



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y
MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

SECRETARIA DE ESTADO
DE MEDIO AMBIENTE
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

MAPA DE CAUDALES MÁXIMOS

MEMORIA TÉCNICA

(NIPO: 770-11-273-7)

MAYO - 2014



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y
MEDIO AMBIENTE

CEDEX

CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

SECRETARIA DE ESTADO
DE MEDIO AMBIENTE

DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA | 1 |
| 3. SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE LAS SERIES TEMPORALES DE CAUDALES MÁXIMOS ANUALES .. | 3 |
| 3.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS PUNTOS AFORADOS | 3 |
| 3.2. REVISIÓN DE LA CALIDAD Y REPRESENTATIVIDAD DE LOS DATOS DE LAS SERIES TEMPORALES..... | 5 |
| 3.3. TRANSFORMACIÓN DE DATOS DIARIOS EN INSTANTÁNEOS | 8 |
| 3.4. SELECCIÓN DE PUNTOS AFORADOS | 11 |
| 4. CÁLCULO DE LOS CUANTILES EN LOS PUNTOS AFORADOS | 12 |
| 4.1. SELECCIÓN DEL TIPO DE FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN Y DEL PROCEDIMIENTO DE AJUSTE | 12 |
| 4.1.1. <i>Identificación de regiones homogéneas</i> | 14 |
| 4.1.2. <i>Análisis de las funciones de distribución y procedimientos de ajuste</i> | 15 |
| 4.1.3. <i>Función de distribución y procedimiento de ajuste seleccionado</i> | 20 |
| 4.2. INFORMACIÓN HISTÓRICA EMPLEADA EN EL AJUSTE DE LAS LEYES DE FRECUENCIA | 21 |
| 5. ESTIMACIÓN DE LOS CUANTILES EN LOS PUNTOS DE LA RED FLUVIAL NO AFORADOS .. | 29 |
| 5.1. ESTIMACIÓN EN CUENCAS PEQUEÑAS: MÉTODO HIDROMETEOROLÓGICO | 29 |
| 5.1.1. <i>El coeficiente corrector del umbral de escorrentía (β)</i> | 30 |
| 5.1.2. <i>Calibración regional del umbral de escorrentía</i> | 30 |
| 5.1.2.1. Selección de estaciones de aforo | 30 |
| 5.1.2.2. Aplicación del método racional modificado a las cuencas vertientes a las estaciones de aforo seleccionadas | 32 |
| 5.1.2.3. Estimación del coeficiente corrector β mediante contraste con las series de caudales | 35 |
| 5.1.2.4. Análisis de la distribución espacial del coeficiente corrector del umbral de escorrentía | 35 |
| 5.1.3. <i>Caracterización de los valores del coeficiente β en las regiones estadísticas</i> | 38 |
| 5.2. ESTIMACIÓN EN CUENCAS GRANDES: MÉTODO ESTADÍSTICO | 46 |
| 5.2.1. <i>Bases teóricas de los modelos regionales basados en ecuaciones de regresión múltiple</i> | 47 |
| 5.2.2. <i>Selección y ajuste del modelo de regresión múltiple</i> | 48 |
| 5.2.3. <i>Modelo de regresión para los ejes principales</i> | 59 |
| 6. GENERACIÓN DE LOS MAPAS Y FORMATO DE PRESENTACIÓN | 63 |
| 7. ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA CRECIDA ORDINARIA | 64 |
| REFERENCIAS | 68 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Estaciones y embalses seleccionados en una primera fase | 5 |
| Figura 2. Ejemplos de estaciones con y sin tendencia temporal..... | 7 |
| Figura 3. Ejemplo de serie de datos con un valor anómalamente alto (E3172). Comparación de probabilidad muestrales y leyes de frecuencia con y sin el valor anómalo. | 8 |
| Figura 4. Regresión entre los caudales medios diarios e instantáneos en las estaciones de aforos 3254 y 2076. | 9 |
| Figura 5. Puntos de control seleccionados..... | 12 |
| Figura 6. Media e intervalos de confianza del 67 y 90 % de la estimación del L-coeficiente de variación en función del tamaño de la muestra..... | 13 |
| Figura 7. Media e intervalos de confianza del 67 y 90 % de la estimación del L-coeficiente de sesgo en función del tamaño de la muestra..... | 13 |
| Figura 8. Regiones con homogeneidad estadística identificadas. | 15 |
| Figura 9. Error en el ajuste a los datos observados: región 92. | 17 |
| Figura 10. Contraste entre la distribución muestral de diferentes estadísticos en la región y las obtenidas mediante generación de regiones sintéticas: Región 92. | 18 |
| Figura 11. Análisis de la capacidad predictiva de las distintas funciones y procedimientos de ajuste: Región 92..... | 19 |
| Figura 12. Avenidas históricas en el puente de Alcántara (tomada de G. Benito et al., 2003)..... | 24 |
| Figura 13. Avenida de 1947 en Toledo (tomada de G. Benito et al., 2003)..... | 24 |
| Figura 14. Localización de las avenidas históricas consideradas | 25 |
| Figura 15. Ejemplos de leyes de frecuencia ajustadas con información sobre avenidas históricas..... | 29 |
| Figura 16. Estaciones seleccionadas para la calibración del umbral de escorrentía..... | 32 |
| Figura 17. Mapa de umbral de escorrentía en condiciones medias de humedad. | 33 |
| Figura 18. Mapa de precipitaciones máximas diarias para 100 años de periodo de retorno. | 34 |
| Figura 19. Mapa de factor de torrencialidad. | 34 |
| Figura 20. Ajuste de la ley de frecuencia obtenida mediante el método racional a los datos registrados en la estación de aforos 3217 (izquierda: resultado obtenido con el P_0 para condiciones medias de humedad antecedente, derecha: resultado obtenido con el P_0 calibrado). | 35 |
| Figura 21. Semivariograma obtenido en la interpolación del coeficiente corrector del umbral de escorrentía mediante kriging. | 36 |
| Figura 22. Mapa de coeficientes correctores del umbral de escorrentía. | 36 |
| Figura 23. Comparación entre los valores regionales y locales del coeficiente β para las estaciones de validación. | 37 |
| Figura 24. Errores en la estimación de los cuantiles mediante el método racional en función del área de la cuenca vertiente..... | 38 |
| Figura 25. Subdivisión de las regiones 94 y 95 | 39 |
| Figura 26. Subdivisión de las regiones 82..... | 39 |
| Figura 27. Subdivisión de las regiones 51..... | 40 |
| Figura 28. Probabilidades muestrales del coeficiente corrector del umbral de escorrentía para una selección de regiones estadísticas. | 42 |
| Figura 29. Relaciones entre los coeficientes correctores del umbral de escorrentía en función del periodo de retorno para las regiones consideradas en la cuenca del Tajo. | 45 |
| Figura 30. Relación altitud-precipitación en cada una de las regiones estadísticas consideradas en la cuenca del Tajo..... | 49 |
| Figura 31. Ejemplo de correlación de la variable área de la cuenca con el cuantil de caudal máximo anual de 10 años de periodo de retorno. | 50 |
| Figura 32. Ejemplo de correlación entre las variables área y perímetro de la cuenca. | 50 |
| Figura 33. Relaciones entre los cuantiles de caudal máximo y el área vertiente a lo largo de la corriente principal de los grandes ríos para $T= 100$ años..... | 61 |
| Figura 34. Modelo digital del terreno..... | 64 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Parámetros de las ecuaciones de Fuller | 10 |
| Tabla 2. Expresiones algebraicas y parámetros para ajuste de la función TCEV | 20 |
| Tabla 3. Funciones de distribución utilizadas en cada región estadística. | 21 |
| Tabla 4. Caudales históricos empleados en el análisis estadístico. | 25 |
| Tabla 5. Caracterización estadística de los valores del coeficiente corrector β en las distintas regiones. | 40 |
| Tabla 6. Factores correctores del coeficiente β en función del periodo de retorno para las distintas regiones estadísticas..... | 46 |
| Tabla 7. Modelos de regresión seleccionados para cada periodo de retorno en cada una de las regiones consideradas..... | 51 |
| Tabla 8. Ecuaciones de regresión aplicadas en las corrientes principales..... | 62 |
| Tabla 9. Coeficientes de variación regionales y periodos de retorno para la máxima crecida ordinaria en las regiones estadísticas..... | 66 |



1. INTRODUCCIÓN

El 17 de septiembre de 2004 fue firmado el Convenio de Colaboración entre la Dirección General del Agua (DGA) y el CEDEX con título “Asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materia de gestión de dominio público hidráulico y explotación de obras”. Entre los trabajos previstos en el Convenio figura la elaboración de un “Mapa de caudales máximos de avenida para la red fluvial de la España peninsular”, trabajo que, además de poner a disposición de los Organismo de cuenca y de la propia DGA una herramienta muy útil para la gestión del dominio público hidráulico, dará cumplimiento, al ser puestos sus resultados a disposición de las distintas administraciones y del público en general, al mandato legal establecido en el artículo 28.2 de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional:

“Las administraciones competentes delimitarán las zonas inundables teniendo en cuenta los estudios y datos disponibles que los Organismos de cuenca deben trasladar a las mismas, de acuerdo con lo previsto en el artículo 11.2 de la Ley de Aguas. Para ello contarán con el apoyo técnico de estos Organismos y, en particular, con la información relativa a caudales máximos en la red fluvial, que la Administración hidráulica deberá facilitar”.

De común acuerdo entre la DGA y el CEDEX se tomó la cuenca del Tajo como cuenca piloto, a través de cuyo estudio determinar las metodologías más idóneas para abordar el conjunto del trabajo a escala nacional. Como resultado de ese trabajo se obtuvo un mapa de caudales máximos para esa cuenca y se realizó una propuesta de metodologías a aplicar en la elaboración de los mapas.

Las metodologías propuestas se han utilizado en la elaboración del resto de mapas que, se han centrado en el ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas con cuencas intercomunitarias: Cantábrico, Miño-Sil, Duero, Guadiana, Segura, Júcar, Ebro, Tajo y, la última en ser incorporada, la cuenca del Guadalquivir.

En esta memoria técnica se expone la información utilizada y las metodologías empleadas en la elaboración de los mapas de caudales máximos en régimen natural de las distintas demarcaciones hidrográficas con cuencas intercomunitarias.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA

El fenómeno natural de la llegada de avenidas a un determinado punto de un río es enormemente variable en frecuencia y magnitud, estando en esencia determinado por el azar y siendo, por tanto, imposible de predecir de forma determinística. De esta forma, el objeto fundamental del mapa de caudales máximos, como el de la mayoría de los estudios hidrológicos de crecidas, consiste en caracterizar estadísticamente dicho fenómeno mediante el conocimiento de su ley de frecuencia, la cual relaciona la magnitud del caudal punta de avenida con su frecuencia de presentación (expresada mediante el periodo de retorno) o, lo que es lo mismo, con su probabilidad anual de ocurrencia.

En consecuencia, la determinación de dicha ley es un problema fundamentalmente estadístico y debe ser, por tanto, abordado mediante la aplicación de las técnicas que ofrece dicha disciplina. Dado que la estadística se ocupa del tratamiento de los datos para, en base a ellos, tomar decisiones y realizar predicciones, es fundamental disponer de mediciones directas del fenómeno aleatorio en estudio para que sus técnicas puedan ser aplicadas, siendo crítica la calidad y extensión de los datos disponibles en la fiabilidad de los resultados obtenidos. El estudio debe, por tanto, partir del análisis detallado de la información foronómica sobre caudales máximos de que se disponga en la cuenca.



La metodología aplicada en el estudio ha partido, por tanto, de la selección de estaciones de aforos y embalses con suficiente información sobre caudales máximos como para realizar una estimación suficientemente fiable de los valores correspondientes a distintas probabilidades o períodos de retorno (cuantiles). A las series de datos seleccionadas se les han aplicado diversas técnicas estadísticas para verificar la calidad de la información, así como la coherencia en la información de las distintas estaciones entre sí, y se les ha ajustado una función de distribución con la finalidad de determinar sus cuantiles, es decir, su ley de frecuencia, habiéndose seleccionado los siguientes períodos de retorno para el trabajo: 2, 5, 10, 25, 100 y 500 años. En el análisis de las leyes de frecuencia se han incorporado las siguientes técnicas estadísticas con objeto de mejorar la precisión de la estimación de los cuantiles, fundamentalmente de los correspondientes a los más altos períodos de retorno (100 y 500 años) para cuya estimación es necesario extrapolar la ley de frecuencia fuera del rango de probabilidad cubierto por los datos presentes en la serie:

- Estudio de la combinación función de distribución – procedimiento de ajuste con un mejor comportamiento para el tipo de datos de la cuenca.
- Empleo de información regional en la determinación del valor del coeficiente de sesgo. Este estadístico tiene una gran influencia en la extrapolación de la función de distribución a altos períodos de retorno y, sin embargo, su estimación a partir de muestras de pequeña longitud presenta una gran imprecisión.
- Incorporación de información histórica al análisis de las leyes de frecuencia en aquellos lugares donde ese tipo de información está disponible. La información histórica correspondiente a las mayores avenidas ocurridas en la zona, es decir, a eventos de pequeña probabilidad de ocurrencia, proporciona información directa sobre el valor de los caudales en el rango de probabilidad no cubierto por los datos de aforo sistemático, mejorando de forma importante la estimación de los cuantiles de alto periodo de retorno.

El análisis estadístico de los datos foronómicos permite conocer los cuantiles en aquellos puntos en los que existen medidas de caudal, pero no puede aplicarse en aquellos puntos donde no están disponibles dichas medidas. Puesto que el objetivo del trabajo es elaborar un mapa que dé información sobre los caudales máximos de forma casi continua a lo largo de la red fluvial, es necesario estimar también los cuantiles en aquellos puntos no aforados. Dicha estimación debe realizarse forzosamente mediante extrapolación de los resultados obtenidos previamente para los puntos aforados.

La extrapolación de resultados puede realizarse básicamente mediante dos procedimientos. Por una parte, pueden emplearse modelos hidrometeorológicos calibrados de tal forma que reproduzcan adecuadamente los resultados, desde un punto de vista estadístico, en los puntos aforados, es decir, que para las hipótesis de cálculo adoptadas den como resultado los cuantiles previamente calculados mediante el análisis estadístico, asumiendo que el modelo así calibrado da resultados correctos en los puntos no aforados. Hay que tener en cuenta, como se comentó anteriormente, que la obtención de los cuantiles de caudal es fundamentalmente un problema estadístico y no un problema de modelación hidrometeorológica. La interpretación estadística de los resultados del modelo sólo podría llevarse a cabo si se conociese la probabilidad conjunta de las distintas variables que intervienen en la determinación del caudal (cantidad total de precipitación durante la tormenta, distribución espacial y temporal de la precipitación, humedad antecedente del suelo en la cuenca, etc.). En la práctica dichas probabilidades no se conocen, por lo que hay que recurrir a adoptar determinadas hipótesis de cálculo (precipitación uniforme sobre la cuenca, distribución temporal según hietogramas sintéticos, etc.) y a calibrar determinados parámetros de la modelación (habitualmente los parámetros del modelo de infiltración) para forzar el ajuste de los resultados del modelo hidrometeorológico a los del análisis estadístico en las estaciones de aforo. Esto conlleva que



estos modelos sólo puedan aplicarse a cuencas de tamaño no muy grande en las que puedan asumirse las hipótesis realizadas.

Otra posibilidad es el empleo de modelos estadísticos basados en relacionar mediante ecuaciones de regresión múltiple, bien los propios cuantiles calculados a partir de las series temporales de las estaciones de aforo, bien determinados estadísticos de dichas series temporales, con determinadas características fisiográficas y climáticas de las cuencas, lo que permite realizar estimaciones de los cuantiles en aquellos puntos no aforados simplemente conociendo el valor en sus cuencas de las características fisiográficas y climáticas empleadas en la regresión.

El esquema de cálculo adoptado para calcular el mapa ha sido una combinación de ambos procedimientos. Modelos hidrometeorológicos en las cuencas de menor tamaño (hasta unos 500 km² de cuenca) y modelos estadísticos en aquellos puntos con mayor cuenca vertiente.

En los próximos apartados se expone en detalle el procedimiento de cálculo seguido.

3. SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE LAS SERIES TEMPORALES DE CAUDALES MÁXIMOS ANUALES

3.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS PUNTOS AFORADOS

En la selección de las estaciones de aforo a emplear en el estudio estadístico es necesario tener en cuenta dos aspectos contrapuestos. Por una parte, es importante disponer para el análisis de series temporales con el mayor número de datos posible puesto que, como se indicó anteriormente, la precisión en la estimación de los cuantiles, en mayor medida en los de mayor periodo de retorno, depende de forma crítica del número de datos disponibles. Esto nos llevaría a seleccionar aquellas estaciones de medida con una mayor longitud de registro o, al menos, a exigir a las series temporales un número de datos mínimo.

Por otra parte, teniendo en cuenta que los puntos de aforo seleccionados se emplearán para extrapolar resultados a los puntos no aforados, permitiendo así estimar los cuantiles en puntos sin información, es conveniente que cubran de forma más o menos homogénea todo el territorio de la zona de estudio, evitando dejar zonas sin información donde la extrapolación de resultados a los puntos de la red fluvial no aforados sería menos precisa. Esta circunstancia nos llevaría a seleccionar el mayor número de estaciones de medida posible.

Obviamente, la selección final se realizará como un equilibrio entre los dos condicionantes anteriores, imponiendo a las estaciones seleccionadas una longitud mínima de registro que permita realizar estimaciones de los cuantiles suficientemente precisas, y que permita seleccionar el mayor número de estaciones posible de tal manera que los cuantiles obtenidos en el análisis estadístico tengan suficiente representatividad espacial. También con el objetivo de aumentar el número de estaciones disponible, y aunque el dato realmente necesario para el análisis es el caudal instantáneo, es decir, el máximo caudal alcanzado durante las crecidas, se ha decidido seleccionar también estaciones en las que en todo o en parte de su registro solo se disponía del caudal medio diario. En estos casos se han transformado los caudales medios diarios en sus correspondientes caudales instantáneos mediante el procedimiento que se expondrá más adelante. Esta decisión ha llevado a considerar también las series temporales medidas en los embalses (en los que únicamente se mide el caudal medio diario) y no sólo las registradas en las estaciones de aforo.

Otro aspecto a considerar es la posible alteración del funcionamiento natural de la cuenca por causas antrópicas, lo que provoca que el caudal medido sea el resultado de dichas



alteraciones y que, por tanto, difiera del que habría circulado por el río de no existir dichas causas. Dado que el objeto del análisis estadístico son las series de caudales máximos anuales, es decir, el máximo caudal que ha circulado por el río cada año, los caudales de mayor interés para el estudio son caudales importantes cuya alteración significativa no es, en general, fácil a pesar de la importante infraestructura hidráulica existente en las cuencas. En general, la única infraestructura hidráulica capaz de alterar de forma significativa los caudales de avenida son las presas de cierta importancia, por lo que es ese tipo de infraestructura la que hay que tener en cuenta para analizar la posible alteración del régimen natural de la cuenca.

Finalmente, el criterio empleado para seleccionar las estaciones de aforo y los embalses a considerar en el análisis estadístico ha sido el siguiente:

- Estaciones de aforo o embalses cuyo registro no afectado por la presencia de embalses aguas arriba tenga una longitud mínima de 20 datos anuales de caudal máximo medio diario o de caudal instantáneo.
- En zonas con poca densidad espacial de estaciones se ha rebajado la longitud mínima anterior, seleccionando también estaciones con una longitud mínima no alterada de entre 15 y 20 datos.

En aquellas estaciones con presencia de embalses aguas arriba se ha considerado que la alteración del registro de caudales máximos anuales no era significativa si se cumplía al menos una de las dos condiciones siguientes:

- El porcentaje de cuenca controlada por los embalses es menor del 10 %.
- El volumen total de embalse es menor del 10 % del volumen medio de las avenidas.

En el caso de la zona costera de la cuenca del Júcar, debido al escaso número de estaciones con caudales máximos instantáneos, y la dificultad para transformar los caudales medios diarios en instantáneos en una zona con un régimen hidrológico tan extremo, se han empleado adicionalmente datos procedentes de la red SAIH.

En la figura 1 se representa la situación geográfica de las estaciones y embalses seleccionados, en esta primera fase del trabajo, como resultado de la aplicación de los criterios anteriores.

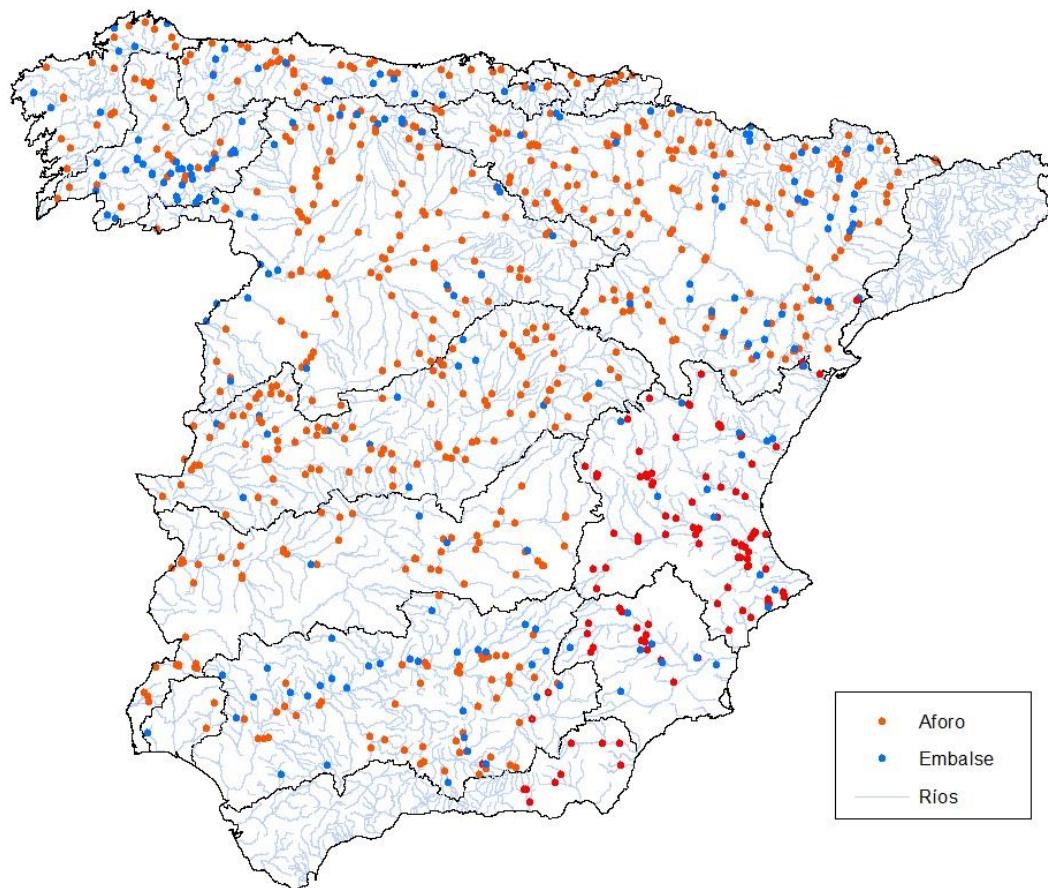


Figura 1. Estaciones y embalses seleccionados en una primera fase

3.2. REVISIÓN DE LA CALIDAD Y REPRESENTATIVIDAD DE LOS DATOS DE LAS SERIES TEMPORALES

Un aspecto que condiciona de forma crítica, junto con la longitud de la serie temporal, la precisión de los cuantiles obtenidos mediante el análisis estadístico es la calidad de los datos. Como es conocido, el procedimiento habitual de medida en las estaciones de aforo consiste en medir (mediante lectura en escalas, limnígrafos, etc.) el nivel alcanzado por el agua y deducir a partir de él el caudal mediante el uso de una curva de gasto, la cual representa la relación calado-caudal para esa sección del río. Lo más habitual es que la curva de gasto se obtenga mediante los denominados aforos directos, es decir, medidas directas del caudal circulante por el río (mediante el empleo de molinetes u otros procedimientos), realizadas en distintos momentos, y que junto con la medida del calado permite obtener diversos puntos de la curva. Finalmente, la curva de gasto se obtiene ajustando una determinada función matemática (por ejemplo, una función potencial) a los puntos.

Puesto que los aforos directos suelen realizarse cuando circulan por el río caudales bajos o moderados, no suele disponerse de información directa sobre la parte alta de la curva, la correspondiente a los caudales de mayor magnitud, por lo que es necesario estimarla extrapolando el ajuste realizado para la parte baja. Actualmente, la información sobre aforos directos se complementa con estudios hidráulicos del río para los caudales altos, lo que mejora espectacularmente el ajuste de la parte alta de la curva. Sin embargo, este tipo de estudios no está disponible para todas las estaciones de aforo y, aunque mejorarán la calidad de los registros futuros, no resuelven los problemas de calidad de las series históricas.



Esta circunstancia conlleva que los mayores errores en la medida de los caudales se cometan para los caudales más grandes, durante las avenidas, afectando de forma crítica a la calidad de los datos de las series de caudales máximos anuales. Por este motivo, se han llevado a cabo diversos procesos de revisión y contraste de la información para detectar aquellas estaciones con mayores problemas (en la totalidad o en parte de su registro) y proceder a su corrección o, de no ser posible, a eliminar la estación del análisis.

A continuación se detallan los procesos de revisión llevados a cabo:

- Identificación de tendencias temporales en la series

Una de las hipótesis básicas de la que parten los modelos estadísticos de máximos es suponer que cada uno de los datos de la serie corresponden a resultados independientes del fenómeno aleatorio objeto de estudio. De esta forma, los datos de las series temporales de máximos deberían ser independientes entre sí y en consecuencia, no deberían presentar ningún tipo de tendencia temporal. De hecho, la construcción de la serie temporal seleccionando únicamente el mayor caudal de cada año tiene como uno de sus objetivos garantizar (o casi garantizar) la independencia de los datos, puesto que los máximos caudales ocurridos en años hidrológicos diferentes, separados generalmente por intervalos temporales importantes, muy difícilmente serán dependientes entre sí.

Para identificar estas posibles tendencias temporales se ha aplicado el test estadístico de Mann-Kendall. Esto ha permitido detectar algunas estaciones de aforo con problemas en sus datos, habitualmente motivados por la existencia dentro de la serie temporal de dos o más períodos de cierta extensión con caudales de magnitud muy diferente entre sí. Este proceso ha llevado a corregir parte del registro temporal de algunas estaciones o a descartarlo en aquellos casos que esa corrección no ha sido posible.

La existencia de períodos temporales marcadamente diferentes dentro de las series tiene generalmente su origen en cambios en la curva de gasto a lo largo del tiempo, realizados con intención de ajustarla a nueva información sobre aforos directos. Estas revisiones son imprescindibles para adaptar las curvas a los pequeños cambios que se producen en los cauces como consecuencia de los procesos de erosión y sedimentación, pero en algunos casos esta mejora del ajuste en la parte baja de la curva provoca, al extrapolar, cambios importantes en la parte alta que en general no están justificados.

