161
TABLA 5.5: Coeficientes de correlación de Pearson (r) anual y su diferencia con respecto a la correlación mensual, identificada en el epígrafe anterior.	169
TABLA 5.6: Comparación entre los valores de los coeficientes de variación de la Aportación anual durante los 49 años de estudio y los que arroja la ratio anual Precipitación / Aportación (C. Escorrentía) en el mismo periodo.	172
TABLA 6.1: Umbrales de sequía pluviométrica. IESP.	184
TABLA 6.2: Coeficientes de Correlación de Pearson entre los IESP calculados para las precipitaciones de las cuencas de estudio.	187
TABLA 6.3: Secuencias superiores a 12 meses: inicios, finales, meses de duración e intensidad máxima alcanzada.	191
TABLA 6.4: Intensidad máxima en cada quinquenio (columna).	201
TABLA 6.5: Resumen de la relación entre los parámetros de forma de los histogramas del IESP y las características de la series a las que se asocian. Algunos ejemplos.	209
TABLA 6.6: Coeficientes de Correlación de Pearson entre los IESAp calculados para las precipitaciones de las cuencas de estudio.	211
TABLA 6.7: Diferencias entre los valores de correlación bivariada considerando solo los cinco años 1990- 94 y los obtenidos con la serie completa.	213
TABLA 6.8: Diferencias entre los valores de correlación bivariada considerando solo los cinco años 1995- 99 y los obtenidos con la serie completa en cuencas donde fue una sequía importante.	214
TABLA 6.9: Secuencias superiores a 12 meses: inicios, finales, meses de duración e intensidad máxima alcanzada.	216
TABLA 6.10: Intensidad máxima en el periodo de estudio correspondiente a cada columna.	228
TABLA 6.11: Diferencias entre la correlación establecida entre los 588 valores de precipitación y aportación en bruto y la de sus correspondientes índices de sequía.	236

TABLA 6.12: 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 las secuencias secas largas.	.....240
TABLA 6.13: Correlaciones entre las variables morfométricas medidas en las cuencas y la correlación que en las mismas se encuentra entre el IESP y el IESAp.	.....244
TABLA 6.14: Parámetros descriptivos de las secuencias secas de duración superior al año identificadas en las distintas cuencas para las precipitaciones y aportaciones.	.....245
TABLA 6.15: Efecto del desfasado de las series.	.....252
TABLA 6.16 Correlación entre IESP e IESAp al hacer coincidir un mes del índice hidrológico con el mes o meses previos del índice pluviométrico.	.....254
TABLA 6.17: Anova de las anomalías mensuales en las aportaciones. Variable a contrastar: anomalías, factor: meses.	.....278
TABLA 6.18: Medias y medianas mensuales en las anomalías de las aportaciones del GRUPO 3, las cuales reflejan una clara asimetría positiva.	.....279
TABLA 6.19: Anova de las anomalías mensuales en la precipitación. Factor: meses de los años 90 y meses que no lo son.	.....286
TABLA 6.20: Anova de las anomalías mensuales en la aportación. Factor: meses de los años 90 y meses que no lo son.	.....286
TABLA 6.21: Coeficientes de Pearson entre las anomalías de precipitaciones y aportaciones de las diferentes estaciones del año separadamente.	.....290
TABLA 6.22: Asimetrías y curtosis de los índices pluviométricos del GRUPO 4 en comparación con otras cuencas.	.....293
TABLA 6.23: Asimetrías y curtosis de los IESP e IESAp del GRUPO 4.	.....293
TABLA 6.24: Correlaciones bivariadas entre las series completas de los IESP del GRUPO 5.	.....295
TABLA 6.25: Correlaciones bivariadas entre las series completas de los IESAp del GRUPO 5.	.....295
TABLA 6.26: Síntesis sobre la tipología de cuencas según su respuesta hidrológica a la sequía.	.....318