En la figura 2 se ilustra lo comentado anteriormente. Se ha representado, para las estaciones de aforos 3234 y 3163 de la cuenca del Tajo, el caudal acumulado de la serie temporal respecto al tiempo. En el caso de la estación 3163, que corresponde a una estación en la que no se han detectado tendencias temporales, se observa como la pendiente del gráfico no varía significativamente a lo largo del tiempo; por el contrario, en la estación 3234 se observa un cambio importante en la pendiente media del gráfico que distingue claramente dos períodos temporales con unos caudales máximos anuales medios muy diferentes.

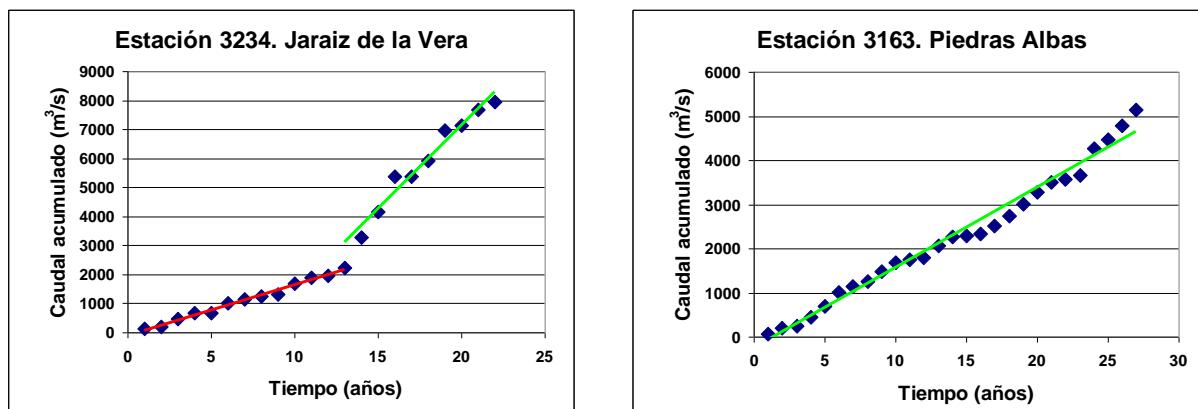


Figura 2. Ejemplos de estaciones con y sin tendencia temporal

- Identificación de inconsistencias entre los datos de distintas estaciones

Este proceso ha consistido en contrastar los datos de caudal máximo anual (tanto medio diario como instantáneo) de cada estación de aforos con los de aquellas otras estaciones situadas aguas arriba de la misma para los años de registro común. Aquellos casos en los que se han detectado medidas de caudal aguas arriba superiores a las registradas aguas abajo han sido objeto de un estudio detallado posterior para determinar las posibles causas de las inconsistencias. Sólo han sido objeto de análisis los casos en los que el caudal de aguas arriba era considerablemente superior al de aguas abajo, teniendo en cuenta que, en algunas circunstancias, el caudal de avenida puede reducirse hacia aguas abajo por efecto de la laminación en cauce.

Como resultado de este análisis se ha decidido descartar parte del registro de algunas estaciones de aforos e, incluso, el registro completo de otras por considerarlo poco fiable.

- Identificación de datos anómalamente altos (outliers)

Este proceso no pretende detectar deficiencias en la calidad de la información sino localizar aquellos datos singulares dentro de las series temporales poco representativos desde un punto de vista estadístico a la hora de realizar el ajuste de la ley de frecuencia.

De forma general, la frecuencia con la que se mide en una estación de aforos un determinado valor de caudal está relacionada con su probabilidad de ocurrencia, no siendo probable, por tanto, registrar dentro de un periodo temporal más o menos corto (lo habitual en la mayoría de las estaciones de aforo) caudales de elevada magnitud que sólo ocurren durante avenidas de alto periodo de retorno. Sin embargo, es posible que en algún caso, por azar, se registren caudales extraordinariamente altos cuya probabilidad de ocurrencia dentro del periodo temporal de registro sea muy pequeña. Lógicamente, la inclusión de estos datos en el análisis no representa adecuadamente las características estadísticas del proceso aleatorio, y supone alterar significativamente la magnitud de los estadísticos de la serie. Como ejemplo de este tipo de situaciones se han representado en la figura 3, sobre papel de probabilidad Gumbel, los datos de la estación 3172 de la cuenca del Tajo, frente a sus probabilidades muestrales. Se observa cómo el caudal más alto, correspondiente a la avenida extraordinaria del año 1990, se aleja de la tendencia marcada por la información restante. Es claro que su inclusión en el análisis estadístico desvirtuaría el ajuste de la ley de frecuencia.

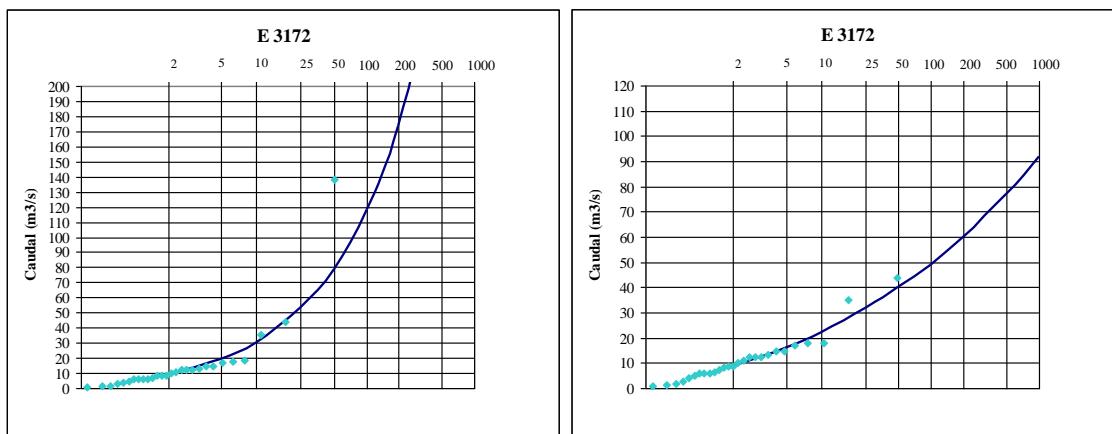


Figura 3. Ejemplo de serie de datos con un valor anómalamente alto (E3172). Comparación de probabilidades muestrales y leyes de frecuencia con y sin el valor anómalo.

Para detectar los datos anómalamente altos se ha empleado el procedimiento recomendado por el Water Resources Council (WRC) de EE.UU. (USWRC, 1981). Los datos identificados como anómalos mediante la aplicación del test anterior han sido eliminados de la serie sistemática. En aquellos casos en que se disponía de información suficiente como para considerar el dato anómalo como el máximo ocurrido en un determinado periodo temporal, ha sido introducido en el análisis estadístico considerándolo como información histórica.

- Identificación de estaciones discordantes

Tras la identificación de tendencias temporales y outliers en las series sistemáticas de datos observados, se identifican aquellas muestras que tienen unas características estadísticas significativamente diferentes al resto de las estaciones. La identificación se realiza mediante la medida de discordancia (D), basada en el análisis de los valores de los L-momentos (Hosking y Wallis, 1997). El análisis se debe realizar sobre un grupo considerable de estaciones, por ejemplo, una cuenca entera.

La medida D se fundamenta en la representación de los valores de los coeficientes de L-Momentos (t_2 , t_3 y t_4) de cada estación en un gráfico en tres dimensiones, obteniendo una nube de puntos. Se consideran como discordantes, aquellos puntos que se alejen de la nube o que tengan una distancia excesiva respecto de los valores medios de la misma.

3.3. TRANSFORMACIÓN DE DATOS DIARIOS EN INSTANTÁNEOS

Como se comentó anteriormente, y con el objetivo de aumentar el número de estaciones disponible para conseguir una mayor cobertura espacial de la zona en estudio y de disponer de series temporales más largas, que permiten mejorar la estimación de los cuantiles, se ha decidido seleccionar también estaciones en las que en todo o en parte de su registro solo se dispone del caudal medio diario. En estos casos ha sido necesario transformar los caudales medios diarios en sus correspondientes caudales instantáneos.

La única manera de conocer los caudales instantáneos con precisión es medirlos. Una vez que el caudal no ha sido medido o, aún habiéndolo sido, si la medida no ha sido conservada, cualquier intento de conocer el caudal instantáneo con posterioridad siempre dará un valor aproximado. No obstante, aunque la relación entre el caudal medio diario y el instantáneo es lógicamente variable de una avenida a otra, en la mayoría de las cuencas (con excepción quizás

de algunas cuencas del levante y del sureste de la península con un régimen hidrológico muy extremo) dicha relación suele ser más o menos constante o, al menos, se mueve en un rango de variación no muy amplio.

De esta forma, se puede obtener para cada estación un coeficiente (k) que, de forma aproximada, relacione los caudales medios diarios (Q_{md}) con los instantáneos (Q_i):

$$k = \frac{Q_i}{Q_{md}}$$

Dicho coeficiente se ha obtenido mediante dos procedimientos diferentes dependiendo de la cantidad de información disponible en cada estación. Si la estación de aforos dispone de información sobre caudales instantáneos en la mayoría de los años conteniendo solo algunas lagunas puntuales, el coeficiente se ha obtenido ajustando una regresión entre los valores de caudal medio diario e instantáneo en aquellos años en que se dispone de ambos tipos de información, aplicando el resultado para estimar el caudal instantáneo en aquellos años en que solo se dispone del caudal medio diario. Este es el caso, por ejemplo, de las estaciones 3254 y 2076, cuyas ecuaciones de regresión se muestran en la figura 4.

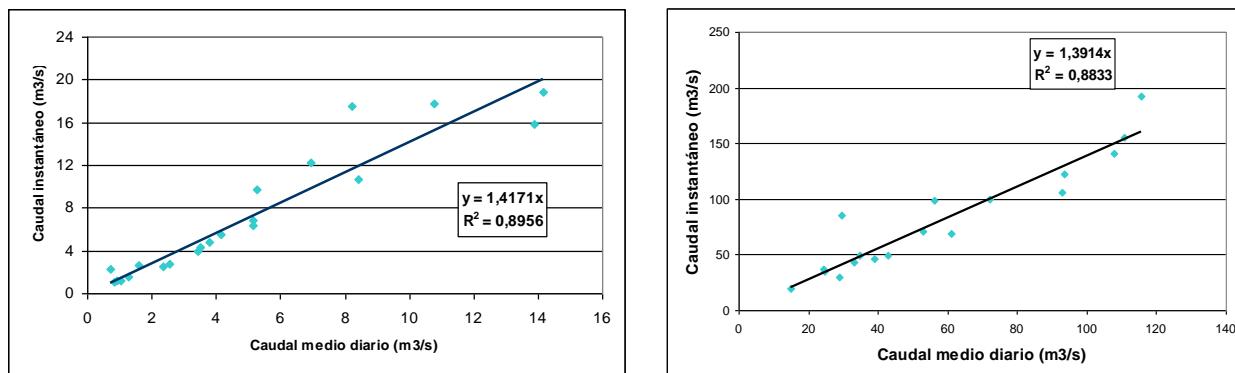


Figura 4. Regresión entre los caudales medios diarios e instantáneos en las estaciones de aforos 3254 y 2076.

En las estaciones de aforo en las que los caudales instantáneos eran desconocidos en la mayor parte o incluso en todo el registro, así como en los embalses, el coeficiente se ha obtenido mediante la aplicación de la fórmula de Fuller. Esta fórmula es quizás la más conocida de entre todas las expresiones matemáticas disponibles para transformar los caudales medios diarios en instantáneos, la cual hace depender la relación entre ambos caudales del área de la cuenca vertiente:

$$k = \frac{Q_i}{Q_{md}} = 1 + \frac{a}{A^b}$$

Donde A es el área de la cuenca vertiente en km^2 , y a y b parámetros de la fórmula. Según los trabajos realizados por Fuller, el parámetro a puede variar entre 2,5 y 6, y b tiene un valor en torno a 0,3.

Aunque Fuller aportó junto con su fórmula unos valores de referencia para los parámetros a y b , para su aplicación a este trabajo se ha realizado una calibración regional de dichos parámetros a partir de los coeficientes k obtenidos mediante regresión entre los caudales medios diarios e instantáneos en aquellas estaciones con suficiente información. Con esta finalidad, se han calculado también las regresiones entre ambos tipos de caudales en las estaciones en las que se conocía el registro completo de caudales instantáneos.



Para obtener el valor de los parámetros se ha expresado la fórmula de Fuller de la siguiente manera:

$$\log(k-1) = \log a - b \cdot \log A$$

Quedando una relación lineal entre el logaritmo de $k-1$ y el logaritmo del área. Representando gráficamente las parejas de valores $\log(k-1) - \log(A)$ de aquellas estaciones donde se conoce el coeficiente k , y ajustando una regresión lineal se pueden obtener los parámetros a y b para la región. En la tabla 1 se indican los parámetros de ajuste obtenidos para las distintas zonas consideradas. Estas zonas coinciden con las demarcaciones del Miño-Sil mas Galicia Costa, Cantábrico mas Cuencas Internas del País Vasco, Duero, Tajo, Guadalquivir y Segura, y con las siguientes zonas para el resto de las demarcaciones:

- Guadiana:
 - Zona 1: Cabecera del Guadiana hasta el río Jabalón incluido.
 - Zona 2: Afluentes del río Guadiana por su margen izquierda aguas abajo del río Olivenza y ríos Tinto y Odiel.
 - Zona 3: Resto de la cuenca del río Guadiana.
- Ebro:
 - Zona 1: Cabecera del Ebro hasta los ríos Arga en la margen izquierda y Queiles en la derecha, incluidos.
 - Zona 2: Resto de la cuenca del Ebro por la margen izquierda.
 - Zona 3: Resto de la cuenca del Ebro por la margen derecha.

En la demarcación del Júcar sólo se ha ajustado la ecuación en la zona correspondiente a las cabeceras del río Júcar (hasta la confluencia con el río Cabriel) y Turia (hasta el embalse de Benageber), debido a la gran variabilidad existente en la relación entre caudales medios diarios e instantáneos en las cuencas más próximas a la costa.

Tabla 1. Parámetros de las ecuaciones de Fuller

$$Q_i = \left(1 + \frac{a}{A^b}\right) Q_{md}$$

| REGIÓN | a | b |
|-------------------------------------|--------|-------|
| Miño-Sil + Galicia Costa | 1.81 | 0.23 |
| Cantábrico + C.I. País Vasco | 3.1 | 0.26 |
| Duero | 1.78 | 0.29 |
| Tajo | 5.01 | 0.38 |
| Guadiana | | |
| - Zona 1 | 35.89 | 0.72 |
| - Zona 2 | 112.82 | 0.7 |
| - Zona 3 | 11.56 | 0.42 |
| Guadalquivir | 7.985 | 0.436 |
| Júcar | 20.87 | 0.51 |

| | | |
|---------------|--------|------|
| Segura | 145.85 | 0.75 |
| Ebro | | |
| - Zona 1 | 2.49 | 0.36 |
| - Zona 2 | 3.39 | 0.29 |
| - Zona 3 | 37.73 | 0.55 |

3.4. SELECCIÓN DE PUNTOS AFORADOS

Como consecuencia del proceso anteriormente descrito, de depuración y filtrado de posibles errores y datos anómalos en las estaciones que cumplían las condiciones de partida, se obtiene un conjunto de puntos de control formado por estaciones de aforo y embalses, cuyos registros constituyen la información seleccionada para el presente trabajo. En la siguiente figura aparecen representados los puntos de control seleccionados localizados en el territorio.

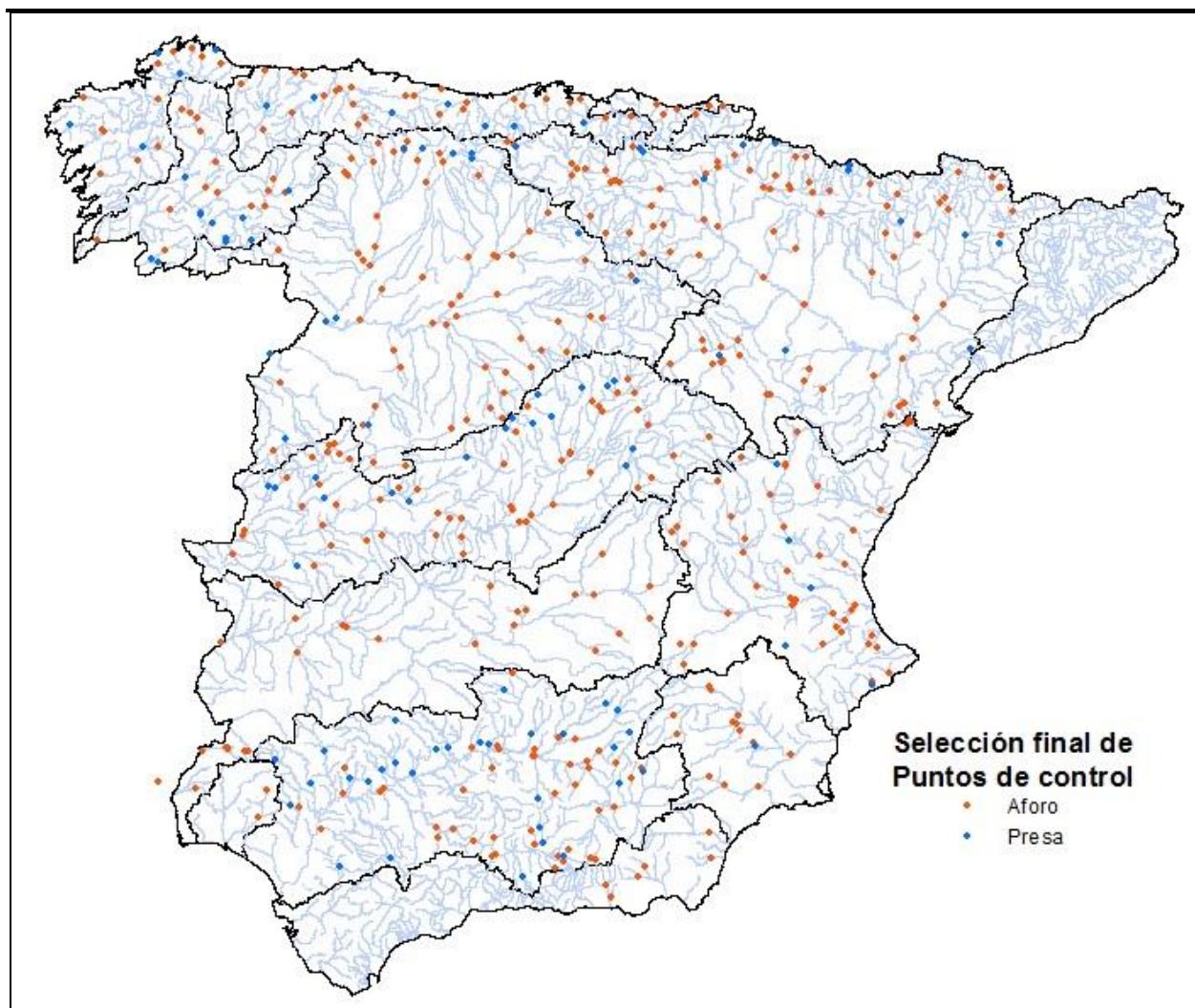


Figura 5. Puntos de control seleccionados

4. CÁLCULO DE LOS CUANTILES EN LOS PUNTOS AFORADOS

4.1. SELECCIÓN DEL TIPO DE FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN Y DEL PROCEDIMIENTO DE AJUSTE

Una de las partes fundamentales del trabajo es la estimación de los cuantiles de caudal máximo en las estaciones de aforo seleccionadas. Obviamente, dicha estimación debe ser lo más precisa posible puesto que constituye la base sobre la que se apoya todo el trabajo, dependiendo en gran medida la precisión de los mapas de la precisión conseguida en dicha estimación. El cálculo de los cuantiles se realiza ajustando una función de distribución a las series temporales de caudales máximos anuales registradas en las estaciones de aforo por lo que es imprescindible analizar qué tipo de función de distribución es la que mejor representa las características estadísticas de las series y, por lo tanto, permite realizar una mejor estimación de los cuantiles.

Como es sabido, el error en la estimación aumenta al aumentar el periodo de retorno del cuantil estimado, siendo mayor el error cuanto menor es la longitud de la serie temporal disponible. Dicha incertidumbre es especialmente importante en aquellos casos en los que es necesario emplear funciones de distribución de tres o más parámetros, puesto que en esos casos la

forma de la ley de frecuencia viene determinada por el valor de los momentos estadísticos de tercer o cuarto orden (relacionados con los coeficientes de sesgo y de curtosis) que deben estimarse a partir de la muestra. Como puede observarse en las figuras adjuntas, obtenidas a partir del análisis de unas 1000 series temporales de diferentes longitudes generadas mediante simulaciones de Monte Carlo, asumiendo una función de distribución de Valores Extremos Generalizada de media unidad y unos valores de L-coeficiente de variación y L-coeficiente de sesgo de 0,40 y 0,25 respectivamente (valores típicos en la cuenca del Tajo, seleccionada para elaborar este ejemplo), la incertidumbre asociada a la estimación de los momentos estadísticos está relacionada con la longitud de la muestra disponible y, para una misma longitud de muestra, es mayor cuanto mayor es el orden del momento a estimar. De esta forma, se requiere disponer de menos datos para estimar la media o el coeficiente de variación de la población, que para estimar el coeficiente de sesgo o la curtosis.

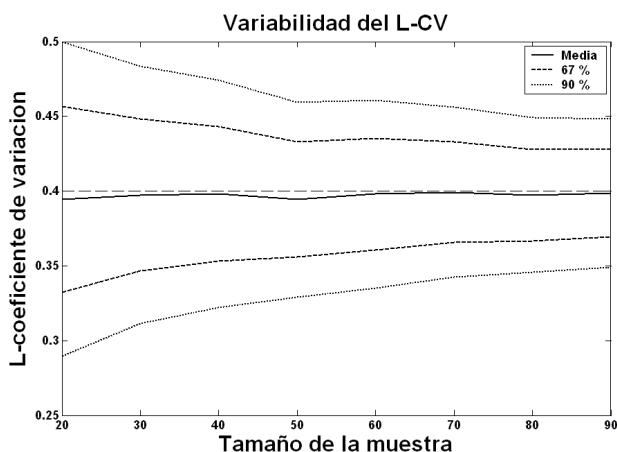


Figura 6. Media e intervalos de confianza del 67 y 90 % de la estimación del L-coeficiente de variación en función del tamaño de la muestra.

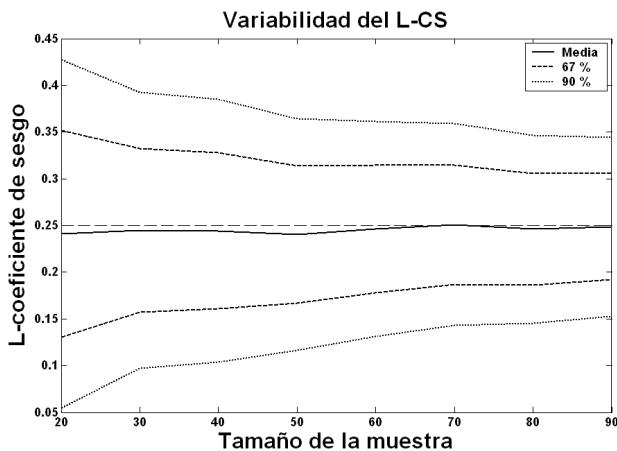


Figura 7. Media e intervalos de confianza del 67 y 90 % de la estimación del L-coeficiente de sesgo en función del tamaño de la muestra.

Los comentarios anteriores ilustran el marco teórico en el que surge el uso de las técnicas estadísticas de regionalización, las cuales tratan de mejorar el ajuste de las funciones de distribución (fundamentalmente en aquellos casos en que se dispone de series temporales de escasa longitud) obteniendo una estimación más precisa de los momentos estadísticos de mayor orden al emplear conjuntamente la información contenida en todas las estaciones de aforos existentes en una determinada región con comportamiento estadístico homogéneo.



El análisis realizado se ha dividido en dos partes. Se ha analizado, por una parte, la capacidad descriptiva de cada modelo, es decir, la capacidad de la ley de frecuencia estimada mediante un modelo determinado para ajustarse a los datos de la muestra. Lógicamente este análisis se ha centrado en la comparación de los cuantiles de bajo periodo de retorno estimados mediante el modelo con la estimación realizada directamente a partir de los datos mediante fórmulas de gráfico. Posteriormente, se ha realizado el análisis de la capacidad predictiva de los distintos modelos. En este análisis, realizado mediante simulaciones de Monte Carlo, se ha pretendido evaluar la eficiencia y robustez del modelo para extraer correctamente la ley de frecuencia a altos periodos de retorno, determinando el sesgo y la varianza de la estimación de los cuantiles realizada a partir de distintas muestras generadas aleatoriamente.

Previamente al análisis, se ha realizado un estudio para la identificación de regiones estadísticamente homogéneas en el territorio de la España peninsular sobre las cuales realizar el análisis. Esta identificación se ha realizado siguiendo principalmente criterios geográficos, a partir de la orografía de la cuenca, la altitud, el régimen de lluvias y el valor de los cuantiles de precipitación más altos, etc., comprobando posteriormente mediante tests estadísticos de homogeneidad lo adecuado de dicha identificación.

4.1.1. Identificación de regiones homogéneas

Previamente al análisis, se ha realizado un estudio para la identificación de regiones estadísticamente homogéneas. Las regiones homogéneas se han identificado siguiendo criterios geográficos, a partir de la orografía de la cuenca, la altitud, el régimen de lluvias y el valor de los cuantiles de precipitación más altos. Este método tiene la ventaja de facilitar la asignación de una región a un punto determinado, ya que las regiones están delimitadas perfectamente por los accidentes geográficos de las cuencas.

La identificación de una región como homogénea debe ser comprobada mediante medidas que analizan la homogeneidad estadística de las muestras. Se han utilizado dos tests para cuantificar el grado de homogeneidad de las regiones, el test de Wiltshire, basado en los momentos ordinarios, y el test de Hosking y Wallis, basado en los L-momentos. En función de los resultados obtenidos, se ha decidido adoptar un valor regional únicamente para el coeficiente de sesgo, determinando el coeficiente de variación a partir de la información local.

Las regiones consideradas se representan en la figura 8. Cada región se identifica mediante un código numérico cuyo primer dígito es el propio de la gran cuenca a la que pertenece, completamente o en su mayor parte. El segundo dígito numera las regiones en las que está dividida la gran cuenca de forma consecutiva.

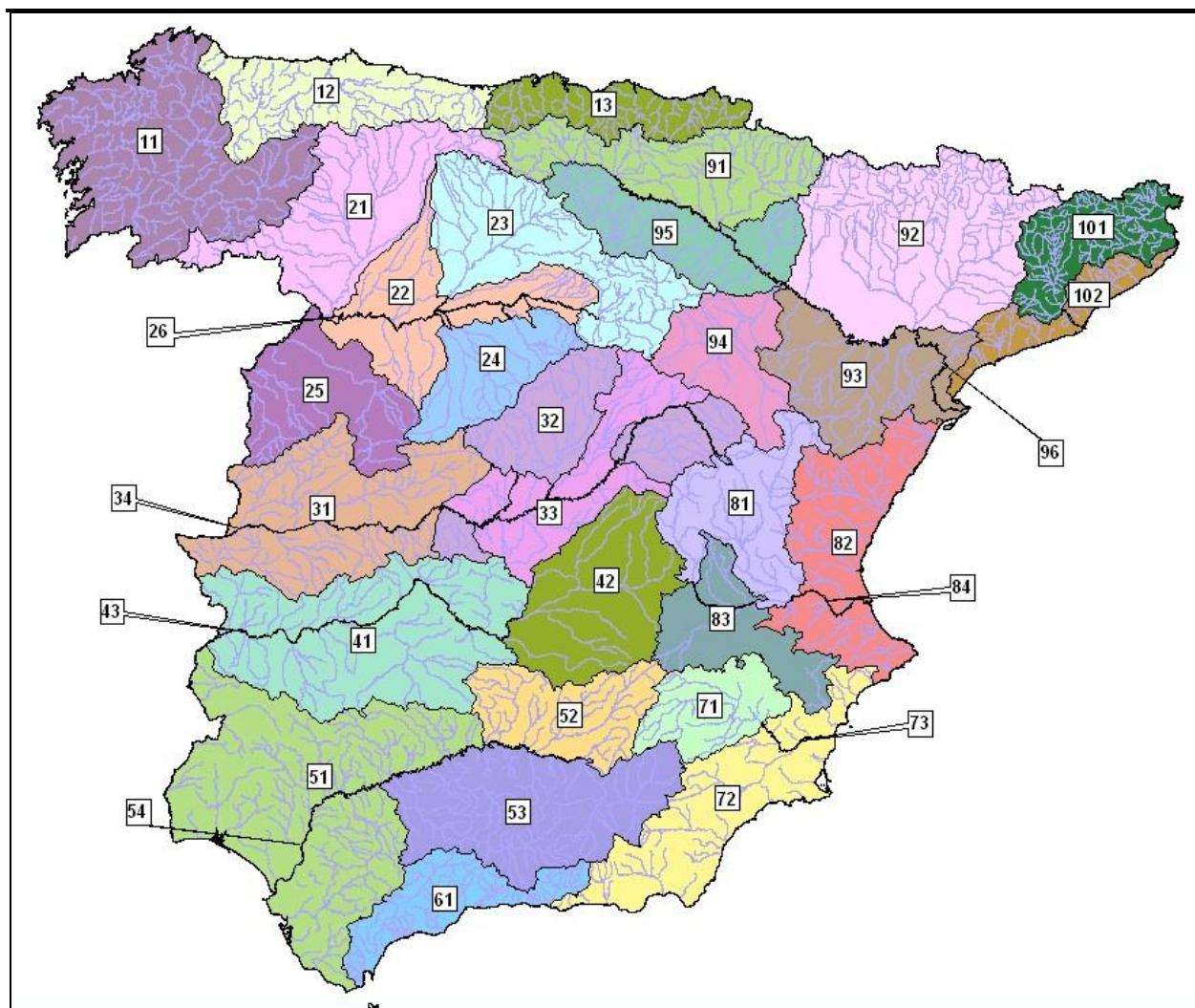


Figura 8. Regiones con homogeneidad estadística identificadas.

Como se muestra en las regiones representadas en la figura anterior, se han considerado de forma independiente los siguientes tramos de los grandes ejes fluviales:

- Duero, desde su confluencia con el río Chico (región 26).
- Tajo, desde su confluencia con el río Arlas (región 34).
- Guadiana, desde su confluencia con el río Bañuelo (región 43).
- Guadalquivir, desde su confluencia con el Guadiana menor (región 54).
- Ebro, desde su confluencia con el río Zadorra (región 96).

Por otra parte, los tramos finales de los ríos Segura y Júcar (desde la confluencia con la Rambla de Benito el primero y desde la confluencia con el barranco del Agua en el caso del segundo) tienen un comportamiento intermedio entre los de las regiones 71 y 72, y 81 y 82, respectivamente (regiones 73 y 84).

4.1.2. Análisis de las funciones de distribución y procedimientos de ajuste

Una vez identificadas las estaciones que están incluidas en cada una de las regiones consideradas y que se van a emplear en el estudio, se aborda el análisis de la función de distribución y el procedimiento de ajuste que mejor describe el comportamiento de los caudales máximos anuales. Existen diversas funciones de distribución con aplicación a la estimación de la ley de frecuencia de caudales máximos. La selección de la ley de frecuencia que mejor



representa el comportamiento hidrológico de una región no es sencilla. Por una parte, se debe analizar la capacidad descriptiva de la función, es decir la capacidad de la función para ajustarse con precisión a la distribución de caudales observados. Por otra, se debe analizar la capacidad de predicción, es decir, la robustez de la función para estimar los cuantiles asociados a los mayores períodos de retorno, en los que normalmente no se tiene información observada ya que no se dispone de series lo suficientemente largas.

En primer lugar, se ha analizado el ajuste de las diferentes funciones de distribución a los datos observados en las estaciones de cada región. En cada una de las estaciones, se han ajustado las diferentes funciones consideradas mediante los diferentes métodos de ajuste (momentos (Mom), L-momentos (L-Mom) y máxima verosimilitud (ML)) y se ha cuantificado el error existente entre los datos observados y dichas funciones. Los ajustes de las funciones se realizan utilizando únicamente la información local sin la aplicación de ningún método de regionalización.

A los datos observados se les ha asignado probabilidad mediante la fórmula de Gringorten:

$$F(y_i) = \frac{i - 0.44}{n + 0.12}$$

siendo i el puesto que ocupa el dato en la serie ordenada de menor a mayor, y n el número total de datos de la serie.

Posteriormente se han obtenido los caudales proporcionados por cada función de distribución ajustada para las mismas probabilidades que se han asignado a los datos observados. A partir de estos datos, el error de cada función en una estación se ha medido como el valor medio de las distancias adimensionales entre cada uno de los caudales observados en la estación y el valor del cuantil dado en dichos puntos por la función ajustada:

$$e_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_{obs})_i - (Q_{est})_i}{(Q_{obs})_i}$$

donde n es el número de datos en la estación. El error de cada función se ha calculado como la media de los errores absolutos de todas las estaciones existentes en la región (MAE).

Para este análisis se han considerado las siguientes funciones de distribución:

- Gumbel por Mom, L-Mom y ML
- Valores Extremos Generalizada (GEV) por Mom, L-Mom y ML
- Log-Normal de 2 parámetros (LN-2) por Mom, L-Mom y ML
- Log-Normal de 3 parámetros (LN-3) por Mom, L-Mom y ML
- Pareto Generalizada (GP) por Mom, L-Mom y ML
- Logística Generalizada (GLO) por Mom, L-Mom y ML
- Log-Pearson Tipo 3 (LP-III) por Mom y L-Mom
- Pearson Tipo 3 (PE-III) por Mom y L-Mom.

En las figuras adjuntas, a modo de ejemplo, se representan los resultados para las estaciones con más de 50 datos en la región 92, correspondiente a la cuenca del río Segre.

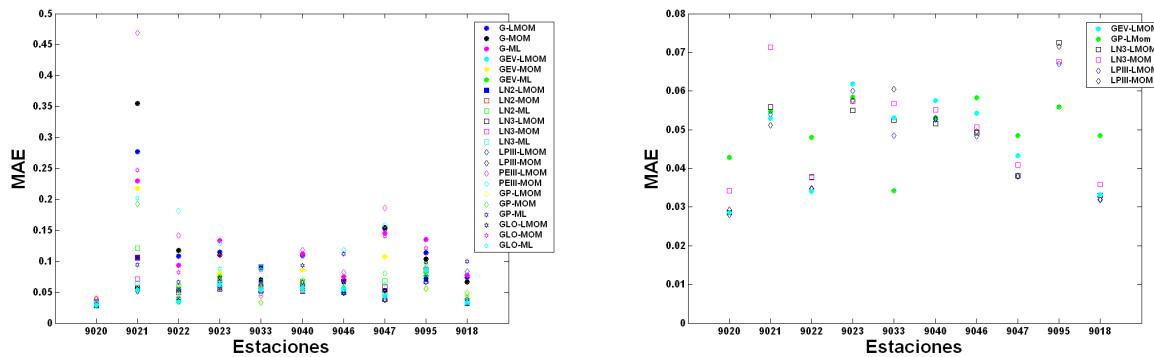


Figura 9. Error en el ajuste a los datos observados: región 92.

De los resultados se desprende que una de las parejas función de distribución – procedimiento de ajuste que presenta errores menores en las todas las regiones es la función GEV ajustada mediante L-momentos. En algunos casos otras funciones como la LPIII ajustada mediante el método de los momentos o la función GP mediante L-momentos, presentan un mejor ajuste a los datos pero, en general, realizan una extrapolación muy deficiente a altos períodos de retorno al adoptar, en muchos casos, formas convexas.

Junto con el análisis de la capacidad descriptiva expuesto anteriormente, se ha realizado un análisis de la capacidad predictiva de las distintas funciones y procedimientos de ajuste, es decir, un análisis de su precisión en la extrapolación a los períodos de retorno más altos a partir de muestras de escasa longitud.

Antes de abordar el análisis del comportamiento predictivo de las distintas funciones, se ha comprobado que el esquema de regionalización adoptado es capaz de reproducir en cada región unas características estadísticas similares a las que tienen los datos observados. Para evaluar esta similitud estadística se ha utilizado un método basado en simulaciones de Monte Carlo, generando regiones sintéticas similares a la región observada. Cada región sintética estará compuesta por un número de estaciones igual al de la región observada y cada estación tendrá un número de datos sintéticos igual al número de datos sistemáticos observados en la estación real que está representando. Las series sintéticas se han generado mediante las funciones y procedimientos de ajuste que han demostrado tener un mejor comportamiento al analizar la capacidad descriptiva.

Las características estadísticas de las regiones sistemáticas generadas han sido comparadas con las características de los datos observados en la región, mediante su representación en un papel probabilístico Gumbel. Para ello se han seleccionado las siguientes características estadísticas:

- Coeficiente de variación de las series
- Coeficiente de sesgo de las series
- Máximo valor estandarizado
$$Y_n = \frac{X_n - \bar{X}}{S}$$
; donde X_n es el máximo valor para la muestra n , \bar{X} es el valor medio de la muestra y S es la desviación típica de la muestra.

- L-coeficiente de variación
- L-coeficiente de sesgo

A continuación, a modo de ejemplo, se muestran los resultados obtenidos para la región 92:

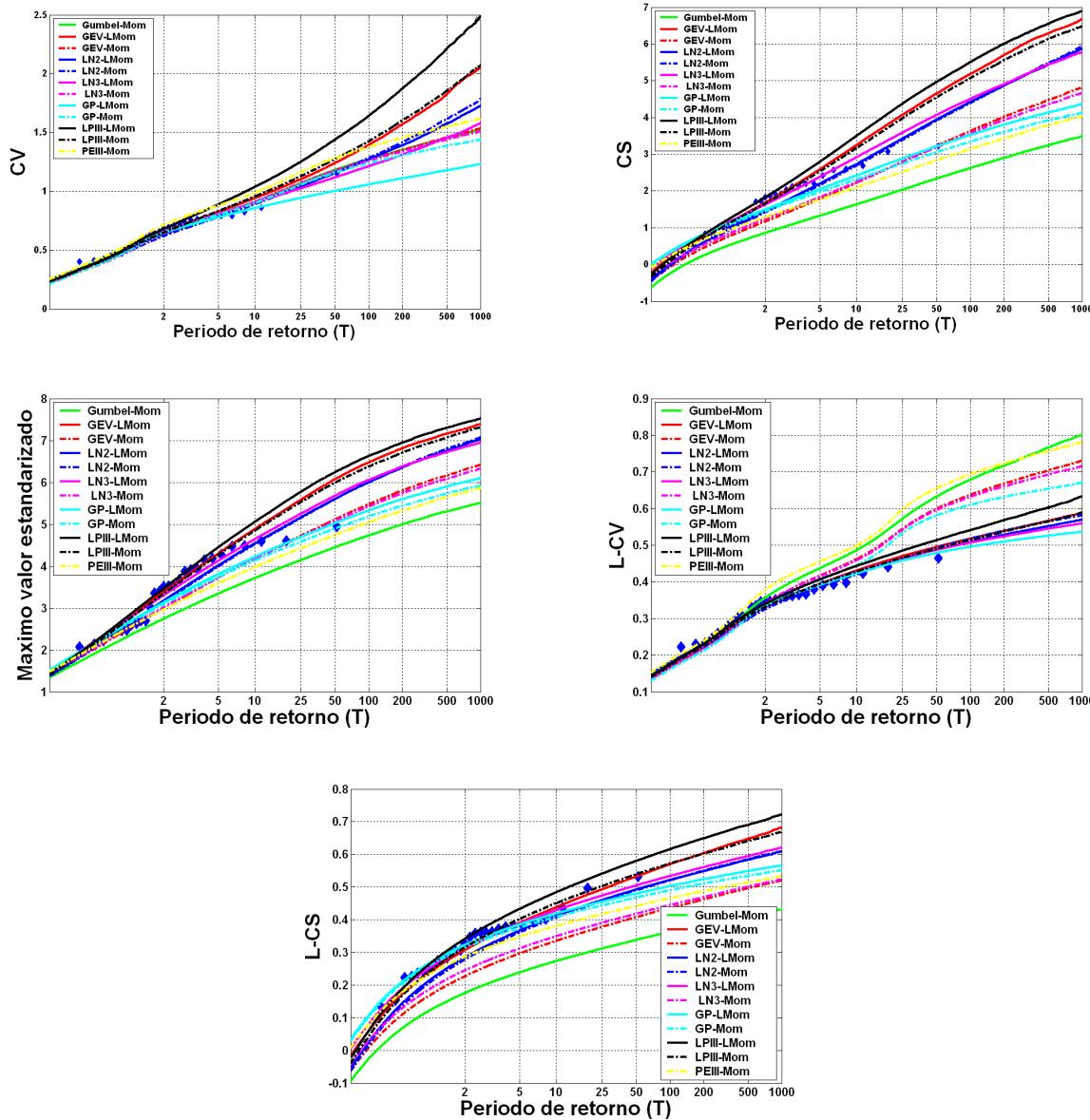


Figura 10. Contraste entre la distribución muestral de diferentes estadísticos en la región y las obtenidas mediante generación de regiones sintéticas: Región 92.

Los resultados muestran que el patrón de regionalización adoptado es capaz de reproducir con bastante precisión la distribución en la región de los estadísticos considerados. Se puede considerar, por tanto, que los resultados que se obtengan a partir de las simulaciones matemáticas reflejarán adecuadamente el comportamiento real de la región. No obstante, en cada región hay una serie de funciones de distribución y procedimientos de ajuste que son los que mejor reproducen el comportamiento de los distintos estadísticos. Estas funciones y procedimientos de ajuste han sido los utilizados al analizar el comportamiento predictivo de las funciones de distribución en cada región.

Este análisis se ha realizado para los períodos de retorno superiores a 100 años. Para ello, se ha utilizado la función kappa de 4 parámetros, más general que todas las utilizadas, para realizar el ajuste en cada una de las estaciones, tomando este ajuste como base de comparación para el resto de funciones. Esta función se ha ajustado en cada estación con los valores regionales del L-coeficiente de sesgo (L-Cs) y la L-curtoza (L-Ck), y los valores locales de la media y el L-coeficiente de variación (L-Cv). Mediante la función kappa ajustada en cada estación, se han generado regiones sintéticas similares a la observada, es decir, con un



número de datos en cada estación similar al número de datos observados en las estaciones de la región real. Se han ajustado en cada región las funciones seleccionadas en los apartados anteriores a cada una de las series sintéticas generadas, tomando el valor regional del L-Cs de cada región sintética y valores locales de la media y el L-Cv.

En cada estación de la región (i), y para cada periodo de retorno (T) se ha calculado el valor medio de los errores, entre el valor ajustado mediante la función utilizada y el cuantil dado mediante el ajuste con la función kappa, es decir, el error medio o sesgo ($MET_{T,i}$), y la varianza de los mismos ($VART_{T,i}$), obteniendo el error cuadrático medio ($MSET_{T,i}$) como la suma de ambos:

$$MSET_{T,i} = VAR_{T,i} + [MET_{T,i}]^2$$

Para comparar los resultados en las diferentes estaciones con diferentes valores de caudal, necesitamos estandarizar los errores. Para ello, primero se calcula la raíz cuadrada del MSE (RMSET_{T,i}), obteniendo un valor del error con la misma unidad de medida que el caudal. En segundo lugar se divide por el cuantil sobre el que se ha realizado la comparación ($Q_{T,i}$) para obtener el error adimensional en el periodo de retorno, T, de cada estación, i:

$$RMSE_{T,i} = \sqrt{MSET_{T,i}}$$

$$e_{T,i} = \frac{RMSE_{T,i}}{Q_{T,i}}$$

El resultado del error sobre toda la región, para cada periodo de retorno, se obtiene como el valor medio de todas las estaciones (ET) sobre el número de estaciones (N) que componen la región:

$$E_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_{T,i}$$

En la figura adjunta se muestran los resultados obtenidos para la ya mencionada región 92.

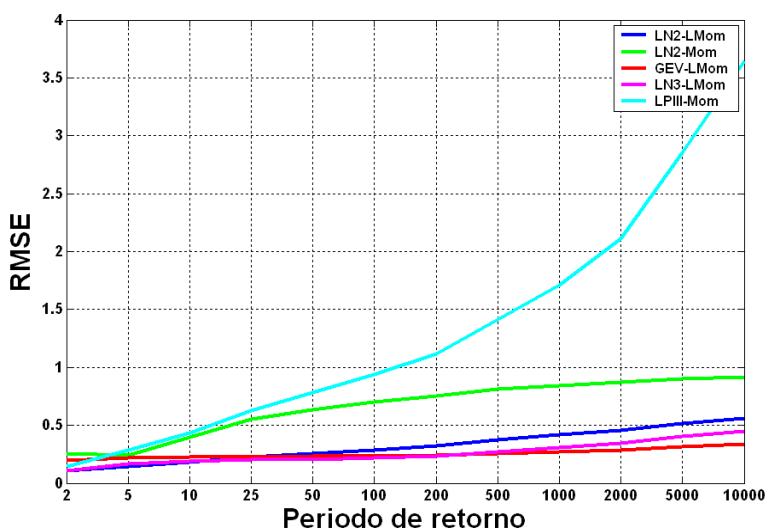


Figura 11. Análisis de la capacidad predictiva de las distintas funciones y procedimientos de ajuste: Región 92.



De los análisis realizados se concluye que la combinación de función de distribución y procedimiento de ajuste que presenta un mejor comportamiento al extrapolar a altos períodos de retorno en el conjunto de todas las regiones es la función GEV ajustada mediante L-momentos.

4.1.3. Función de distribución y procedimiento de ajuste seleccionado

Como resultado de los estudios y análisis anteriores, se ha decidido realizar los ajustes de las leyes de frecuencia empleando la función de valores extremos generalizada (GEV) ajustada mediante el método de los L-momentos (L-Mom), asumiendo un valor regional para el L-coeficiente de sesgo en cada una de las regiones estadísticamente homogéneas, y tomando el valor local para el L-coeficiente de variación.

Como casos especiales, se ha decidido utilizar una función Gumbel (caso particular de la GEV) ajustada por el procedimiento de los L-momentos en las regiones 21 y 23 de la cuenca del Duero y el eje principal del Ebro hasta la confluencia con el Segre, y una función TCEV en las regiones situadas en el levante y sureste peninsular (regiones 72, 73, 82 y 84).

El ajuste de la función TCEV presenta una gran dificultad ya que la segunda rama de la función corresponde a eventos de baja probabilidad de ocurrencia, por lo que no suelen estar suficientemente representados en muestras de escasa longitud como las habitualmente existentes. De esta forma es imprescindible recurrir a datos sobre avenidas históricas para ajustar la segunda rama de la función. En aquellos casos en los que no se dispone de ese tipo de información, el ajuste de la función presenta una elevada incertidumbre. Con objeto de reducir esa incertidumbre se ha desarrollado un procedimiento de ajuste consistente en ajustar cada rama de la función, correspondiente a una función Gumbel, de manera independiente, obteniendo posteriormente la función conjunta mediante el producto de las dos funciones Gumbel.

La primera rama de la función se puede estimar mediante el ajuste local de una función Gumbel a los datos de la muestra mediante el método de los L momentos, obteniendo sus parámetros u_1 y a_1 . La estimación de los otros dos parámetros de la TCEV (u_2 , a_2), correspondientes a la segunda función Gumbel (segunda rama de la función), se realiza asumiendo un valor regional del L-Cv de la segunda rama $[(t_2)_2]$, y estimando el valor de la media $[(\lambda_1)_2]$, mediante una regresión con los estadísticos correspondientes a la primera rama $(\lambda_1)_1$ y $(t_2)_1$ (tabla 2):

$$(\lambda_1)_2 = -10^a (\lambda_1)_1^b (t_2)_1^c$$

Tabla 2. Expresiones algebraicas y parámetros para ajuste de la función TCEV

| Región | L-Cv | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> |
|---------|-------|----------|----------|----------|
| 72 y 73 | -0,26 | 1,5846 | 1,2280 | 0,8554 |
| 82 y 84 | -0,24 | 2,6039 | 0,5659 | 0,6861 |

En la tabla adjunta se resumen las funciones de distribución seleccionadas para cada una de las regiones estadísticas consideradas.



Tabla 3. Funciones de distribución utilizadas en cada región estadística.

| Región | Función | Región | Función |
|--------|---------|--------|------------|
| 11 | GEV | 53 | GEV |
| 12 | GEV | 54 | GEV |
| 13 | GEV | 61 | GEV |
| 21 | Gumbel | 71 | GEV |
| 22 | GEV | 72 | TCEV |
| 23 | Gumbel | 73 | GEV - TCEV |
| 24 | GEV | 81 | GEV |
| 25 | GEV | 82 | TCEV |
| 26 | GEV | 83 | GEV |
| 31 | GEV | 84 | TCEV |
| 32 | GEV | 91 | GEV |
| 33 | GEV | 92 | GEV |
| 34 | GEV | 93 | GEV |
| 41 | GEV | 94 | GEV |
| 42 | GEV | 95 | GEV |
| 43 | GEV | 96 | Gumbel-GEV |
| 51 | GEV | 101 | GEV |
| 52 | GEV | 102 | GEV |

4.2. INFORMACIÓN HISTÓRICA EMPLEADA EN EL AJUSTE DE LAS LEYES DE FRECUENCIA

Como se comentó en el apartado anterior, la precisión con la que se estiman los cuantiles de más alto periodo de retorno, es decir la cola derecha de la distribución, mediante ajuste de una función de distribución a la series de caudales máximos anuales de las estaciones de aforo es, en general, pequeña dada la limitada cantidad de información habitualmente disponible. Los cuantiles de alto periodo de retorno, dada su pequeña probabilidad de ocurrencia, no estarán suficientemente representados en una muestra de pequeña longitud.

Según lo expuesto en el apartado anterior, una forma de aumentar la precisión consistiría en reducir la incertidumbre con que se estiman los momentos estadísticos de mayor orden mediante el empleo de información regional. Otra posible forma es emplear en el análisis estadístico información sobre grandes avenidas ocurridas en el pasado mucho antes de que se iniciase la medida sistemática de los caudales y, por tanto, no registrada en las estaciones de aforo. Esta información tiene el inconveniente de ser incompleta y requerirá de técnicas especiales para ser introducida en el análisis, pero tendrá un gran valor para mejorar la estimación de la cola derecha de la distribución al aportar datos directos sobre el comportamiento de la población en ese rango de probabilidades.

Esta última opción es, en general, preferible a la regionalización puesto que proporciona directamente información sobre la magnitud de los caudales de pequeña probabilidad, pero tiene el inconveniente de que no siempre se dispone de información sobre las grandes avenidas históricas o, incluso existiendo información, no siempre se dispone de estimaciones de los caudales o no se cuenta con suficiente información para asignarle probabilidad al evento.

La información disponible sobre eventos de crecida anteriores al periodo de registro sistemático en las estaciones de aforo (información no sistemática) es obviamente incompleta y se refiere sólo a los grandes eventos que por sus características o magnitud han dejado alguna huella



bien en la memoria histórica bien en la naturaleza. En cuanto a su origen hay dos tipos fundamentales de información no sistemática:

- Información histórica documental
- Paleocrecidas

La información histórica documental se refiere a aquellas avenidas que por la magnitud de los daños que causaron han quedado registradas de forma escrita en archivos de iglesias, monasterios, ayuntamientos, etc. Habitualmente contienen información sobre la zona inundada, daños producidos, niveles alcanzados por el agua, etc. Esta última información puede emplearse para deducir mediante modelos hidráulicos un valor aproximado de caudal punta de la avenida.

La estimación del caudal de las crecidas históricas puede ir acompañada de bastante error debido a que las referencias de niveles suelen ser poco precisas y se desconoce la morfología del cauce en el momento que ocurrió la crecida. No obstante, a pesar de la incertidumbre asociada a los datos históricos, diversos estudios han demostrado que su consideración aumenta en gran medida la precisión de la estimación de los cuantiles de alto periodo de retorno.

Las paleocrecidas se refieren a aquellas avenidas ocurridas en el pasado y de las cuales se tiene noticia por las huellas que han dejado en la naturaleza. Este rastro dejado en la naturaleza puede consistir en evidencias de tipo botánico como marcas por erosión en los troncos de los árboles, anomalías en los anillos, etc. Más frecuente es obtener información mediante datos geológicos como marcas por erosión en las rocas, depósitos de sedimentos, etc.

La información sobre avenidas históricas recopilada para la elaboración del mapa de caudales máximos ha sido de carácter documental, habiéndose consultado las siguientes fuentes de información principales:

- “Estudio de Inundaciones Históricas. Mapas de Riesgos Potenciales. Cuenca del Norte, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Sur, Segura, Júcar y Ebro”. Comisión Nacional de Protección Civil. 1983. “*Tomando el pulso a las grandes crecidas de los ríos peninsulares*”.
- A. López Bustos. Revista de Obras Públicas. Marzo 1981. Pág. 179 - 192.
- “*Flood sensitivity in Spain*”. G. Benito.
- “Las catástrofes hidrológicas en España y el cambio climático”, J.R. Gómez Peláez, Revista de Obras Públicas, junio 2006, pag. 7-11.
- “Dams outlets capacity and location”, A. del Campo et al., Congreso Internacional de Grandes Presas, Madrid, 1973.
- “Crecidas extraordinarias del río Duero”. Javier R. Marquina. Revista de Obras Públicas, Mayo 1949, Pág. 202 – 213.
- “Historical investigation as a necessary complement for determining maximum flood (applied to the Duero basin)”. A. Galíndez et al., Congreso Internacional de Grandes Presas, Estambul, 1967.
- “Reconstrucción del registro de paleocrecidas del río Huebra, cuenca del Duero”. Convenio de colaboración entre CEDEX y CSIC. Enero 2007.
- “*La cuenca del Tajo en cifras*”. Confederación Hidrográfica del Tajo. Ministerio de Medio Ambiente.
- “*Encauzamiento del río Tajo en Aranjuez. Estudio en modelo reducido con lecho móvil*”. CEDEX. 1975.



- *“Magnitude and frequency of flooding in the Tagus basin over the last millennium”*. G. Benito, A. Diez, M. Fernandez. Climatic Change 58. Pág. 171 – 192. 2003.
- “Río Guadiana: As cheias históricas, 1500-2004”, Joao Mimoso Loureino. Décimas Jornadas de historia de Ayamonte, 2006.
- “Datos para una historia de las crecidas del río Guadalquivir”, A. López Bustos, Revista de Obras Públicas, Agosto, 1985. Pág. 643-654.
- “L’Hydrologie du bas Guadalquivir”, Jean-Rene Vannéy. Instituto de Geografía aplicada del Patronato “Alonso de Herrera”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- “Estudio Hidráulico del río Guadalquivir y delimitación de la zona de Dominio Público y de las zonas inundables” (1995), Apéndice 2 del Anejo 1:
 - Análisis pormenorizado de las avenidas en Córdoba y Sevilla, Leandro del Moral Ituarte.
 - Recopilación de información histórica, Leandro del Moral Ituarte.
- “La obra hidráulica en la cuenca baja del Guadalquivir (siglos XVIII-XX)”. Leandro del Moral Ituarte.
- “Historia crítica de las riadas de Sevilla”. Francisco de Borja Palomo.
- “Transformaciones recientes en la margen izquierda de las marismas del Guadalquivir”, Antonio Rodríguez Sierra.
- ABC, “Grandes daños en la cuenca del Guadalquivir a causa de las lluvias caídas en su cabecera”, 1 de Noviembre de 1973.
- La Vanguardia, “Andalucía sufre grandes inundaciones”, 19 de Febrero de 1963.
- Diario de Sevilla, “La ciudad amurallada”, 11 de Marzo de 2001.
- El Diario de Córdoba, “Cuando el río desborda”, 28 de Febrero de 2010.
- “Inundaciones catastróficas, precipitaciones torrenciales y erosión en la provincia de Murcia”, F. López Bermúdez et al., Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Murcia, 1978-1979.
- “Apuntes de una recopilación de referencias históricas de las inundaciones”, R. Couchou. Junio 1983.
- “Estudio de las inundaciones del Júcar de 1864”, José Gómez Ortega et al., Confederación Hidrográfica del Júcar, 1988.
- “Estudio en modelo matemático de las inundaciones de octubre de 1982 en la plana del Júcar”, CEDEX, 1988.
- “Estudio hidrológico e hidráulico de la crecida de noviembre de 1987 en la ribera del Júcar”, CEDEX, 1988.
- “El fenómeno meteorológico de Santa Irene de 1982”, J. Díez, Revista de obras Públicas, noviembre 1992, Pág. 67-81.
- “Nuevos datos sobre la crecida del Júcar de octubre de 1982”, M. Arenillas Parra et al., Revista de Obras Públicas, Julio-Agosto 1993, Pág. 65-74.
- “Avenidas motivadas por las lluvias extraordinarias de los días 13 y 14 de octubre de 1957”, Manuel Cánovas García, Revista de Obras Públicas, febrero 1958, Pág. 59-68.
- “Las inundaciones de la Ribera”, Francisco Fogués, anales del Centro de Cultura Valenciana, Pág. 232-250.
- “Riadas del Ebro, Queiles y Mediavilla”, M. Sáenz, Apuntes Tudelanos. Pág. 1113-1143.
- “Memoria del proyecto de modificación y ampliación del salto de Flix en el río Ebro”. 1930.
- “Informe sobre las inundaciones de octubre del año 1937 en el alto Pirineo”. E. Fontseré y F. Galcerano, 1938.

- "Historia de los pequeños ríos de la provincia de Huesca", A. López Bustos, Revista de Obras Públicas, septiembre 1989, Pág. 647-655.
- "Antecedentes para una historia de avenidas del río Ebro" A. López Bustos, Revista de Obras Públicas, marzo 1972, Pág. 191-204.
- Información publicada en la prensa.
- Información facilitada por las Confederaciones Hidrográficas.
- Información facilitada por empresas hidroeléctricas sobre la gestión de determinados eventos en las presas de su propiedad.
- Otros datos documentales o de campo recopilados por el CEDEX.

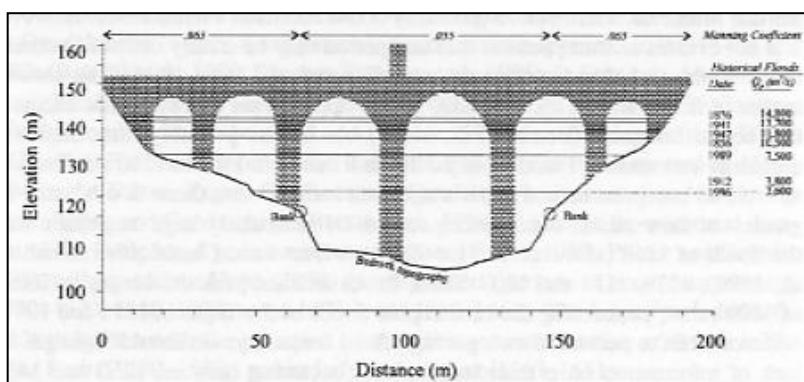


Figura 12. Avenidas históricas en el puente de Alcántara (tomada de G. Benito et al., 2003).



Figura 13. Avenida de 1947 en Toledo (tomada de G. Benito et al., 2003).

La información disponible es abundante, pero no toda es válida para su uso en el análisis estadístico de las leyes de frecuencia de caudales máximos. Se han seleccionado para su utilización (tabla 4 y figura 14) en el estudio sólo aquellos eventos de los que se conoce el caudal punta en algún lugar próximo a alguno de los puntos de control (estaciones de aforo o embalses) cuyas series temporales se han empleado en el análisis estadístico, así como su orden de importancia en un determinado periodo de tiempo. Esta última información permite asignarle al caudal histórico probabilidad, o periodo de retorno, mediante la fórmula de Gringorten:

$$\frac{1}{T} = 1 - F(q_i) = 1 - \text{prob}(Q \leq q_i) = \frac{i - 0.44}{H + 0.12}$$

Donde H es igual a la duración en años del periodo histórico del que se tiene información no sistemática, e i el número de orden que ocuparía el caudal dentro del conjunto de referencias históricas ordenadas de mayor a menor según su importancia.



Figura 14. Localización de las avenidas históricas consideradas

Tabla 4. Caudales históricos empleados en el análisis estadístico.

| DEMARCACIÓN | Localización | Fecha de la avenida | Caudal (m ³ /s) | T (años) |
|-------------|---------------------|---------------------|----------------------------|----------|
| DUERO | Río Esla (Ricobayo) | 1962 | 5426 | 180 |
| | Río Huebra | 1909 | 2400 | 700 |
| | | 1936 | 1300 | 64 |
| | | 1966 | 1100 | 39 |
| | | 1979 | 1000 | 28 |

| DEMARCACIÓN | Localización | Fecha de la avenida | Caudal (m ³ /s) | T (años) |
|--------------|--|---------------------|----------------------------|-------------|
| TAJO | Río Tajo (Bolarque) | 1916 | 1375 | 447 |
| | | 1941 | 1860 | 160 |
| | Río Tajo (Aranjuez) | 1941 | 2100 | 447 |
| | Río Tajo (Toledo) | 1876 | 3200 | 268 |
| | | 1947 | 2900 | 96 |
| | Río Tajo (Talavera) | 1947 | 7300 | 536 |
| | Río Tajo (Alcántara) | 1876 | 12000 | 447 |
| | | 1941 | 9000 | 160 |
| | | 1947 | 6000 | 98 |
| | Río Alberche (Burguillo) | 1922 | 2000 | 447 |
| | | 1943 | 1500 | 160 |
| | Río Alagón (Alcántara) | 1979 | 4050 | 107 |
| GUADIANA | Río Guadiana (Villanueva de la Serena) | 1947 | 7410 | 180 |
| | Río Guadiana (Badajoz) | 1876 | 10000 | 434 |
| | | 1947 | 7840 | 156 |
| | Río Guadiana (Mértola) | 1823 | 8711 | 156 |
| | | 1876 | 11520 | 434 |
| GUADALQUIVIR | Río Guadalquivir (Pedro Marín) | 1963 | 2350 | 200 |
| | Río Guadalquivir (Mengíbar) | 1963 | 3500 | 200 |
| | Río Guadalquivir (Marmolejo) | 1963 | 3900 | 200 |
| | Río Guadalquivir (Córdoba) | 1917 | 5000 | 200 |
| | | 1963 | 4300 | 75 |
| | Río Guadalquivir (Sevilla) | 1708 | 11500 | 180 |
| | | 1684 | 11350 | |
| | | 1642 | 11000 | |
| | Guadiana Menor (Pósito) | 1973 | 2000 | 200 |
| | Fardes (Villanueva de las Torres) | 1973 | 668 | 200 |
| | Genil (Loja) | 1921 | 1945 | 200 |
| | Genil (Puente Genil) | 1963 | >2500 | 200 |
| | Cubillas (Embalse de Cubillas) | 1948 | 400 | 200 |
| | Cacín (Embalse de los Bermejales) | 1948 | 450 | 200 |
| | Guadalimar (Ariza) | 1960 | 1200 | 200 |
| | Jandulilla (Horno de vidrio) | 1987 | 50 | 85 |
| SEGURA | Río Segura (Murcia) | 1879 | 1890 | 179 |
| | | 1884 | 1425 | 64 |
| | | 1895 | 1230 | 39 |
| | | 1834 | 938 | 28 |
| | Río Guadalentín (Puentes) | 1973 | 3544 | 231 |
| | | 1891 | 1890 | 83 |
| | | 1879 | 1510 | 50 |
| | Río Luchena (Valdeinfierro) | 1973 | 1376 | 231 |

| DEMARCACIÓN | Localización | Fecha de la avenida | Caudal (m ³ /s) | T (años) |
|-------------|-------------------------------|---------------------|----------------------------|-------------|
| JÚCAR | | 1879 | 850 | 83 |
| | Río Almanzora (Santa Bárbara) | 1973 | 5600 | 231 |
| | | 1879 | 3000 | 83 |
| | | 1924 | 2000 | 50 |
| | | 1977 | 1000 | 36 |
| | Río Santo (Alfaix) | 1988 | 330 | 231 |
| | | 1973 | 241 | 83 |
| | | 1946 | 160 | 50 |
| | Río Adra (El Esparragal) | 1973 | 232 | 231 |
| | | 1951 | 90 | 83 |
| | Río Chico (La Ventilla) | 1973 | 213 | 231 |
| | | 1951 | 100 | 83 |
| JÚCAR | Río Júcar (Alcalá de Júcar) | 1982 | 2125 | 256 |
| | Río Júcar (Cofrentes) | 1982 | 4000 | 256 |
| | | 1923 | 1584 | 69 |
| | | 1941 | 923 | 42 |
| | Río Júcar (Embarcaderos) | 1982 | 6542 | 256 |
| | Río Júcar (Tous) | 1864 | 11000 | 727 |
| | | 1982 | 7790 | 261 |
| | | 1923 | 2200 | 69 |
| | Río Júcar (Huerto Mulet) | 1864 | 13000 | 727 |
| | | 1982 | 8500 | 261 |
| | | 1805 | 8400 | 159 |
| | | 1814 | 6400 | 114 |
| | | 1779 | 6200 | 89 |
| | | 1987 | 5200 | 69 |
| | | 1923 | 4800 | 42 |
| | Río Cabriel (Cofrentes) | 1982 | 2070 | 361 |
| | | 1923 | 2125 | 69 |
| | Río Túria (La presa) | 1957 | 3700 | 197 |
| | | 1949 | 2300 | 71 |
| | | 1967 | 1264 | 43 |
| | Río Túria (Bugarra) | 1957 | 2100 | 197 |
| | | 1920 | 1250 | 71 |
| | | 1967 | 858 | 43 |
| | Río Mijares (Sichar) | 1957 | 3000 | 197 |
| | | 1967 | 1620 | 71 |
| | Río Palancia | 1957 | 1611 | 197 |
| | Barranco Carraixet | 1957 | 1300 | 197 |
| | | 1994 | 525 | 72 |
| | Río Reconque (Jalance) | 1982 | 2490 | 261 |
| | | 1923 | 1000 | 69 |
| | Río Sellent (Estubeny) | 1982 | 2270 | 261 |
| | | 1987 | 833 | 69 |



| DEMARCACIÓN | Localización | Fecha de la avenida | Caudal (m ³ /s) | T (años) |
|-------------|---|---------------------|----------------------------|-------------|
| | Río Albaida (Manuel) | 1982 | 3390 | 191 |
| EBRO | Río Ebro (Tortosa) | 1787 | 17000 | 697 |
| | | 1907 | 12000 | 250 |
| | | 1937 | 10000 | 152 |
| | | 1853 | 9000 | 110 |
| | | 1866 | 8400 | 86 |
| | | 1884 | 7600 | 70 |
| | | 1871 | 6800 | 60 |
| | Río Gállego (Anzáñigo) | 1942 | 1400 | 179 |
| | Río Jalón (Huérmeda) | 1951 | 500 | 179 |
| | | 1956 | 340 | 64 |
| | Río Segre (Seo de Urgel) | 1982 | 1000 | 179 |
| | Río Segre (Oliana) | 1982 | 2000 | 179 |
| | Río Segre (Lérida) | 1907 | 5200 | 179 |
| | | 1937 | 3600 | 64 |
| | Río Cinca (Mediano) | 1982 | 2550 | 179 |
| | | 1907 | 2130 | 64 |
| | Río Cinca (Fraga) | 1907 | 3900 | 179 |
| | | 1937 | 2600 | 64 |
| | Río Valira (Seo de Urgel) | 1907 | 800 | 179 |
| | Río Noguera-Ribagorzana (Pont de Suert) | 1907 | 1300 | 179 |
| | | 1937 | 1100 | 64 |
| | Río Noguera-Pallaresa (Trempl) | 1937 | 1500 | 179 |
| | Río Ara (Boltaña) | 1966 | 1926 | 179 |
| | Río Cinqueta (La Fortunada) | 1942 | 1200 | 179 |
| | Río Isábena (Capella) | 1907 | 550 | 179 |

Puesto que la función de distribución seleccionada en la mayoría de los casos para describir las leyes de frecuencia es, como se ha dicho, la de valores extremos generalizada (GEV) ajustada mediante el método de los momentos ponderados probabilísticamente, la metodología empleada para introducir la información histórica en el ajuste se ha basado en el método de "ponderación de las series de datos" propuesto por el Water Resources Council de los EE.UU. en su Boletín nº 17 (USWRC, 1981), especialmente apropiado cuando se utiliza el método de los momentos (o una de sus variantes) como procedimiento de ajuste.

En la figura 15 se muestran algunos ejemplos de leyes de frecuencia obtenidas al incorporar la información sobre avenidas históricas en el ajuste.

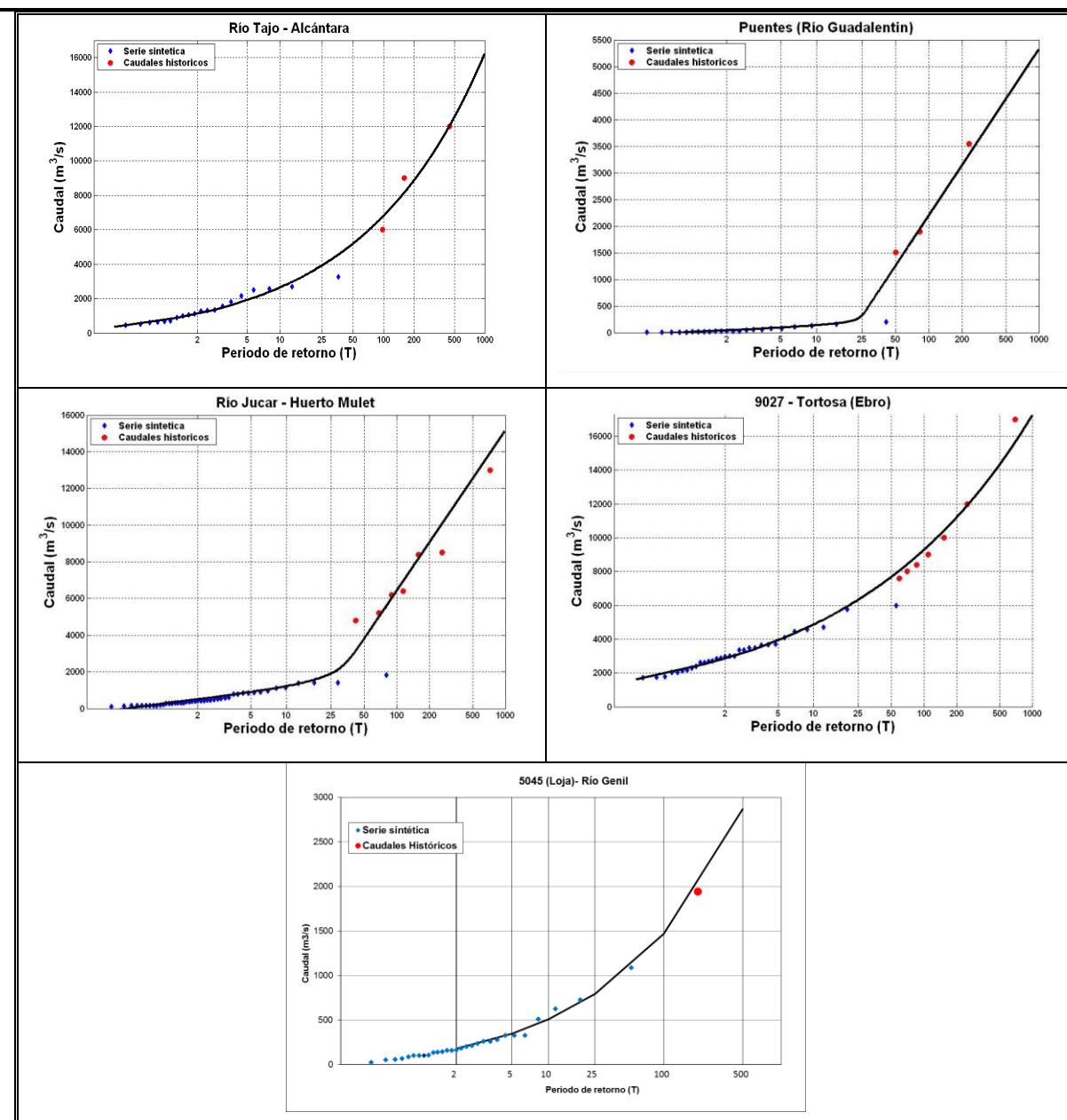


Figura 15. Ejemplos de leyes de frecuencia ajustadas con información sobre avenidas históricas.

5. ESTIMACIÓN DE LOS CUANTILES EN LOS PUNTOS DE LA RED FLUVIAL NO AFORADOS

5.1. ESTIMACIÓN EN CUENCAS PEQUEÑAS: MÉTODO HIDROMETEOROLÓGICO

Para estimar los cuantiles en los puntos de la red fluvial no aforados y con pequeña superficie de cuenca vertiente, se ha utilizado el método racional modificado (Témez, 1991), calibrado a partir de los datos registrados en las estaciones de aforo. El modelo utilizado se basa en la siguiente formulación:

$$Q = \frac{CIA}{3.6} K$$



Donde:

- Q es el caudal máximo en m^3/s .
- C es el coeficiente de escorrentía y su valor viene dado en función de la precipitación máxima diaria y el umbral de escorrentía (P_0) mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{((P_d / P_0) - 1) \cdot ((P_d / P_0) + 23)}{((P_d / P_0) + 11)^2}$$

- I es la intensidad de precipitación media para un determinado período de retorno (mm/h). Es función del tiempo de concentración, de la precipitación máxima diaria y del coeficiente de torrencialidad a través de la siguiente expresión:

$$I = \left(\frac{P_d}{24} \right) \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0.1} - T_C^{0.1}}{28^{0.1} - 1}}$$

- A es el área de la cuenca (km^2).
- K es el coeficiente de uniformidad, que se calcula a partir del tiempo de concentración:

$$K = 1 + \frac{T_C^{1.25}}{T_C^{1.25} + 14}$$

Según la metodología propuesta por Témez, todas estas variables y parámetros pueden determinarse fácilmente, excepto el umbral de escorrentía que depende del estado de humedad antecedente del suelo en la época en la que se producen las avenidas, y cuyo valor debe calibrarse a partir de la información registrada en las estaciones de aforo.

5.1.1. El coeficiente corrector del umbral de escorrentía (β)

Cuando se aplica el método racional modificado para determinar las leyes de frecuencia de los caudales, es necesario calibrar el valor del P_0 , realizándose habitualmente esa calibración a través de un coeficiente auxiliar (denominado β) que al multiplicar el valor del P_0 correspondiente a las condiciones de medias de humedad (AMC II) proporciona el valor calibrado del parámetro. Su valor se mueve habitualmente en el rango 0.5-3.

$$P_0^{cal} = P_0 \cdot \beta$$

Para su aplicación en la elaboración del mapa de caudales máximos, se ha realizado una calibración del P_0 a escala nacional, determinando el coeficiente corrector β . En los próximos apartados se presenta el método utilizado y los resultados obtenidos.

5.1.2. Calibración regional del umbral de escorrentía

5.1.2.1. Selección de estaciones de aforo

El primer paso para definir el coeficiente corrector β fue la selección de las estaciones de aforo que iban a utilizarse para calibrar y validar el método de obtención del parámetro, para lo que se establecieron los siguientes criterios de selección de estaciones:

- Se ha exigido un número mínimo de 30 datos en la serie de caudales máximos anuales correspondientes a caudales medios diarios (Q_c).
- Dentro de la serie se ha exigido que en, al menos, 15 años se disponga de datos de caudal máximo instantáneo (Q_{ci}).
- Las dos condiciones anteriores deben verificarse para aquella parte del registro de las estaciones de aforo que no se encuentre afectado por la presencia de presas. Se ha considerado que la presa no altera sustancialmente el registro de la estación si se cumple alguno de los requisitos siguientes:
 - La cuenca vertiente al embalse no supone más de un 10% de la cuenca vertiente a la estación de aforos.
 - El tamaño del embalse es suficientemente pequeño.
- Se han seleccionado únicamente aquellas estaciones con un área vertiente reducida en la que se ha considerado aplicable, al menos de forma aproximada, el método racional. En general, se ha adoptado un límite para el tamaño de cuenca igual a 2000 km².
- En algunos casos se han adoptado criterios menos exigentes que los expuestos anteriormente, con la finalidad de conseguir una cobertura espacial suficiente. De igual forma, en aquellos casos en los que, con los criterios anteriores, se conseguía una densidad de estaciones elevada, se han seleccionado únicamente aquellas estaciones con un mayor número de datos medios diarios e instantáneos.

De esta forma se obtuvieron 245 estaciones de aforo con condiciones relativamente buenas para estimar el coeficiente corrector del P_0 . Aún así, existían importantes lagunas en las cuencas del Guadiana y Guadalquivir, así como algunos claros en las cuencas del Júcar y del Ebro. Las estaciones de aforo seleccionadas se dividieron en dos grupos: aquéllas que se iban a utilizar para calibrar el modelo y aquéllas que se iban a utilizar para validar. Las estaciones para calibrar se escogieron entre aquéllas que presentaban un registro de datos mejor (en cuanto al número de años y a su posible afección por una presa). También se tuvo en cuenta el valor medio del parámetro P_0 y de la precipitación en la cuenca, a fin de que estuvieran representadas en la calibración estaciones con características físicas diversas. Finalmente se adoptaron 185 estaciones para calibrar y 60 estaciones para validar los resultados (figura 16). La calibración del P_0 mediante la determinación del coeficiente corrector β a escala nacional ha sido revisada posteriormente en la elaboración de los mapas de caudales máximos del Guadalquivir para tener en cuenta la nueva información disponible.

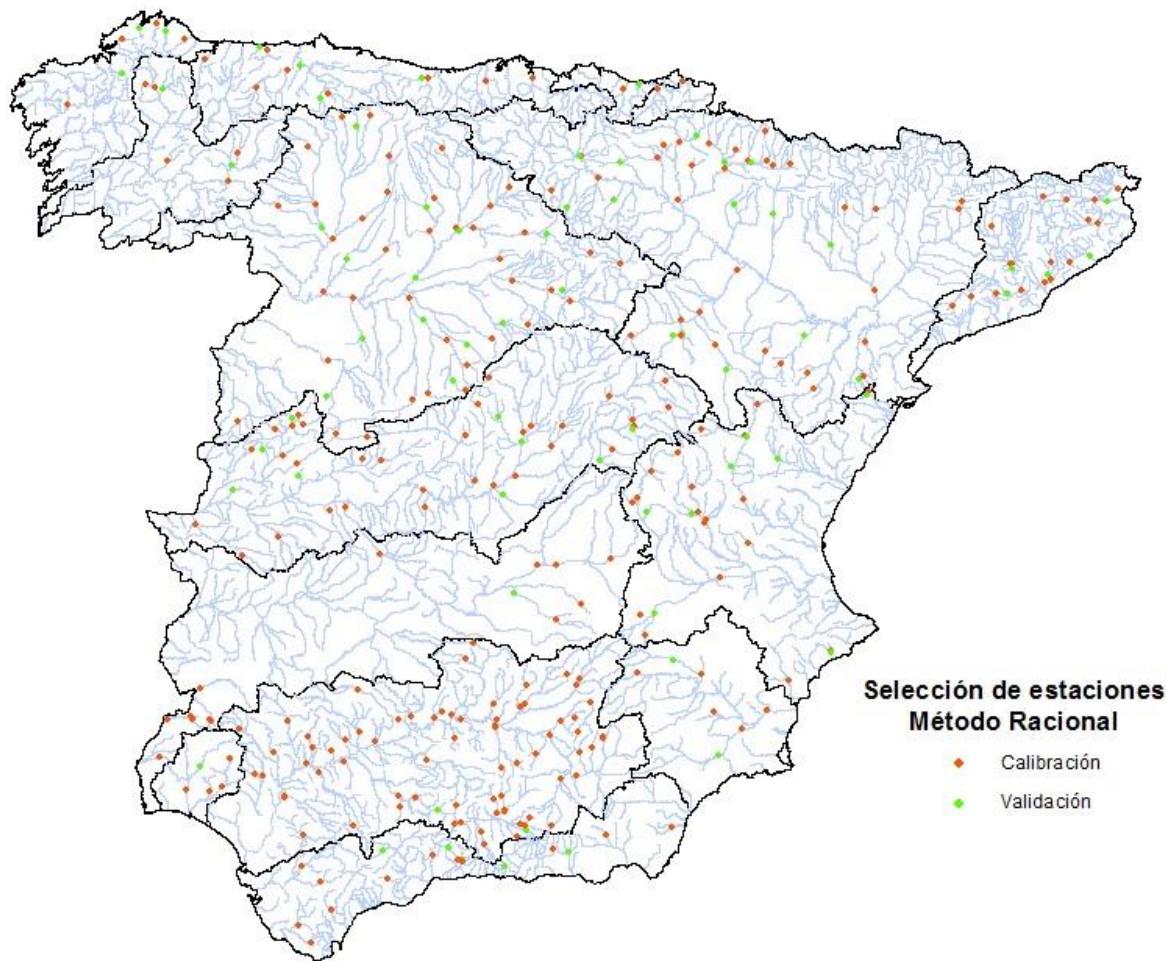


Figura 16. Estaciones seleccionadas para la calibración del umbral de escorrentía.

5.1.2.2. Aplicación del método racional modificado a las cuencas vertientes a las estaciones de aforo seleccionadas

La estimación de caudales punta con el método racional modificado se ha realizado mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), lo que ha permitido automatizar el proceso. Se ha trabajado con una resolución espacial de 500mx500m.

Tal y como se ha descrito anteriormente, el método racional modificado requiere el conocimiento de las siguientes variables o parámetros: área de la cuenca, tiempo de concentración, umbral de escorrentía, precipitación máxima diaria del periodo de retorno considerado y factor de torrencialidad. A continuación se explica brevemente cómo se ha calculado cada una de ellas.

- Área de la cuenca: Calculada a partir del mapa de direcciones de drenaje elaborado a partir del Modelo Digital del Terreno del Servicio Geográfico del Ejército, con resolución de 100mx100m.
- Tiempo de concentración (Tc): En la formulación del método racional modificado de Témez, se propone emplear la siguiente expresión para calcular el tiempo de concentración:

$$T_c = 0.3 \left[\frac{L}{J^{1/4}} \right]^{0.76}$$

Donde:

T_c es el tiempo de concentración en horas.

L es la longitud del cauce principal en km.

J es la pendiente media del cauce principal.

La longitud del cauce principal se calculó automáticamente mediante operaciones de SIG basándose en la distancia máxima existente desde el punto más alejado hasta la salida de la cuenca, empleando para ello el mapa de direcciones de drenaje. En cuanto a la pendiente media del cauce, se calculó hallando la diferencia de altitud entre los dos extremos del cauce principal, dividiéndola por la longitud de dicho cauce.

- **Umbral de escorrentía (P_0):** Elaborado siguiendo la metodología utilizada en la Tesis doctoral “Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva del modelo hidrológico del SCS: Datos de perfiles de suelos y teledetección” (Ferrer, 2003), a partir del mapa de usos de suelo Corine Land Cover 2000 y datos de infiltración actualizados.

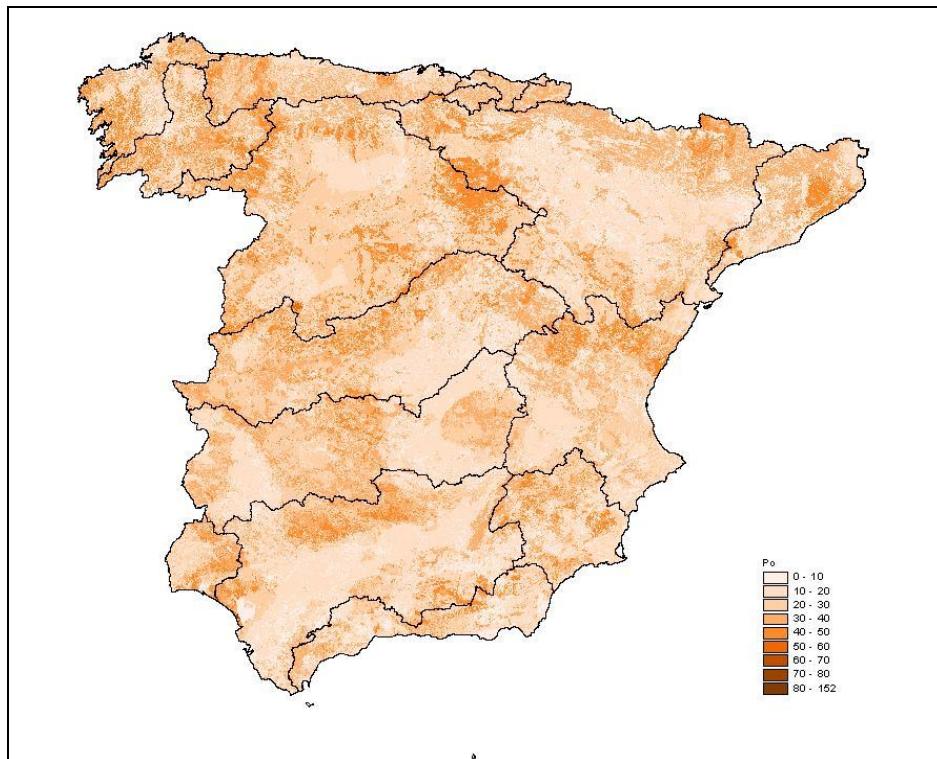


Figura 17. Mapa de umbral de escorrentía en condiciones medias de humedad.

- **Precipitación:** Los valores de las precipitaciones máximas diarias se obtuvieron mediante los mapas de precipitación elaborados a partir del trabajo de Máximas Lluvias Diarias en la España Peninsular realizado por el CEDEX para la Dirección General de Carreteras (DGC, 1999).

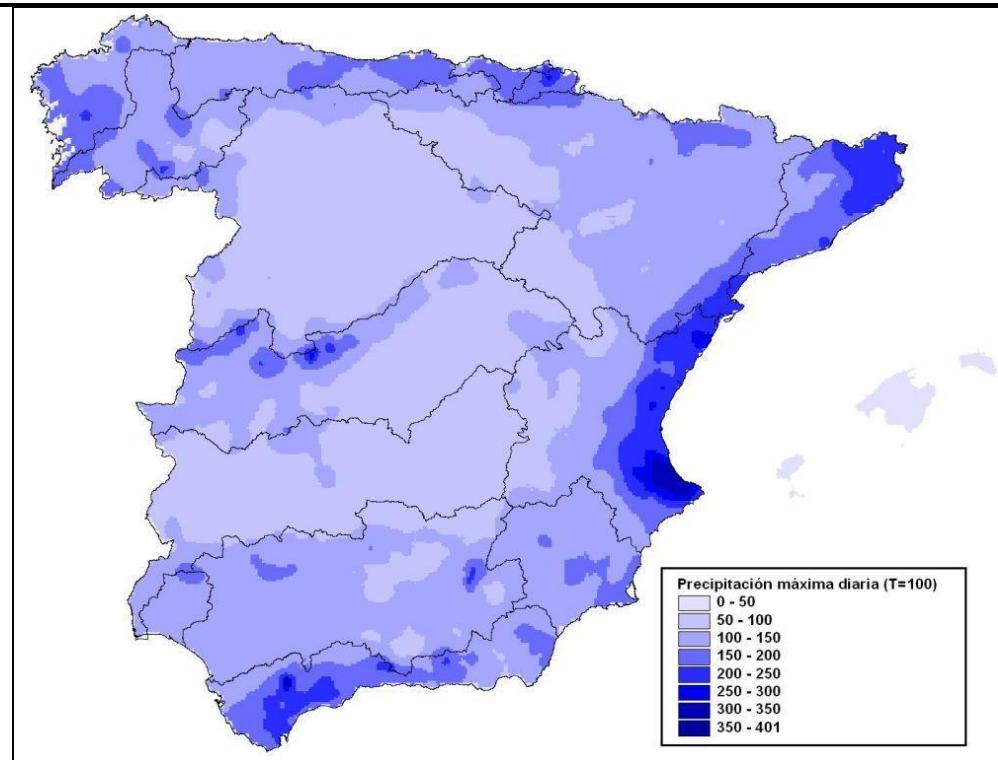


Figura 18. Mapa de precipitaciones máximas diarias para 100 años de periodo de retorno.

- **Factor de torrencialidad:** Representa la relación entre la intensidad de precipitación correspondiente a 1 hora de duración y la intensidad de precipitación diaria. Se ha obtenido a partir del mapa de isolíneas propuesto por Témez (1987).

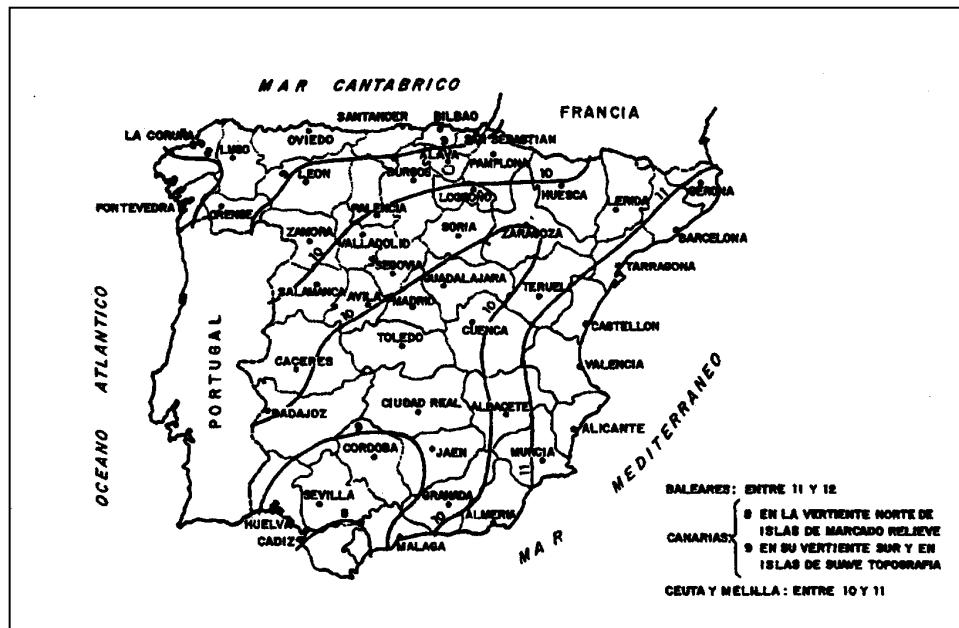


Figura 19. Mapa de factor de torrencialidad.

Una vez obtenidas todas las variables, sus valores se introdujeron en las fórmulas matemáticas del método racional modificado, y se obtuvieron los cuantiles de caudal máximo,

correspondientes a las condiciones medias de humedad antecedente, en cada una de las cuencas vertientes a las estaciones de aforo seleccionadas.

5.1.2.3. Estimación del coeficiente corrector β mediante contraste con las series de caudales

Para estimar el valor del coeficiente β en cada estación de aforos se contrastaron los cuantiles obtenidos a partir de las series de caudales máximos registradas en las estaciones de aforo con los estimados mediante el método racional modificado. El ajuste se realizó para el período de retorno de 10 años, ya que para períodos de retorno inferiores la escorrentía calculada mediante un procedimiento agregado puede no ser correcta, y los períodos de retorno superiores tienen una mayor incertidumbre en su determinación debida a la escasa longitud de las series de datos. A partir de este contraste se determinó el valor del coeficiente β que corrige el valor del umbral de escorrentía de tal manera que el ajuste entre los cuantiles obtenidos por ambos procedimientos sea adecuado.

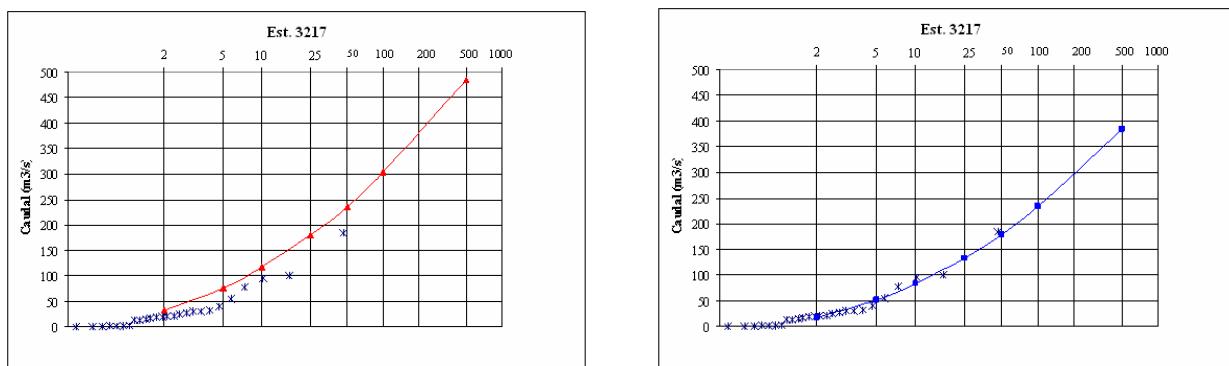


Figura 20. Ajuste de la ley de frecuencia obtenida mediante el método racional a los datos registrados en la estación de aforos 3217 (izquierda: resultado obtenido con el P_0 para condiciones medias de humedad antecedente, derecha: resultado obtenido con el P_0 calibrado).

Posteriormente, tal como se describe en el próximo apartado, se realizó un estudio de la distribución espacial del coeficiente β observándose que, si bien existía una cierta relación espacial, algunas estaciones próximas presentaban valores muy diferentes entre sí.

5.1.2.4. Análisis de la distribución espacial del coeficiente corrector del umbral de escorrentía

Con la intención de obtener un mapa del coeficiente β a escala nacional, se ha realizado una interpolación espacial de los valores de los coeficientes obtenidos en la calibración. Para realizar dicha interpolación, se asignó el valor del coeficiente al centroide de la cuenca vertiente a cada estación de aforos, obteniendo de esta manera una serie de puntos distribuidos por todo el territorio de la España peninsular con un valor conocido de dicho coeficiente. A partir de esa nube de puntos se realizó una interpolación espacial mediante krigging ordinario. En la figura 21 se muestra el semivariograma obtenido. El error obtenido en la interpolación en general fue bajo, estando los valores más elevados en los puntos limítrofes del área de estudio y donde la densidad de estaciones de aforo era menor.

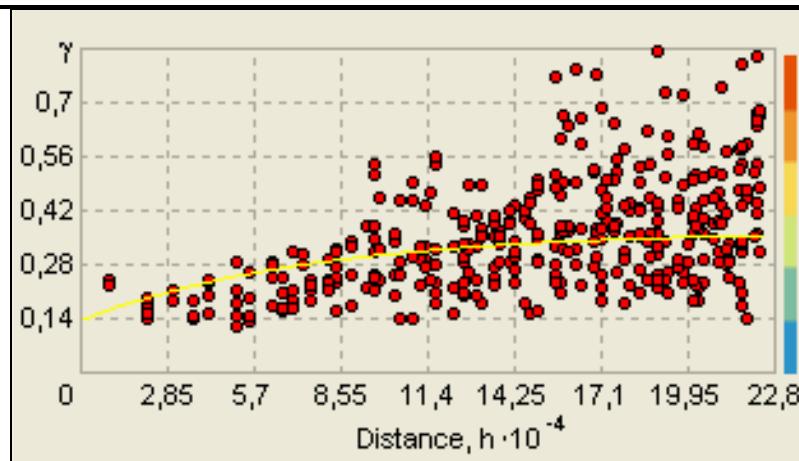


Figura 21. Semivariograma obtenido en la interpolación del coeficiente corrector del umbral de escorrentía mediante krigging.

Una vez obtenido el mapa interpolado se generó un mapa matricial con resolución espacial de 500mx500 m (figura 22). La distribución de los resultados obtenidos está acorde con la de otros autores. Tanto Hawkins et al (1985) como Ponce y Hawkins (1996) señalan que valores elevados de este parámetro se corresponden con situaciones de precipitación antecedente seca, mientras que los valores bajos a precipitación antecedente húmeda. En la España peninsular, las áreas más húmedas del norte son las que presentan valores más bajos, mientras que la zona del sudeste, donde el clima es más árido, los valores del parámetro son altos.

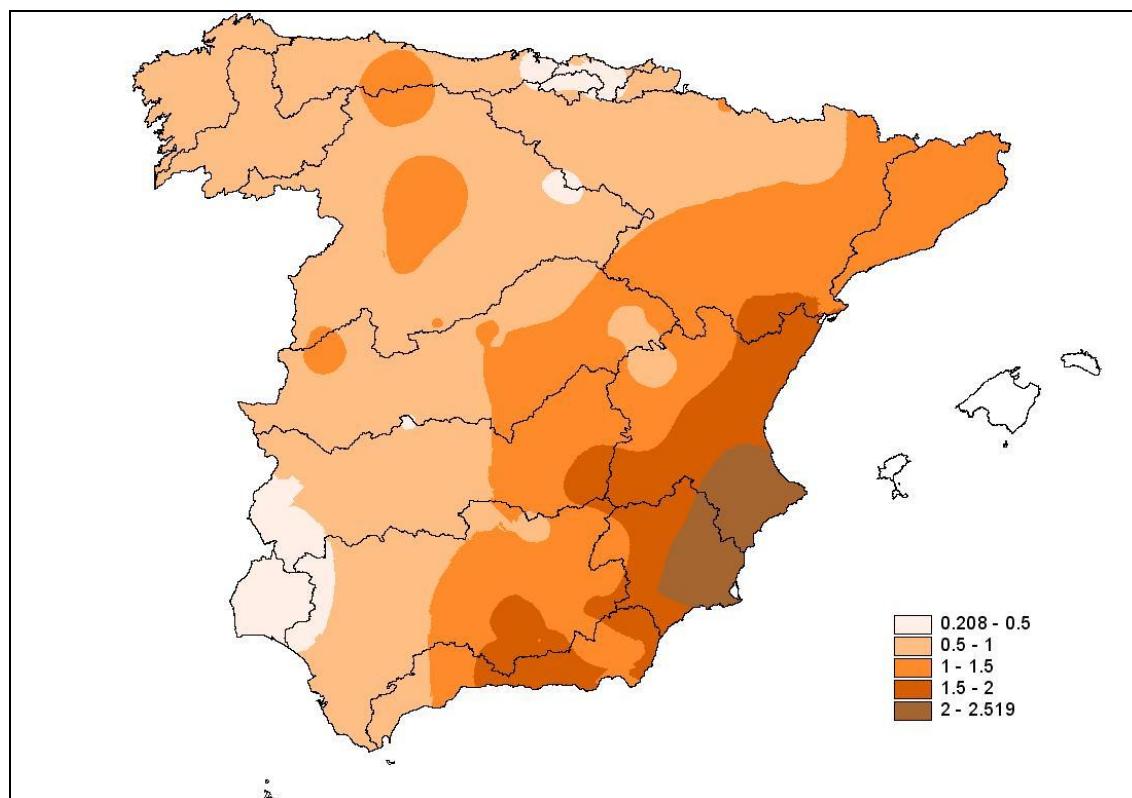


Figura 22. Mapa de coeficientes correctores del umbral de escorrentía.

A partir del mapa anterior se ha estimado el valor del coeficiente β en las cuencas vertientes a las estaciones de aforo seleccionadas para validar los resultados, y se ha comparado con los valores obtenidos en la calibración de dichas estaciones a partir de las series de registradas en

las estaciones. En la figura siguiente se representa dicha comparación, contrastándola con una recta a 45° sobre la que se deberían situar los puntos si la estimación realizada con el mapa fuera totalmente coincidente con los valores locales. Se observa cómo las parejas de valores representadas se distribuyen en torno a dicha recta, indicando que las estimaciones regionales del mapa no son sesgadas y proporcionan unos valores razonables, aunque existe cierta dispersión respecto a los valores locales.

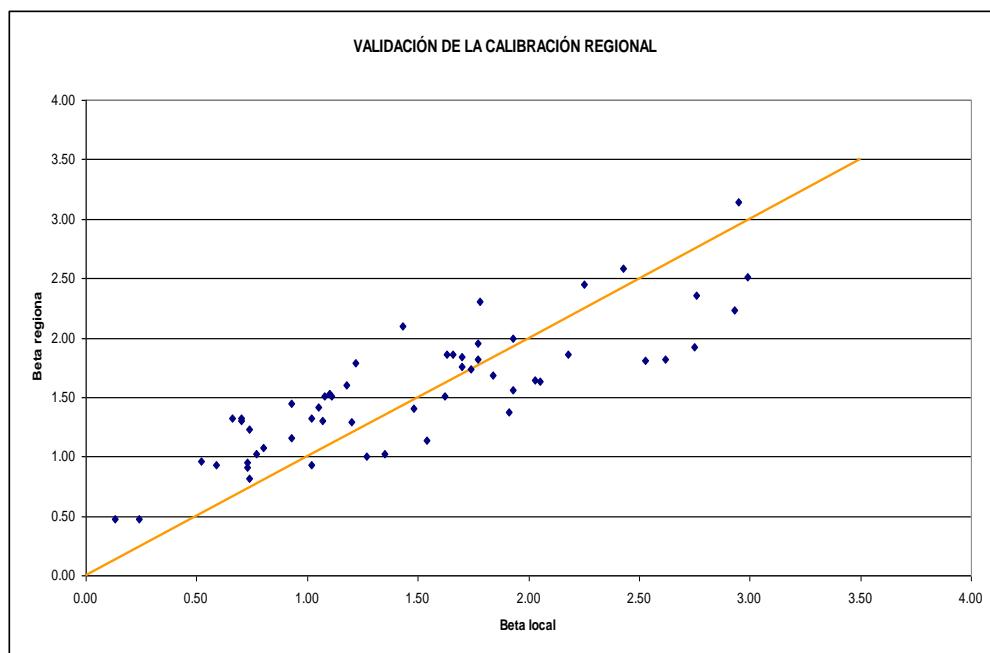


Figura 23. Comparación entre los valores regionales y locales del coeficiente β para las estaciones de validación.

Por otra parte, y con la finalidad de determinar el tamaño máximo de cuenca vertiente en la que la aplicación del método racional, junto con los coeficientes correctores proporcionados por el mapa anterior, permite obtener la ley de frecuencia de caudales con cierta precisión, se ha determinado el error entre las estimaciones de los cuantiles de caudal obtenidos mediante la aplicación del método racional y los obtenidos a partir de los datos de aforos. En las figuras adjuntas se representan los resultados obtenidos en función del área de la cuenca vertiente a la estación, tanto el valor absoluto del error en cada estación, como el error medio en las estaciones con una cuenca vertiente igual o inferior a una dada. Se observa cómo hasta superficies de cuenca del orden de unos 500 km^2 (correspondiente a la línea marcada en azul claro en la figura 24) el error medio es más o menos estable y del orden de un 20-25%. A partir de ese tamaño de cuenca el valor del error va creciendo de forma constante. Teniendo en cuenta estos resultados, se ha decidido aplicar el método racional, para la elaboración de los mapas de caudales máximos, en aquellos puntos de la red fluvial con cuencas vertientes de hasta unos 500 km^2 de superficie.

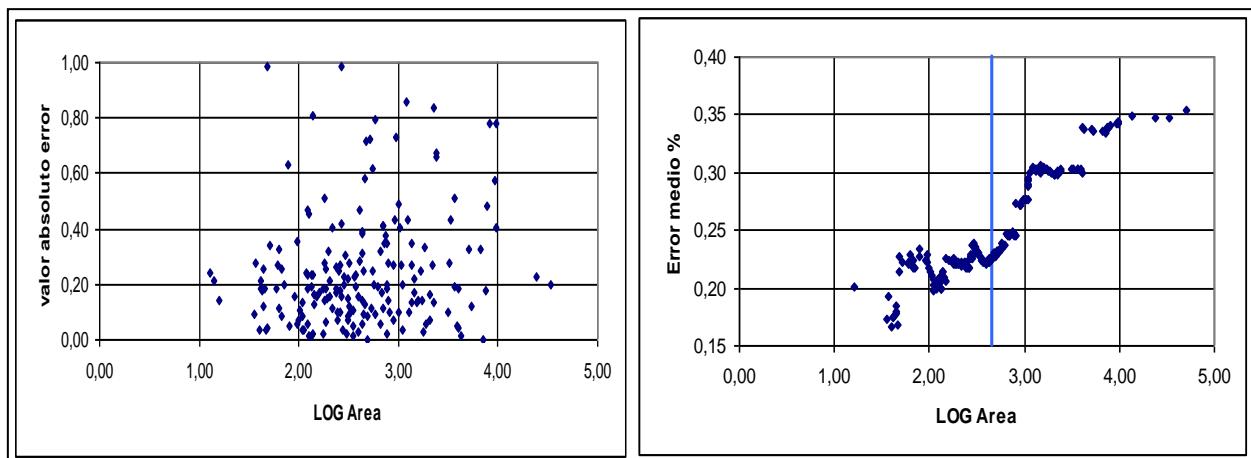


Figura 24. Errores en la estimación de los cuantiles mediante el método racional en función del área de la cuenca vertiente.

5.1.3. Caracterización de los valores del coeficiente β en las regiones estadísticas

Como se ha comentado anteriormente, el mapa de coeficiente β obtenido para toda la España peninsular, aunque refleja correctamente las variaciones de dicho coeficiente a lo largo del territorio nacional en función de las características climáticas de cada zona, presenta en algunos casos desviaciones importantes respecto a los valores obtenidos en las estaciones de aforo, por lo que los valores proporcionados por dicho mapa en cada punto del territorio deben tomarse únicamente como orientativos y no como un valor exacto. Estas desviaciones respecto a los valores reales se hacen aún más patentes al realizar un análisis local en cada gran cuenca hidrográfica e incorporar un mayor número de estaciones al análisis.

De esta forma, se ha considerado preferible y más acorde con su variabilidad real, el caracterizar estadísticamente los valores del coeficiente corrector β en cada una de las regiones estadísticas definidas anteriormente, en lugar de proporcionar un valor exacto en cada punto del territorio a través de un mapa. La mencionada caracterización estadística se ha realizado determinando para cada región el valor medio de los valores del coeficiente β obtenidos al calibrar el método racional en cada una de las estaciones de la región, así como una valoración de la dispersión del conjunto de valores en torno a su valor medio a través de los intervalos de confianza del 50, 67 (relacionado con el error estándar) y 90%. Las regiones 51, 82, 94 y 95 se han subdividido en dos subregiones, según se muestra en las figuras adjuntas, al haberse apreciado diferencias sustanciales en el coeficiente β dentro de las mismas.

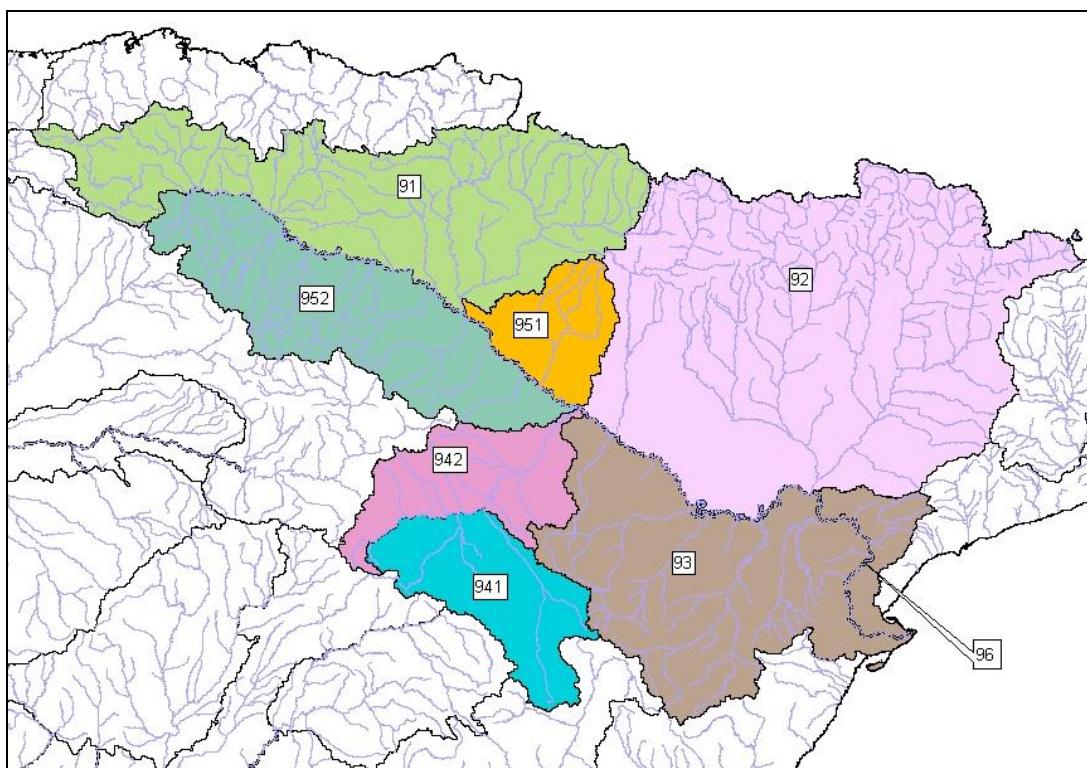


Figura 25. Subdivisión de las regiones 94 y 95

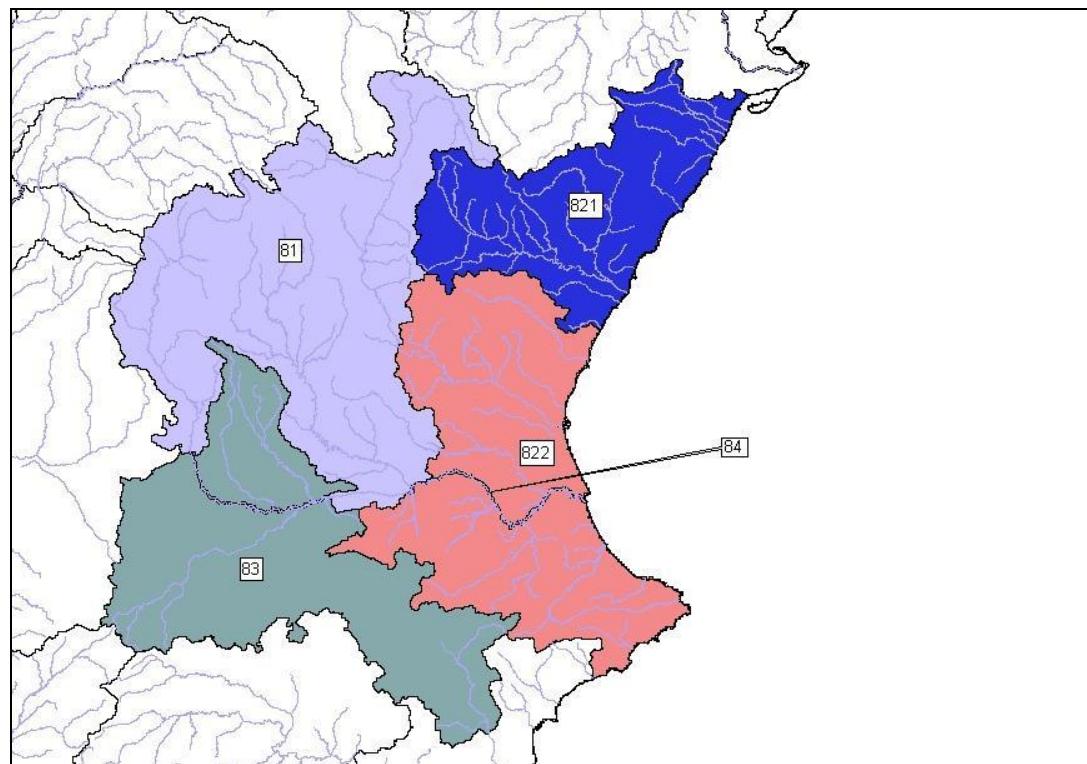


Figura 26. Subdivisión de las regiones 82

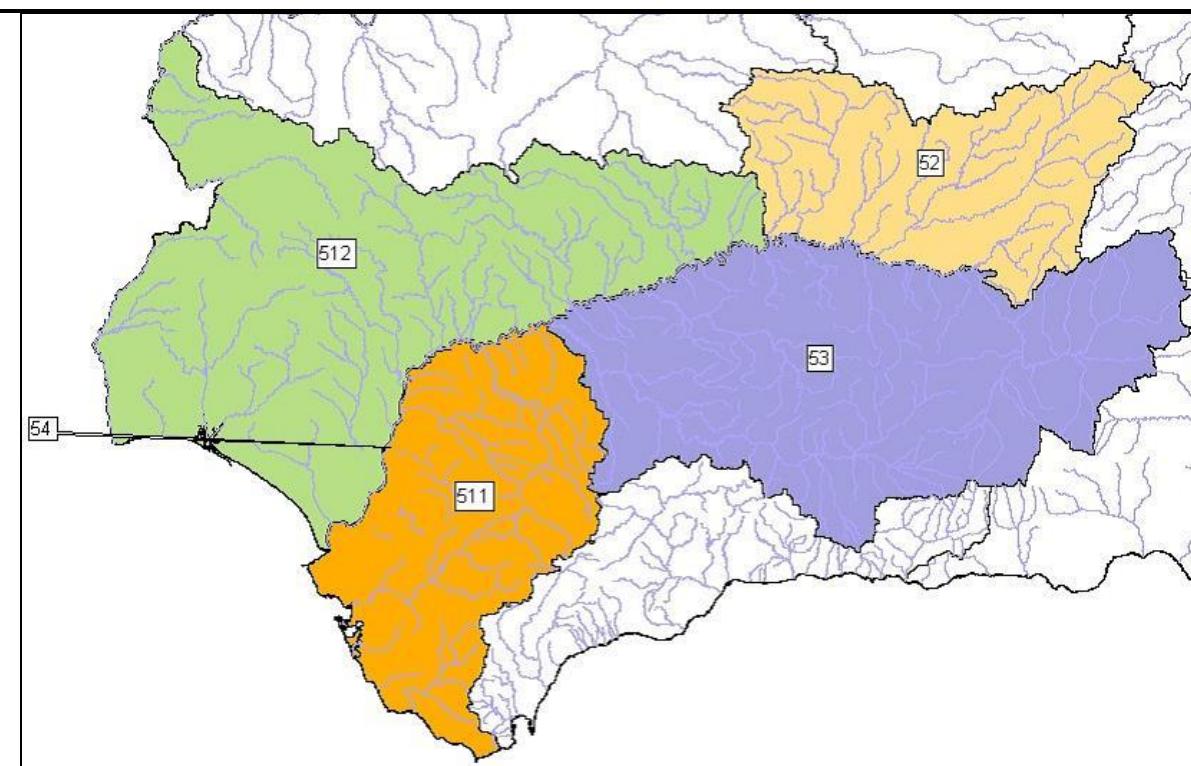


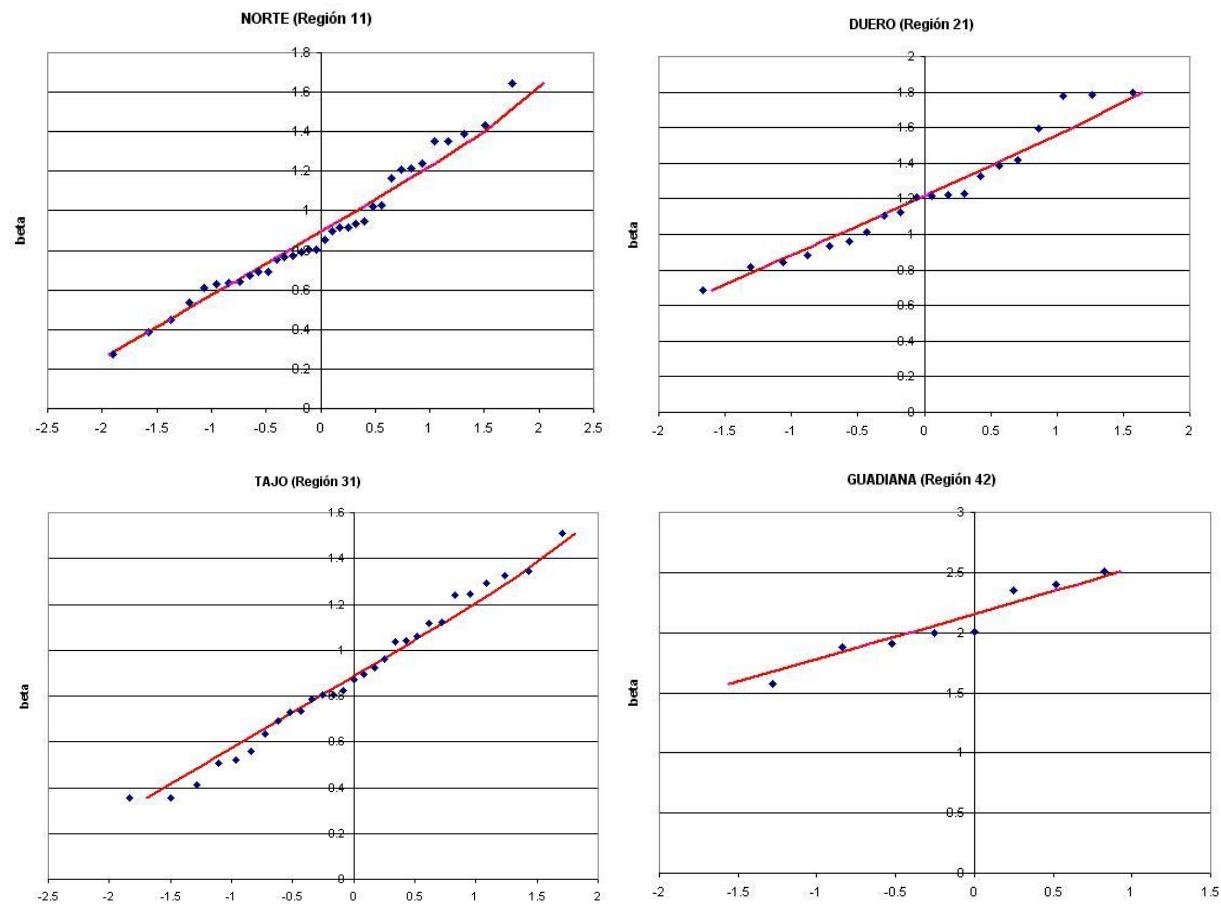
Figura 27. Subdivisión de las regiones 51

Tabla 5. Caracterización estadística de los valores del coeficiente corrector β en las distintas regiones.

| Región | Valor medio (β_m) | Desviación respecto al valor medio | | |
|--------|------------------------------|--|--|--|
| | | Intervalo de confianza del 50% (Δ_{50}) | Intervalo de confianza del 67% (Δ_{67}) | Intervalo de confianza del 90% (Δ_{90}) |
| 11 | 0.90 | 0.20 | 0.30 | 0.50 |
| 12 | 0.95 | 0.20 | 0.25 | 0.45 |
| 13 | 0.60 | 0.15 | 0.25 | 0.40 |
| 21 | 1.20 | 0.20 | 0.35 | 0.55 |
| 22 | 1.50 | 0.15 | 0.20 | 0.35 |
| 23 | 0.70 | 0.20 | 0.35 | 0.55 |
| 24 | 1.10 | 0.15 | 0.20 | 0.35 |
| 25 | 0.60 | 0.15 | 0.20 | 0.35 |
| 31 | 0.90 | 0.20 | 0.30 | 0.50 |
| 32 | 1.00 | 0.20 | 0.30 | 0.50 |
| 33 | 2.15 | 0.25 | 0.40 | 0.65 |
| 41 | 1.20 | 0.20 | 0.25 | 0.45 |
| 42 | 2.25 | 0.20 | 0.35 | 0.55 |
| 511 | 2.15 | 0.10 | 0.15 | 0.20 |
| 512 | 0.70 | 0.20 | 0.30 | 0.50 |
| 52 | 0.95 | 0.20 | 0.25 | 0.45 |
| 53 | 2.10 | 0.25 | 0.35 | 0.60 |
| 71 | 1.20 | 0.15 | 0.20 | 0.35 |
| 72 | 2.10 | 0.30 | 0.45 | 0.70 |

| | | | | | |
|-----|------|------|------|------|--|
| 81 | 1.30 | 0.25 | 0.35 | 0.60 | |
| 821 | 1.30 | 0.35 | 0.50 | 0.85 | |
| 822 | 2.40 | 0.25 | 0.35 | 0.60 | |
| 83 | 2.30 | 0.15 | 0.25 | 0.40 | |
| 91 | 0.85 | 0.15 | 0.25 | 0.40 | |
| 92 | 1.45 | 0.30 | 0.40 | 0.70 | |
| 93 | 1.70 | 0.20 | 0.25 | 0.45 | |
| 941 | 1.80 | 0.15 | 0.20 | 0.35 | |
| 942 | 1.20 | 0.15 | 0.25 | 0.40 | |
| 951 | 1.70 | 0.30 | 0.40 | 0.70 | |
| 952 | 0.85 | 0.15 | 0.25 | 0.40 | |

La determinación de los intervalos de confianza se ha realizado asumiendo que la distribución probabilística del coeficiente β en cada región sigue una función de distribución normal. Esta circunstancia se ha verificado mediante la representación gráfica, en papel de probabilidad normal, de los distintos valores obtenidos para el coeficiente respecto a sus probabilidades muestrales (estimadas mediante la aplicación de la fórmula de Weibull). Los resultados obtenidos se muestran en la figura 28, donde se puede comprobar que el conjunto de datos representado sigue aproximadamente una línea recta en cada región, que correspondería a una distribución de probabilidad normal al ser representada en papel probabilístico normal.



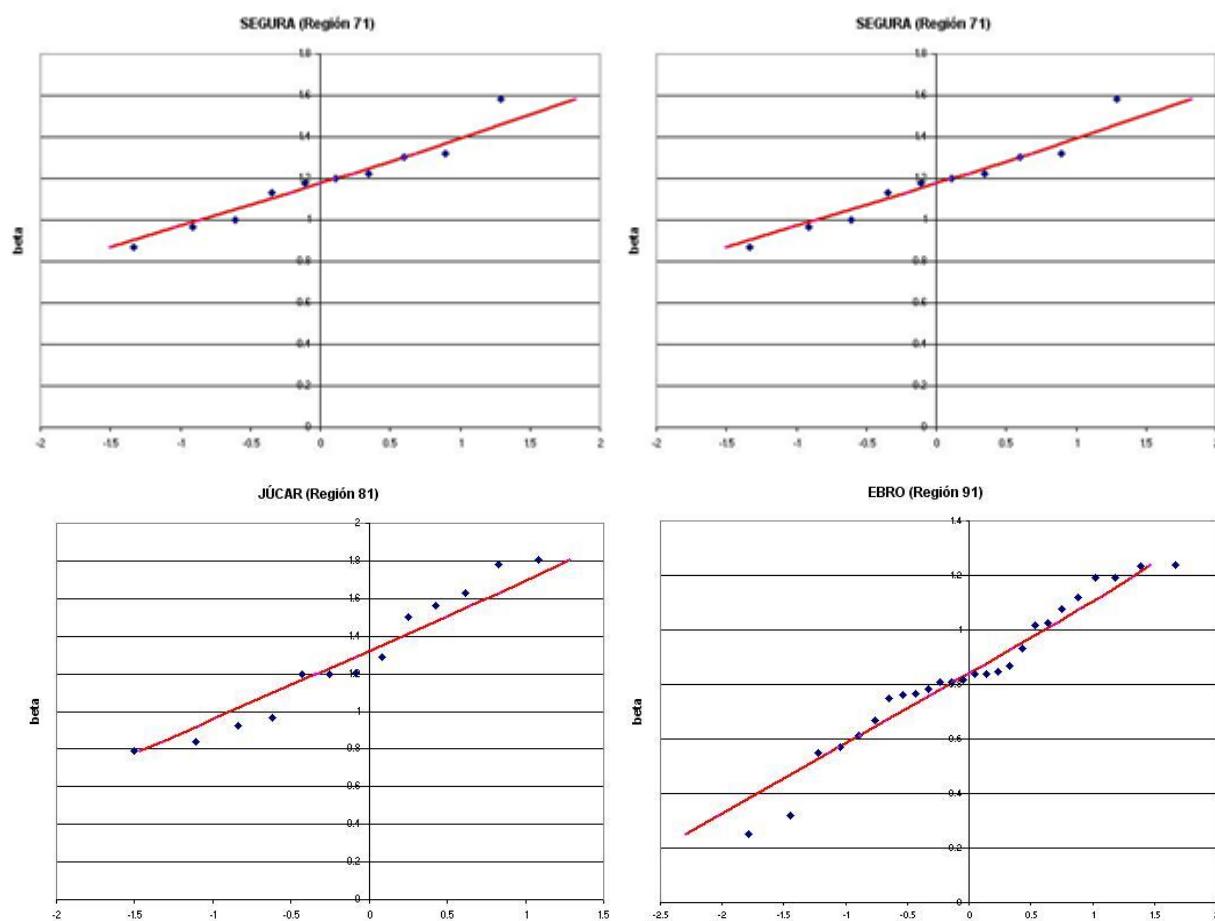
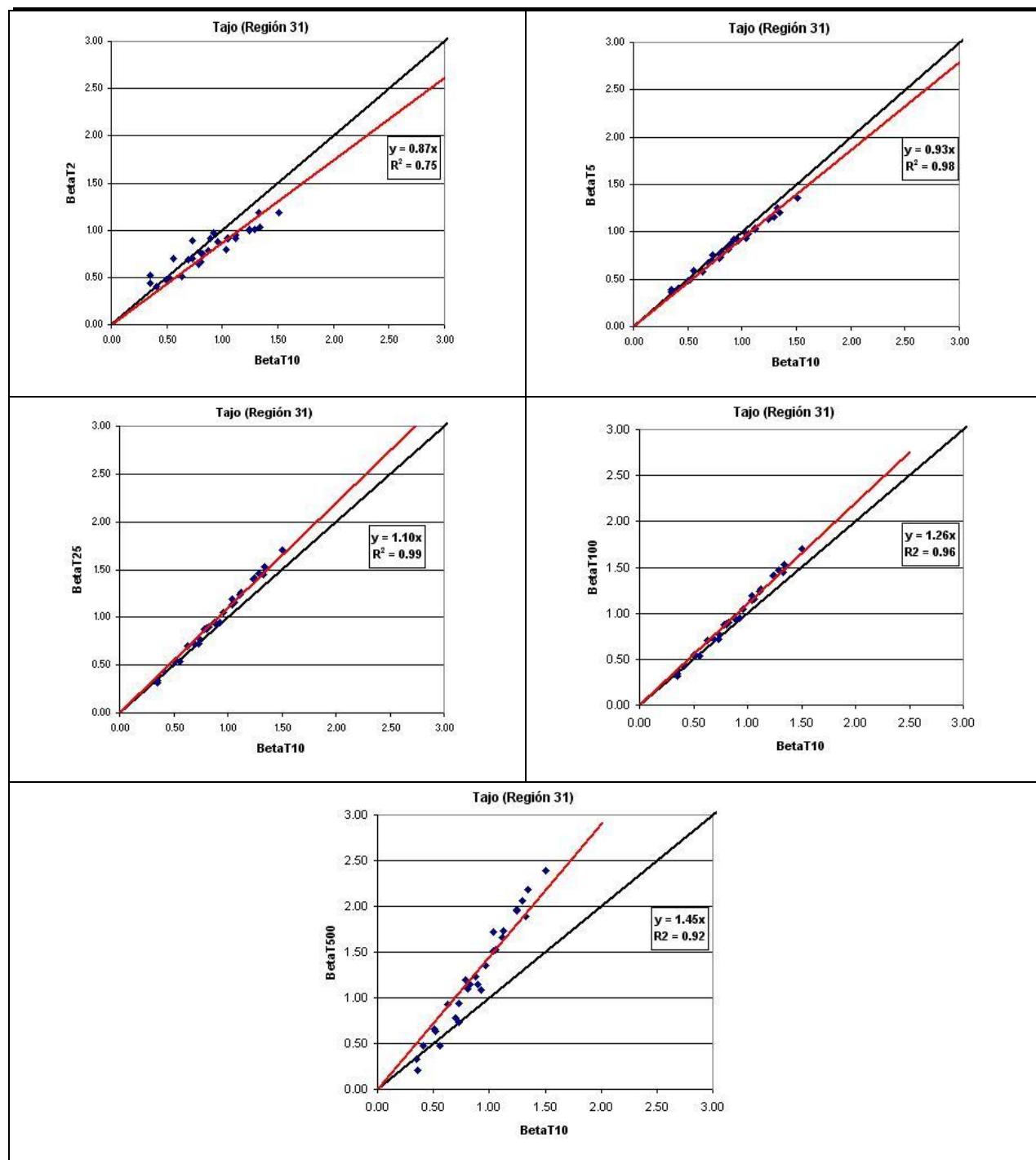
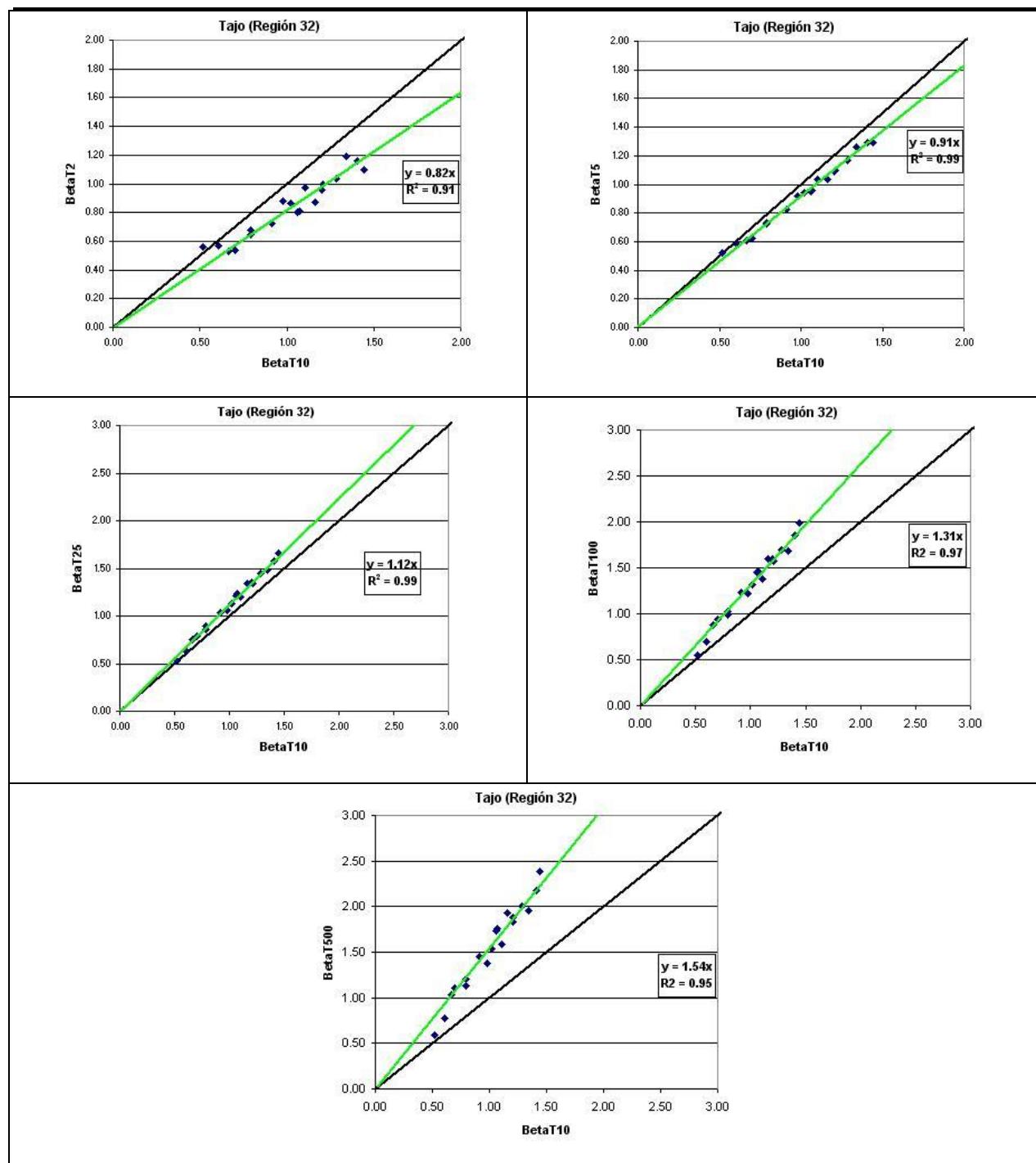


Figura 28. Probabilidades muestrales del coeficiente corrector del umbral de escorrentía para una selección de regiones estadísticas.

Por otra parte, como se comentó anteriormente, los valores de coeficiente β se han obtenido ajustando las leyes de frecuencia calculadas mediante el método racional a las obtenidas a partir de los registros de aforos, de tal forma que hubiera coincidencia entre ambas leyes de frecuencia para el periodo de retorno de 10 años. Al aplicar el coeficiente corrector así obtenido al cálculo de otros periodos de retorno diferentes del de 10 años, se observa que los resultados no son del todo satisfactorios, no existiendo coincidencia en la forma funcional de la ley de frecuencia obtenida a partir de los datos de aforos mediante métodos estadísticos con la calculada mediante el método racional. Esta circunstancia queda bien ilustrada si se comparan los resultados obtenidos para el coeficiente corrector imponiendo el ajuste para el periodo de retorno de 10 años con los obtenidos imponiendo el ajuste para otros periodos de retorno. A modo de ejemplo se muestran los gráficos correspondientes a las regiones de la cuenca del Tajo.





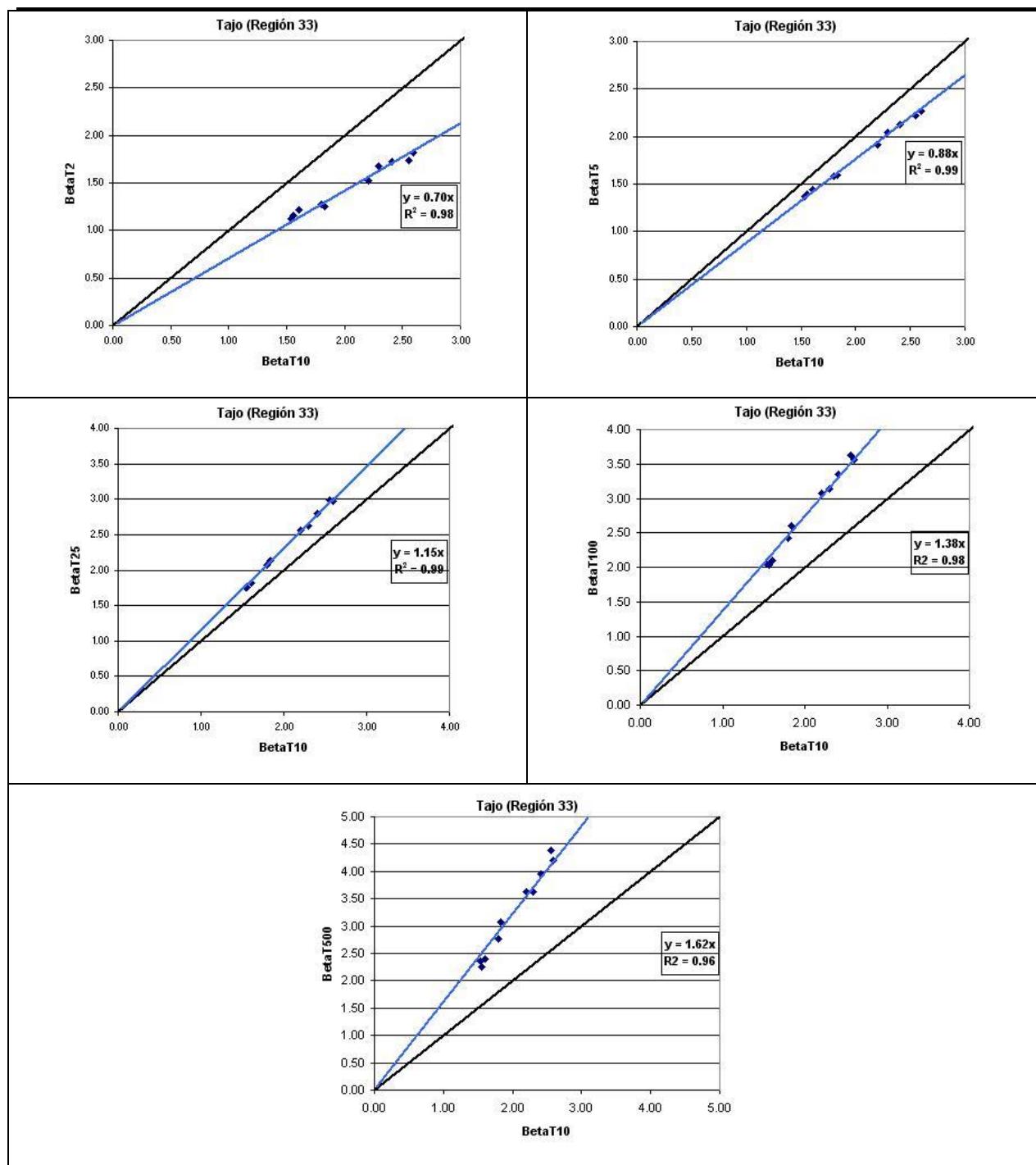


Figura 29. Relaciones entre los coeficientes correctores del umbral de escorrentía en función del periodo de retorno para las regiones consideradas en la cuenca del Tajo.

Se observa cómo la distribución de los puntos representados en el gráfico se aleja sistemáticamente de la línea a 45º en torno a la cual deberían estar situados si hubiera coincidencia en los valores obtenidos para distintos períodos de retorno. De esa forma se puede cuantificar una corrección al coeficiente β en función del periodo de retorno que se esté calculando (tabla 6), de tal manera que la forma funcional de la ley de frecuencia calculada mediante la aplicación del método racional coincida con la obtenida mediante procedimientos estadísticos.

$$\beta_T = \beta_{10} \cdot F_T$$

Donde β_{10} es el coeficiente corrector del umbral de escorrentía para el periodo de retorno de 10 años, β_T el coeficiente corrector del umbral de escorrentía para el periodo de retorno T, y F_T un factor función del periodo de retorno.

Tabla 6. Factores correctores del coeficiente β en función del periodo de retorno para las distintas regiones estadísticas

| Región | Periodo de Retorno (Años) | | | | |
|--------|---------------------------|------|------|------|------|
| | T2 | T5 | T25 | T100 | T500 |
| 11 | 0.80 | 0.90 | 1.13 | 1.34 | 1.59 |
| 12 | 0.75 | 0.90 | 1.14 | 1.33 | 1.56 |
| 13 | 0.74 | 0.90 | 1.15 | 1.34 | 1.55 |
| 21 | 0.74 | 0.88 | 1.18 | 1.47 | 1.90 |
| 22 | 0.74 | 0.90 | 1.12 | 1.27 | 1.37 |
| 23 | 0.77 | 0.89 | 1.15 | 1.44 | 1.82 |
| 24 | 0.76 | 0.90 | 1.14 | 1.36 | 1.63 |
| 25 | 0.82 | 0.92 | 1.12 | 1.29 | 1.48 |
| 31 | 0.87 | 0.93 | 1.10 | 1.26 | 1.45 |
| 32 | 0.82 | 0.91 | 1.12 | 1.31 | 1.54 |
| 33 | 0.70 | 0.88 | 1.15 | 1.38 | 1.62 |
| 41 | 0.91 | 0.96 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 42 | 0.67 | 0.86 | 1.18 | 1.46 | 1.78 |
| 511 | 0.81 | 0.91 | 1.12 | 1.30 | 1.50 |
| 512 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 52 | 0.89 | 0.94 | 1.09 | 1.22 | 1.36 |
| 53 | 0.68 | 0.87 | 1.16 | 1.38 | 1.56 |
| 71 | 0.82 | 0.94 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 72 | 0.67 | 0.86 | 1.00 | - | - |
| 81 | 0.76 | 0.90 | 1.14 | 1.34 | 1.58 |
| 821 | 0.82 | 0.91 | 1.07 | - | - |
| 822 | 0.70 | 0.86 | 1.16 | - | - |
| 83 | 0.63 | 0.85 | 1.21 | 1.51 | 1.85 |
| 91 | 0.72 | 0.88 | 1.19 | 1.52 | 1.95 |
| 92 | 0.82 | 0.94 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 93 | 0.77 | 0.92 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 941 | 0.68 | 0.87 | 1.17 | 1.39 | 1.64 |
| 942 | 0.77 | 0.91 | 1.11 | 1.24 | 1.32 |
| 951 | 0.72 | 0.88 | 1.17 | 1.43 | 1.78 |
| 952 | 0.77 | 0.90 | 1.13 | 1.32 | 1.54 |

5.2. ESTIMACIÓN EN CUENCAS GRANDES: MÉTODO ESTADÍSTICO

La estimación de los cuantiles en los puntos de la red fluvial no aforados, es decir, en ausencia de medidas locales, puede ser abordada mediante la aplicación de los modelos estadísticos regionales, y puede ser la única opción viable en aquellos puntos con una importante área vertiente donde el uso de los modelos hidrometeorológicos puede no ser adecuado. Estos métodos suelen constar de tres fases principales en su aplicación:

- Identificación de la región con comportamiento estadístico homogéneo donde debe incluirse el punto de estudio.



- Establecimiento de relaciones entre distintas características (fisiográficas, climáticas, edafológicas, etc.) de la cuenca vertiente al punto (variables explicativas) y los estadísticos o cuantiles a estimar, siendo frecuente la aplicación de ecuaciones de regresión logarítmicas.
- Aplicación de las relaciones anteriores en los puntos sin registro.

Los distintos métodos propuestos pueden clasificarse en dos grupos según el tipo de estadístico que se seleccione para realizar la extrapolación de información a los puntos no aforados:

- Métodos que relacionan directamente las estimaciones locales de los cuantiles realizadas en los puntos aforados con las variables características de las cuencas vertientes. Este modelo ha sido ampliamente utilizado en EE.UU. por el U.S. Geological Survey (USGS).
- Modelos que asumen una determinada función de distribución regional que puede ser particularizada al punto de estudio a partir de determinados estadísticos (como la media o el coeficiente de variación) que son los que se relacionan con las variables características de las cuencas. Como caso particular se encuentran los modelos de “índice de avenida”, que toman como único estadístico la media de la serie.

Para la elaboración del mapa de caudales máximos se ha empleado el primer tipo de métodos por presentar las siguientes ventajas frente a los modelos que asumen una función de distribución regional:

- Capacidad para considerar en el análisis la información sobre avenidas históricas.
- Capacidad para considerar la correlación entre estaciones.
- Amplia experiencia en su aplicación a escala nacional. Como se ha dicho anteriormente, es el método empleado por el USGS para el cálculo de caudales máximos en EE.UU.

5.2.1. Bases teóricas de los modelos regionales basados en ecuaciones de regresión múltiple

Los modelos regionales basados en el análisis de regresiones lineales múltiples tratan de determinar qué variables hidrológicas características de la cuenca vertiente explican la variabilidad del estadístico que se quiere regionalizar, en este caso los cuantiles de caudal máximo. Para ello desarrollan ecuaciones de regresión lineal múltiple entre los cuantiles de un determinado periodo de retorno y las variables seleccionadas. Dichas ecuaciones pueden ser aplicadas a puntos no aforados, de tal forma que permiten estimar los cuantiles a partir de las variables características de la cuenca, variables que son conocidas en cualquier punto.

Es habitual emplear ecuaciones de regresión logarítmicas en los estudios de caudales máximos, siendo la forma de la ecuación:

$$\log Y_T = b_0 + b_1 \log X_1 + b_2 \log X_2 + \dots + b_n \log X_n$$

O lo que es lo mismo:

$$Y_T = 10^{b_0} X_1^{b_1} X_2^{b_2} \dots X_n^{b_n}$$

Siendo:

Y_T : La variable dependiente que se quiere regionalizar. En este caso los cuantiles de caudal de avenida.



X_i: Las variables explicativas. Características fisiográficas, climáticas, edafológicas, ... de la cuenca vertiente al punto.

b_i: Coeficientes de la ecuación de regresión.

Las frecuencias de los cuantiles de caudal de avenida y de las características hidrológicas de las cuencas están aproximadamente descritas según una distribución log-normal, por lo que las transformaciones logarítmicas de las variables son necesarias para linealizar la relación entre las variables explicativas y la variable dependiente, y que de esa manera se satisfagan las hipótesis básicas del modelo de regresión. El ajuste de los coeficientes de la ecuación de regresión suele realizarse habitualmente por el método de los mínimos cuadrados ordinarios.

Las variables explicativas deben seleccionarse de tal forma que tengan una correlación significativa con la variable dependiente y, por tanto, permitan explicar su variabilidad, y que no tengan una correlación significativa entre sí. Aquellas variables explicativas muy correlacionadas entre sí proporcionan prácticamente la misma información desde un punto de vista estadístico y, por lo tanto, su inclusión en una misma ecuación de regresión supondría el uso de información redundante. Es, por tanto, imprescindible analizar la dependencia entre las distintas variables características de la cuenca.

5.2.2. Selección y ajuste del modelo de regresión múltiple

El ajuste de las ecuaciones de regresión múltiple se ha realizado para cada una de las zonas con similar comportamiento estadístico, las mismas que se obtuvieron anteriormente como resultado de la aplicación de los test de homogeneidad.

Estas regiones han demostrado tener, en general, un buen comportamiento a la hora de ser empleadas para determinar los modelos regionales de regresión, permitiendo la definición de modelos con errores moderados y elevados coeficientes de determinación. De forma complementaria, se ha realizado un análisis de la distribución espacial de los residuos de la estimación, es decir, de las diferencias entre los cuantiles estimados por el modelo y los reales, con la finalidad de detectar posibles sesgos que indicasen la necesidad de subdividir alguna de las regiones consideradas. De esta forma, se ha decidido utilizar la subdivisión las regiones 51, 82 y 94 indicada en la figuras 25, 26, y 27, para obtener un mejor ajuste de las ecuaciones de regresión.

La figura adjunta muestra la distribución de valores de altitud y precipitación en las cuencas vertientes a las estaciones de aforo seleccionadas en cada una de las regiones consideradas en la cuenca del Tajo, confirmando que las distintas regiones corresponden a combinaciones de características fisiográficas y climáticas diferentes.

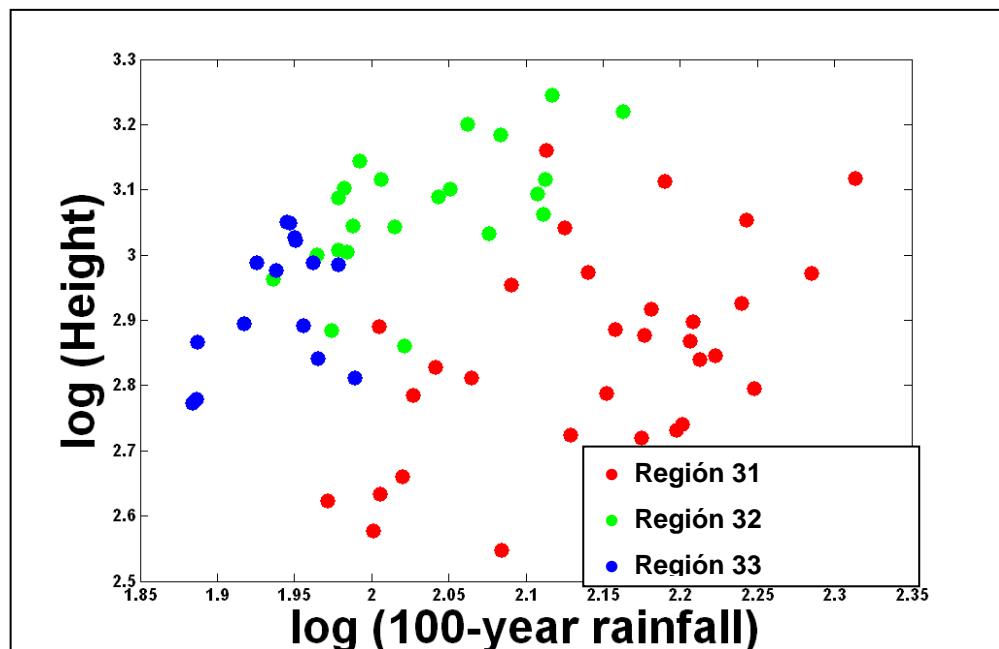


Figura 30. Relación altitud–precipitación en cada una de las regiones estadísticas consideradas en la cuenca del Tajo.

Antes de abordar el análisis de los modelos regionales de regresión lineal múltiple que nos permitan estimar los cuantiles de caudal máximo anual en los puntos no aforados, es necesario seleccionar y calcular aquellas variables descriptoras de las características de las cuencas que puedan tener mayor influencia en el valor de los cuantiles y, por tanto, que sean más adecuadas para explicar la variabilidad de los mismos entre los distintos puntos de medida seleccionados para el análisis.

Las variables seleccionadas en una primera fase fueron las siguientes:

- Características fisiográficas de la cuenca: Área de la cuenca, área drenante con altitud mayor de 1500 m, perímetro de la cuenca, longitud del río principal, pendiente del río principal, altitud media de la cuenca, pendiente media de la cuenca.
- Características climáticas: Cuantiles de precipitación máxima diaria, precipitación media anual.
- Características del suelo y de los usos del suelo: Parámetro P0, tasa mínima de infiltración.

Como se comentó anteriormente, de entre las variables inicialmente consideradas, es necesario seleccionar aquéllas que finalmente se van a incluir en el análisis de los modelos de regresión como variables explicativas, y deben ser aquellas que presenten una mayor correlación con la variable dependiente y, por tanto, permitan explicar mejor su variabilidad, y que al mismo tiempo no tengan una correlación significativa entre sí. Dichas correlaciones se establecerán, lógicamente, entre los logaritmos de las variables, al ser logarítmicos los modelos de regresión múltiple considerados (figuras 31 y 32). Las variables explicativas finalmente seleccionadas teniendo en cuenta las consideraciones anteriores han sido las siguientes:

- Área drenante: **A**

- Área drenante con altitud mayor de 1500 m: A_{1500}
- Cuantiles de precipitación máxima diaria: P_x (x= periodo de retorno del cuantil de precipitación).
- Altitud media de la cuenca: H
- Pendiente media de la cuenca: P_{cuenca}
- Umbral de escorrentía: P_o
- Tasa mínima de infiltración: Inf

En el caso de las regiones 941 y 942 se ha sustituido la variable Área por la superficie de cuenca una vez descontada la parte del terreno con una elevada permeabilidad, variable que se ha denominado Área equivalente (Aeq). En la región 82 se ha empleado como variable la superficie de cuenca comprendida dentro de la región, eliminando la parte correspondiente a la cuenca vertiente situada en regiones de aguas arriba (Área efectiva, Aef). De igual forma se ha sustituido la variable precipitación por su valor medio en la parte de cuenca correspondiente al área efectiva (precipitación efectiva, Pef).

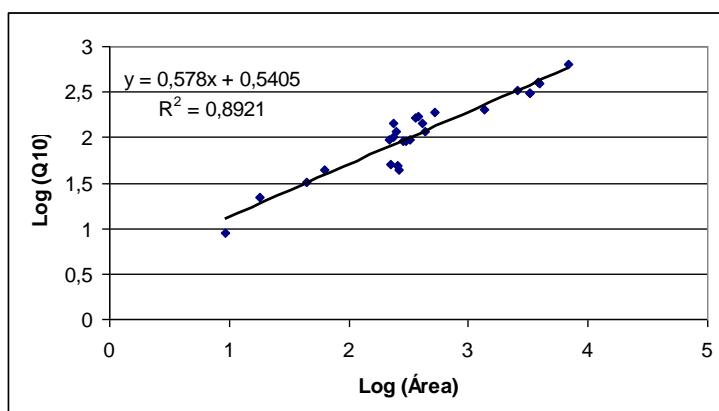


Figura 31. Ejemplo de correlación de la variable área de la cuenca con el cuantil de caudal máximo anual de 10 años de periodo de retorno.

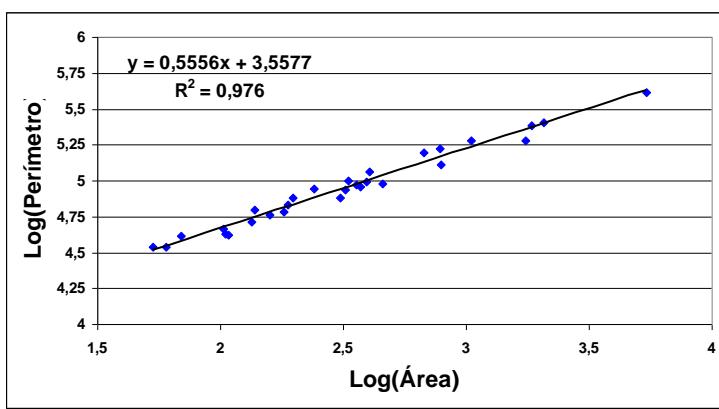


Figura 32. Ejemplo de correlación entre las variables área y perímetro de la cuenca.

De entre todas las variables características de las cuencas que presentan una correlación significativa con la variable dependiente y una correlación pequeña entre sí, es necesario seleccionar aquél conjunto de variables que mejor explican la variabilidad de los cuantiles. La decisión sobre cuál de entre todos los modelos posibles presenta un mejor comportamiento se toma comparando el valor que adoptan distintos estadísticos en cada uno de los modelos. Los estadísticos utilizados para realizar ese análisis son habitualmente los siguientes:



- Coeficiente de determinación (R^2): este estadístico mide la proporción de variación de la variable dependiente que es explicada por el modelo.
- Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{corr}): representa una corrección del estadístico anterior teniendo en cuenta el número de estaciones incluidas en el análisis y el número de variables explicativas adoptadas por el modelo.
- Error estándar de regresión (e): Es una medida de la diferencia entre los valores reales de los cuantiles en cada estación y los valores estimados por los modelos.
- Suma de los errores cuadráticos de predicción (PRESS): Este estadístico se calcula realizando el ajuste de la ecuación de regresión con todas las estaciones menos una, aplicando la ecuación deducida a la estación no incluida en el análisis y calculando el error cuadrático respecto al valor real del cuantil en dicha estación. Este proceso se repite para cada una de las estaciones, calculando finalmente la suma de los errores.
- Coeficiente de Mallow (C_p): El coeficiente de Mallow representa un compromiso entre maximizar la proporción de varianza de la variable dependiente que es explicada por el modelo incluyendo todas las variables relevantes, y minimizar el error de la estimación reduciendo el número de variables empleadas.

El modelo finalmente seleccionado debe ser aquél con un menor valor del error cuadrático medio, del coeficiente de Mallow y del error cuadrático de predicción, y un mayor valor del coeficiente de determinación ajustado. En cualquier caso, el modelo seleccionado no sólo debe tener un buen comportamiento desde un punto de vista matemático sino que, además, la ecuación debe tener sentido físico, reflejando relaciones funcionales entre los cuantiles y las variables que representen el comportamiento real de la cuenca.

Los modelos finalmente seleccionados para cada una de las regiones y cada uno de los períodos de retorno se muestran en la tabla adjunta. En el caso de las regiones 13 y 83 los cálculos se han realizado aplicando únicamente el método racional, por lo que no se han ajustado ecuaciones de regresión en estas zonas.

Tabla 7. Modelos de regresión seleccionados para cada periodo de retorno en cada una de las regiones consideradas.

| Región 11 | | |
|---|---------------------|------------|
| $Q_2 = 10^{-3.7218} A^{0.7787} P_2^{1.9589} H^{0.1422}$ | $R^2_{corr} = 0.98$ | $e = 35\%$ |
| $Q_5 = 10^{-3.4783} A^{0.7642} P_5^{1.7620} H^{0.1904}$ | $R^2_{corr} = 0.98$ | $e = 35\%$ |
| $Q_{10} = 10^{-3.4354} A^{0.7608} P_{10}^{1.6975} H^{0.2155}$ | $R^2_{corr} = 0.98$ | $e = 36\%$ |
| $Q_{25} = 10^{-3.3354} A^{0.7556} P_{25}^{1.6294} H^{0.2257}$ | $R^2_{corr} = 0.98$ | $e = 37\%$ |
| $Q_{100} = 10^{-3.3011} A^{0.7517} P_{100}^{1.5736} H^{0.248}$ | $R^2_{corr} = 0.98$ | $e = 37\%$ |
| $Q_{500} = 10^{-3.2441} A^{0.7495} P_{500}^{1.5305} H^{0.2536}$ | $R^2_{corr} = 0.98$ | $e = 38\%$ |

| Región 12 | | |
|--|---------------------|------------|
| $Q_2 = 10^{-2.4324} A^{0.8030} P_2^{1.4139}$ | $R^2_{corr} = 0.93$ | $e = 33\%$ |
| $Q_5 = 10^{-2.9240} A^{0.8097} P_5^{1.6699}$ | $R^2_{corr} = 0.92$ | $e = 33\%$ |

| | | |
|--|---------------------|------------|
| $Q_{10} = 10^{-3.1828} A^{0.8122} P_{10}^{1.7884}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 33\%$ |
| $Q_{25} = 10^{-3.5936} A^{0.8162} P_{25}^{1.9674}$ | $R_{corr}^2 = 0.91$ | $e = 33\%$ |
| $Q_{100} = 10^{-3.9729} A^{0.8205} P_{100}^{2.1072}$ | $R_{corr}^2 = 0.90$ | $e = 34\%$ |
| $Q_{500} = 10^{-4.2903} A^{0.8225} P_{500}^{2.2081}$ | $R_{corr}^2 = 0.90$ | $e = 35\%$ |

| Región 21 | | |
|--|---------------------|------------|
| $Q_2 = 10^{-2.8714} A^{0.7943} P_2^{2.1936} P_0^{-0.7557} A_{1500}^{0.0061}$ | $R_{corr}^2 = 0.91$ | $e = 38\%$ |
| $Q_5 = 10^{-2.8316} A^{0.7917} P_5^{2.0671} P_0^{-0.6784} A_{1500}^{0.0233}$ | $R_{corr}^2 = 0.85$ | $e = 37\%$ |
| $Q_{10} = 10^{-2.8375} A^{0.7900} P_{10}^{2.0257} P_0^{-0.6612} A_{1500}^{0.0323}$ | $R_{corr}^2 = 0.82$ | $e = 36\%$ |
| $Q_{25} = 10^{-2.9577} A^{0.7915} P_{25}^{2.0155} P_0^{-0.6203} A_{1500}^{0.0409}$ | $R_{corr}^2 = 0.80$ | $e = 36\%$ |
| $Q_{100} = 10^{-3.0445} A^{0.7893} P_{100}^{2.0001} P_0^{-0.604} A_{1500}^{0.0445}$ | $R_{corr}^2 = 0.77$ | $e = 37\%$ |
| $Q_{500} = 10^{-3.0818} A^{0.7859} P_{500}^{1.9596} P_0^{-0.5916} A_{1500}^{0.0485}$ | $R_{corr}^2 = 0.75$ | $e = 37\%$ |

| Región 22 | | |
|---|---------------------|------------|
| $Q_2 = 10^{-200285} A^{0.7844} P_2^{124275}$ | $R_{corr}^2 = 0.98$ | $e = 25\%$ |
| $Q_5 = 10^{-23.1685} A^{0.6481} P_5^{13.9405}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 20\%$ |
| $Q_{10} = 10^{-20.0814} A^{0.6364} P_{10}^{11.6693}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 17\%$ |
| $Q_{25} = 10^{-18.1705} A^{0.6698} P_{25}^{10.1204}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 21\%$ |
| $Q_{100} = 10^{-14.7762} A^{0.7238} P_{100}^{7.7968}$ | $R_{corr}^2 = 0.87$ | $e = 27\%$ |
| $Q_{500} = 10^{-13.3324} A^{0.7662} P_{500}^{6.728}$ | $R_{corr}^2 = 0.81$ | $e = 30\%$ |

| Región 23 | | |
|--|---------------------|------------|
| $Q_2 = 10^{-10.1984} A^{0.7450} H^{3.4616} Inf^{-0.4239}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 35\%$ |
| $Q_5 = 10^{-9.5661} A^{0.7363} H^{3.3294} Inf^{-0.4148}$ | $R_{corr}^2 = 0.91$ | $e = 37\%$ |
| $Q_{10} = 10^{-9.3464} A^{0.7338} H^{3.2914} Inf^{-0.4118}$ | $R_{corr}^2 = 0.90$ | $e = 38\%$ |
| $Q_{25} = 10^{-9.1241} A^{0.7309} H^{3.2514} Inf^{-0.4055}$ | $R_{corr}^2 = 0.88$ | $e = 39\%$ |
| $Q_{100} = 10^{-9.0096} A^{0.7327} H^{3.2456} Inf^{-0.3971}$ | $R_{corr}^2 = 0.88$ | $e = 39\%$ |
| $Q_{500} = 10^{-8.8400} A^{0.7306} H^{3.2251} Inf^{-0.3946}$ | $R_{corr}^2 = 0.86$ | $e = 40\%$ |

Región 24

| | | |
|--|---------------------|------------|
| $Q_2 = 10^{-0.9956} A^{0.5564} P_2^{0.6634} P_0^{-0.0003}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 24\%$ |
| $Q_5 = 10^{-0.8883} A^{0.5728} P_5^{0.8498} P_0^{-0.2079}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 18\%$ |
| $Q_{10} = 10^{-0.9069} A^{0.5851} P_{10}^{0.9128} P_0^{-0.2529}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 18\%$ |
| $Q_{25} = 10^{-0.9568} A^{0.5983} P_{25}^{0.9698} P_0^{-0.2771}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 18\%$ |
| $Q_{100} = 10^{-0.8516} A^{0.6015} P_{100}^{0.9800} P_0^{-0.3292}$ | $R_{corr}^2 = 0.94$ | $e = 18\%$ |
| $Q_{500} = 10^{-0.8358} A^{0.6056} P_{500}^{1.0067} P_0^{-0.3491}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 18\%$ |

Región 25

| | | |
|--|---------------------|------------|
| $Q_2 = 10^{-2.3415} A^{0.9077} P_2^{1.5692} Inf^{-0.4387}$ | $R_{corr}^2 = 0.81$ | $e = 22\%$ |
| $Q_5 = 10^{-1.7979} A^{0.8679} P_5^{1.5693} Inf^{-0.7148}$ | $R_{corr}^2 = 0.91$ | $e = 15\%$ |
| $Q_{10} = 10^{-1.5903} A^{0.8536} P_{10}^{1.5593} Inf^{-0.8164}$ | $R_{corr}^2 = 0.94$ | $e = 12\%$ |
| $Q_{25} = 10^{-1.4529} A^{0.8425} P_{25}^{1.5415} Inf^{-0.8686}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 10\%$ |
| $Q_{100} = 10^{-1.2476} A^{0.8312} P_{100}^{1.5165} Inf^{-0.9594}$ | $R_{corr}^2 = 0.97$ | $e = 8\%$ |
| $Q_{500} = 10^{-1.1564} A^{0.8217} P_{500}^{1.4846} Inf^{-0.9617}$ | $R_{corr}^2 = 0.98$ | $e = 6\%$ |

Región 31

| | | |
|---|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-4.5483} A^{0.8846} P_2^{2.0408} H^{0.2406}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 41$ |
| $Q_5 = 10^{-3.7796} A^{0.8623} P_5^{1.5003} H^{0.3545}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 38$ |
| $Q_{10} = 10^{-3.3602} A^{0.8419} P_{10}^{1.1913} H^{0.4451}$ | $R_{corr}^2 = 0.97$ | $e = 37$ |
| $Q_{25} = 10^{-3.0472} A^{0.8317} P_{25}^{0.9589} H^{0.5261}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 38$ |
| $Q_{100} = 10^{-2.7851} A^{0.8231} P_{100}^{0.8521} H^{0.5424}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 38$ |
| $Q_{500} = 10^{-2.5743} A^{0.8148} P_{500}^{0.7780} H^{0.5565}$ | $R_{corr}^2 = 0.94$ | $e = 39$ |

Región 32

| | | |
|---|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-4.3438} A^{0.6792} P_2^{0.8427} H^{0.9362}$ | $R_{corr}^2 = 0.87$ | $e = 34$ |
| $Q_5 = 10^{-2.9825} A^{0.6569} P_5^{0.8573} H^{0.5532}$ | $R_{corr}^2 = 0.91$ | $e = 29$ |

| | | |
|---|---------------------|----------|
| $Q_{10} = 10^{-2.3975} A^{0.6419} P_{10}^{0.7751} H^{0.4446}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 29$ |
| $Q_{25} = 10^{-1.7958} A^{0.6228} P_{25}^{0.6470} H^{0.3687}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 28$ |
| $Q_{100} = 10^{-0.8303} A^{0.6009} P_{100}^{0.4582} H^{0.2288}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 29$ |
| $Q_{500} = 10^{0.3026} A^{0.5748} P_{500}^{0.1928} H^{0.1032}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 31$ |

| Región 33 | | |
|--|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-11.4712} A^{1.0202} P_2^{6.2131}$ | $R_{corr}^2 = 0.61$ | $e = 37$ |
| $Q_5 = 10^{-7.800} A^{0.9785} P_5^{3.8215}$ | $R_{corr}^2 = 0.67$ | $e = 37$ |
| $Q_{10} = 10^{-6.3343} A^{0.9346} P_{10}^{2.9878}$ | $R_{corr}^2 = 0.70$ | $e = 33$ |
| $Q_{25} = 10^{-4.6026} A^{0.8511} P_{25}^{2.1278}$ | $R_{corr}^2 = 0.64$ | $e = 33$ |
| $Q_{100} = 10^{-4.3105} A^{0.8383} P_{100}^{1.9918}$ | $R_{corr}^2 = 0.65$ | $e = 33$ |
| $Q_{500} = 10^{-3.8301} A^{0.8343} P_{500}^{1.7685}$ | $R_{corr}^2 = 0.64$ | $e = 33$ |

| Región 41 | | |
|--|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-3.6063} A^{0.7391} P_2^{1.9685}$ | $R_{corr}^2 = 0.98$ | $e = 22$ |
| $Q_5 = 10^{-2.8542} A^{0.7593} P_5^{1.5877}$ | $R_{corr}^2 = 0.98$ | $e = 14$ |
| $Q_{10} = 10^{-2.6015} A^{0.7666} P_{10}^{1.4763}$ | $R_{corr}^2 = 0.99$ | $e = 14$ |
| $Q_{25} = 10^{-2.4280} A^{0.7745} P_{25}^{1.4148}$ | $R_{corr}^2 = 0.99$ | $e = 13$ |
| $Q_{100} = 10^{-2.1873} A^{0.7808} P_{100}^{1.3380}$ | $R_{corr}^2 = 0.99$ | $e = 14$ |
| $Q_{500} = 10^{-2.0074} A^{0.7843} P_{500}^{1.3069}$ | $R_{corr}^2 = 0.99$ | $e = 14$ |

| Región 42 | | |
|---|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{0.4500} A^{0.3675} P_0^{-0.5951}$ | $R_{corr}^2 = 0.82$ | $e = 21$ |
| $Q_5 = 10^{0.9296} A^{0.2934} P_0^{-0.5578}$ | $R_{corr}^2 = 0.81$ | $e = 17$ |
| $Q_{10} = 10^{1.2172} A^{0.2848} P_0^{-0.6487}$ | $R_{corr}^2 = 0.81$ | $e = 16$ |



| | | |
|--|---------------------|----------|
| $Q_{25} = 10^{1.3619} A^{0.2633} P_0^{-0.5849}$ | $R_{corr}^2 = 0.79$ | $e = 16$ |
| $Q_{100} = 10^{1.5833} A^{0.2499} P_0^{-0.5734}$ | $R_{corr}^2 = 0.73$ | $e = 18$ |
| $Q_{500} = 10^{1.8252} A^{0.2439} P_0^{-0.5903}$ | $R_{corr}^2 = 0.73$ | $e = 18$ |

| Región 511 | | |
|--|---------------------|------------|
| $Q_2 = 10^{0.5705} A^{0.7916} Inf^{-0.7211}$ | $R_{corr}^2 = 0.94$ | $e = 15\%$ |
| $Q_5 = 10^{0.4818} A^{0.8077} Inf^{-0.3821}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 17\%$ |
| $Q_{10} = 10^{0.5199} A^{0.8145} Inf^{-0.2976}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 18\%$ |
| $Q_{25} = 10^{0.5919} A^{0.8184} Inf^{-0.2328}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 19\%$ |
| $Q_{100} = 10^{0.7114} A^{0.8209} Inf^{-0.1765}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 20\%$ |
| $Q_{500} = 10^{0.8513} A^{0.8237} Inf^{-0.1433}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 21\%$ |

| Región 512 | | |
|---|---------------------|------------|
| $Q_2 = 10^{-0.7351} A^{0.6457} P_2^{0.6315}$ | $R_{corr}^2 = 0.90$ | $e = 26\%$ |
| $Q_5 = 10^{0.0031} A^{0.6235} P_5^{0.3818}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 21\%$ |
| $Q_{10} = 10^{0.2330} A^{0.6176} P_{10}^{0.3289}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 20\%$ |
| $Q_{25} = 10^{0.4534} A^{0.6131} P_{25}^{0.2850}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 20\%$ |
| $Q_{100} = 10^{0.6359} A^{0.6103} P_{100}^{0.2740}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 20\%$ |
| $Q_{500} = 10^{0.8513} A^{0.6077} P_{500}^{0.2480}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 21\%$ |

| Región 52 | | |
|--|---------------------|------------|
| $Q_2 = 10^{-0.3210} A^{0.5870} P_{cuenca}^{0.8045}$ | $R_{corr}^2 = 0.97$ | $e = 22\%$ |
| $Q_5 = 10^{0.0782} A^{0.5994} P_{cuenca}^{0.6140}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 19\%$ |
| $Q_{10} = 10^{0.2388} A^{0.6043} P_{cuenca}^{0.5669}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 20\%$ |
| $Q_{25} = 10^{0.3990} A^{0.6081} P_{cuenca}^{0.5330}$ | $R_{corr}^2 = 0.89$ | $e = 20\%$ |
| $Q_{100} = 10^{0.5889} A^{0.6122} P_{cuenca}^{0.5045}$ | $R_{corr}^2 = 0.86$ | $e = 21\%$ |
| $Q_{500} = 10^{0.7703} A^{0.6155} P_{cuenca}^{0.4870}$ | $R_{corr}^2 = 0.84$ | $e = 22\%$ |

| Región 53 | | |
|-----------|--|--|
|-----------|--|--|



| | | |
|---|---------------------|------------|
| $Q_2 = 10^{-12.4460} A^{1.0404} P_2^{3.2169} P_{med}^{2.1199}$ | $R_{corr}^2 = 0.97$ | $e = 33\%$ |
| $Q_5 = 10^{-10.6420} A^{1.0099} P_5^{2.0874} P_{med}^{2.1715}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 32\%$ |
| $Q_{10} = 10^{-10.1400} A^{1.0043} P_{10}^{1.6934} P_{med}^{2.2597}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 32\%$ |
| $Q_{25} = 10^{-9.7196} A^{1.0045} P_{25}^{1.3756} P_{med}^{2.3427}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 31\%$ |
| $Q_{100} = 10^{-9.5364} A^{1.0142} P_{100}^{1.1186} P_{med}^{2.4900}$ | $R_{corr}^2 = 0.97$ | $e = 30\%$ |
| $Q_{500} = 10^{-9.6450} A^{1.0339} P_{500}^{0.9641} P_{med}^{2.6802}$ | $R_{corr}^2 = 0.98$ | $e = 30\%$ |

| Región 71 | | |
|---|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-13.7091} A^{0.7579} P_2^{7.9400} P_{cuenca}^{0.0378}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 15$ |
| $Q_5 = 10^{-13.3515} A^{0.6110} P_5^{7.5165} P_{cuenca}^{0.0717}$ | $R_{corr}^2 = 0.97$ | $e = 12$ |
| $Q_{10} = 10^{-12.3654} A^{0.5458} P_{10}^{6.8502} P_{cuenca}^{0.1139}$ | $R_{corr}^2 = 0.97$ | $e = 12$ |
| $Q_{25} = 10^{-11.8323} A^{0.5018} P_{25}^{6.3991} P_{cuenca}^{0.1817}$ | $R_{corr}^2 = 0.98$ | $e = 13$ |
| $Q_{100} = 10^{-11.3686} A^{0.4681} P_{100}^{5.9536} P_{cuenca}^{0.2695}$ | $R_{corr}^2 = 0.97$ | $e = 15$ |
| $Q_{500} = 10^{-10.8620} A^{0.4406} P_{500}^{5.5569} P_{cuenca}^{0.3067}$ | $R_{corr}^2 = 0.97$ | $e = 16$ |

| Región 72 | | |
|--|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-0.3384} A^{0.4974} P_2^{0.1337} P_{cuenca}^{0.2386}$ | $R_{corr}^2 = 0.81$ | $e = 20$ |
| $Q_5 = 10^{-0.6893} A^{0.5183} P_5^{0.5389} P_{cuenca}^{0.1102}$ | $R_{corr}^2 = 0.90$ | $e = 19$ |
| $Q_{10} = 10^{-0.6982} A^{0.5306} P_{10}^{0.6003} P_{cuenca}^{0.0715}$ | $R_{corr}^2 = 0.90$ | $e = 21$ |
| $Q_{25} = 10^{-0.8227} A^{0.5972} P_{25}^{0.6914}$ | $R_{corr}^2 = 0.82$ | $e = 23$ |
| $Q_{100} = 10^{-0.5867} A^{0.7131} P_{100}^{0.7542} P_{cuenca}^{0.0115}$ | $R_{corr}^2 = 0.74$ | $e = 29$ |
| $Q_{500} = 10^{-0.2564} A^{0.7009} P_{500}^{0.7196} P_{cuenca}^{0.0320}$ | $R_{corr}^2 = 0.80$ | $e = 28$ |

| Región 81 | | |
|--|---------------------|----------|
| Júcar-Cabriel: | | |
| $Q_2 = 10^{-0.3661} A^{0.6122} P_2^{0.4951} Inf^{-0.3648}$ | $R_{corr}^2 = 0.97$ | $e = 13$ |
| $Q_5 = 10^{-0.9307} A^{0.5789} P_5^{1.2594} Inf^{-0.7317}$ | $R_{corr}^2 = 0.98$ | $e = 7$ |
| $Q_{10} = 10^{-1.1632} A^{0.5679} P_{10}^{1.5149} Inf^{-0.8555}$ | $R_{corr}^2 = 0.98$ | $e = 6$ |
| $Q_{25} = 10^{-1.3391} A^{0.5572} P_{25}^{1.6869} Inf^{-0.9328}$ | $R_{corr}^2 = 0.98$ | $e = 7$ |



| | | |
|--|---------------------|----------|
| $Q_{100} = 10^{-1.3857} A^{0.5500} P_{100}^{1.7747} Inf^{-1.0153}$ | $R_{corr}^2 = 0.97$ | $e = 8$ |
| $Q_{500} = 10^{-1.3921} A^{0.5451} P_{500}^{1.8127} Inf^{-1.0650}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 10$ |
| Turia-Magro: | | |
| $Q_2 = 10^{-8.4715} A^{0.6942} P_2^{4.8542} P_0^{-0.1391}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 17$ |
| $Q_5 = 10^{-8.8687} A^{0.6449} P_5^{4.9729} P_0^{-0.1630}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 16$ |
| $Q_{10} = 10^{-9.0516} A^{0.6378} P_{10}^{4.9170} P_0^{-0.1224}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 19$ |
| $Q_{25} = 10^{-9.0371} A^{0.6200} P_2^{4.7587} P_0^{-0.0811}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 20$ |
| $Q_{100} = 10^{-8.5187} A^{0.6068} P_{100}^{4.3401} P_0^{-0.0610}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 21$ |
| $Q_{500} = 10^{-8.5395} A^{0.5944} P_{500}^{4.1912} P_0^{-0.0068}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 21$ |

| Región 82 | | |
|---|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-0.5160} A^{0.7810} P_2^{0.2271}$ | $R_{corr}^2 = 0.91$ | $e = 40$ |
| $Q_5 = 10^{-0.6357} A^{0.7433} P_5^{0.4752}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 34$ |
| $Q_{10} = 10^{-0.5846} A^{0.7299} P_{10}^{0.5127}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 33$ |
| $Q_{25} = 10^{-0.5908} A^{0.7167} P_{25}^{0.5845}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 32$ |
| $Q_{100} = 10^{0.1974} A^{0.4900} P_{100}^{0.7305}$ | $R_{corr}^2 = 0.84$ | $e = 29$ |
| $Q_{500} = 10^{0.9360} A^{0.4621} P_{500}^{0.5740}$ | $R_{corr}^2 = 0.86$ | $e = 28$ |

| Región 91 | | |
|---|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-4.8949} A^{0.7753} P_2^{2.9029} H^{0.0296} Inf^{-0.0480}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 33$ |
| $Q_5 = 10^{-5.2636} A^{0.7701} P_5^{2.7966} H^{0.1521} Inf^{-0.0147}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 35$ |
| $Q_{10} = 10^{-5.3835} A^{0.7708} P_{10}^{2.7156} H^{0.2066} Inf^{-0.0146}$ | $R_{corr}^2 = 0.94$ | $e = 36$ |
| $Q_{25} = 10^{-5.5541} A^{0.7733} P_{25}^{2.6320} H^{0.2758} Inf^{-0.0179}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 37$ |
| $Q_{100} = 10^{-5.7549} A^{0.7738} P_{100}^{2.5530} H^{0.3441} Inf^{-0.0200}$ | $R_{corr}^2 = 0.91$ | $e = 39$ |
| $Q_{500} = 10^{-5.7856} A^{0.7758} P_{500}^{2.4363} H^{0.3860} Inf^{-0.0278}$ | $R_{corr}^2 = 0.90$ | $e = 40$ |

| Región 92 | | |
|--|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-4.2161} A^{0.7025} P_2^{2.4689} A_{1500}^{0.0555}$ | $R_{corr}^2 = 0.89$ | $e = 38$ |
| $Q_5 = 10^{-5.0198} A^{0.6848} P_5^{2.8779} A_{1500}^{0.0514}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 37$ |

| | | |
|--|---------------------|----------|
| $Q_{10} = 10^{-5.2974} A^{0.6731} P_{10}^{2.9953} A_{1500}^{0.0536}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 37$ |
| $Q_{25} = 10^{-5.7193} A^{0.6616} P_{25}^{3.1736} A_{1500}^{0.0525}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 38$ |
| $Q_{100} = 10^{-6.0179} A^{0.6445} P_{100}^{3.2754} A_{1500}^{0.0576}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 39$ |
| $Q_{500} = 10^{-6.3493} A^{0.6313} P_{500}^{3.3862} A_{1500}^{0.0602}$ | $R_{corr}^2 = 0.92$ | $e = 41$ |

| Región 93 | | |
|--|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-4.6332} A^{0.5964} P_2^{2.6017}$ | $R_{corr}^2 = 0.94$ | $e = 41$ |
| $Q_5 = 10^{-4.0275} A^{0.5540} P_5^{2.3431}$ | $R_{corr}^2 = 0.94$ | $e = 36$ |
| $Q_{10} = 10^{-3.8337} A^{0.5454} P_{10}^{2.2615}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 36$ |
| $Q_{25} = 10^{-3.6353} A^{0.5400} P_{25}^{2.1800}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 36$ |
| $Q_{100} = 10^{-3.4751} A^{0.5366} P_{100}^{2.1320}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 36$ |
| $Q_{500} = 10^{-3.2865} A^{0.5359} P_{500}^{2.0857}$ | $R_{corr}^2 = 0.93$ | $e = 36$ |

| Región 941 | | |
|---|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-0.6172} A_{eq}^{0.6500}$ | $R_{corr}^2 = 0.79$ | $e = 51$ |
| $Q_5 = 10^{-0.3476} A_{eq}^{0.6600}$ | $R_{corr}^2 = 0.82$ | $e = 42$ |
| $Q_{10} = 10^{-0.2003} A_{eq}^{0.6631}$ | $R_{corr}^2 = 0.81$ | $e = 40$ |
| $Q_{25} = 10^{-0.0321} A_{eq}^{0.6653}$ | $R_{corr}^2 = 0.79$ | $e = 40$ |
| $Q_{100} = 10^{0.1948} A_{eq}^{0.6671}$ | $R_{corr}^2 = 0.76$ | $e = 41$ |
| $Q_{500} = 10^{0.4382} A_{eq}^{0.6681}$ | $R_{corr}^2 = 0.75$ | $e = 41$ |

| Región 942 | | |
|--|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-0.0758} A_{eq}^{0.5550}$ | $R_{corr}^2 = 0.96$ | $e = 20$ |
| $Q_5 = 10^{0.5225} A_{eq}^{0.4488}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 22$ |
| $Q_{10} = 10^{0.7892} A_{eq}^{0.4083}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 21$ |
| $Q_{25} = 10^{1.0681} A_{eq}^{0.3689}$ | $R_{corr}^2 = 0.95$ | $e = 21$ |



| | | |
|---|---------------------|----------|
| $Q_{100} = 10^{1.4235} A_{eq}^{0.3203}$ | $R^2_{corr} = 0.94$ | $e = 20$ |
| $Q_{500} = 10^{1.7907} A_{eq}^{0.2707}$ | $R^2_{corr} = 0.88$ | $e = 20$ |

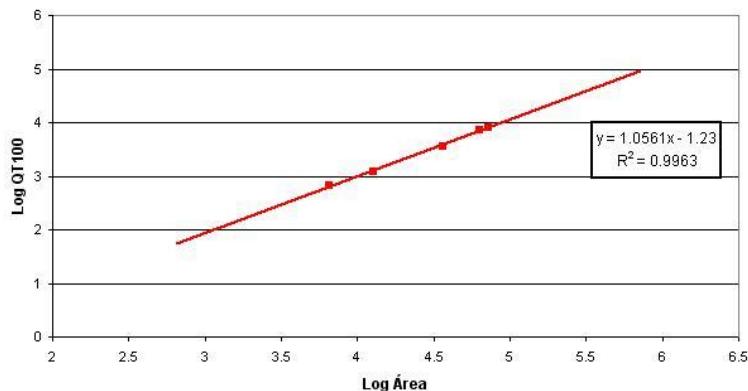
| Región 95 | | |
|--|---------------------|----------|
| $Q_2 = 10^{-0.4020} A^{0.7036} A_{1500}^{0.1238} P_{cuenca}^{0.0840}$ | $R^2_{corr} = 0.90$ | $e = 21$ |
| $Q_5 = 10^{0.0473} A^{0.6371} A_{1500}^{0.0626} P_{cuenca}^{0.0960}$ | $R^2_{corr} = 0.93$ | $e = 20$ |
| $Q_{10} = 10^{0.2446} A^{0.6141} A_{1500}^{0.0438} P_{cuenca}^{0.0949}$ | $R^2_{corr} = 0.93$ | $e = 20$ |
| $Q_{25} = 10^{0.4402} A^{0.5950} A_{1500}^{0.0292} P_{cuenca}^{0.0918}$ | $R^2_{corr} = 0.94$ | $e = 20$ |
| $Q_{100} = 10^{0.6675} A^{0.5775} A_{1500}^{0.0165} P_{cuenca}^{0.0873}$ | $R^2_{corr} = 0.94$ | $e = 20$ |
| $Q_{500} = 10^{0.8783} A^{0.5654} A_{1500}^{0.0082} P_{cuenca}^{0.0832}$ | $R^2_{corr} = 0.93$ | $e = 20$ |

5.2.3. Modelo de regresión para los ejes principales

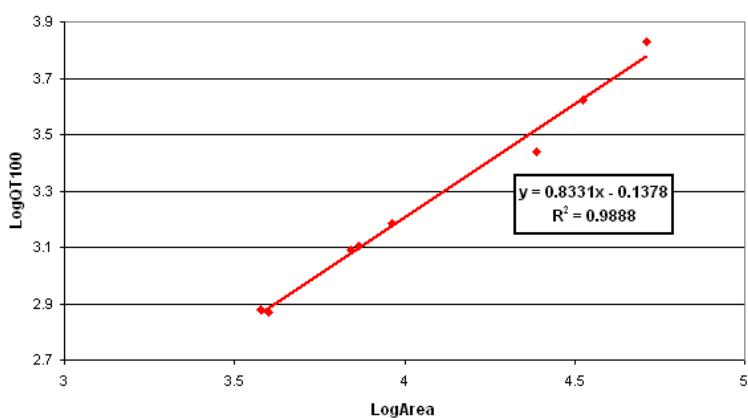
Para obtener los caudales en los puntos de las corrientes principales correspondientes a grandes cuencas vertientes no se han empleado las ecuaciones de regresión múltiple descritas en el apartado anterior, ya que las relaciones entre los caudales y las características medias de las cuencas podrían diferir de las correspondientes a cuencas de menor tamaño e, incluso, el valor medio en la cuenca de alguna de las variables podría no ser significativo a la hora de determinar el caudal cuando se trata de cuencas de gran tamaño. De esta manera, y puesto que se dispone de varias estaciones de aforos con series suficientemente largas y fiables a lo largo de los ejes principales, algunas de ellas con información histórica, se ha decidido establecer simplemente unas relaciones sencillas en función del área vertiente al punto que permitan interpolar y dar continuidad a los cuantiles calculados en las distintas estaciones de aforo presentes a lo largo del río.

En las figuras adjuntas se muestran las relaciones entre los logaritmos de los cuantiles de 100 años de periodo de retorno y el logaritmo del área de la cuenca para los distintos ejes fluviales, y en la tabla 8 las ecuaciones de regresión ajustadas. Se observa cómo los ajustes son muy buenos, con coeficientes de correlación próximos a uno, por lo que se ha considerado que estas relaciones sencillas en función del área son suficientes para dar continuidad a los valores de los cuantiles de caudal máximo a lo largo de la corriente principal del río. Las mencionadas relaciones se han aplicado en los tramos de los ejes fluviales indicados en el apartado 4.1.1., exceptuando el eje del Guadalquivir, en el que se han aplicado dichas relaciones hasta la confluencia con el Genil, punto a partir del cual cambia el régimen de caudales sustancialmente, por lo que los caudales en ese tramo se han calculado a partir de los cuantiles encajados en la estación de Sevilla.

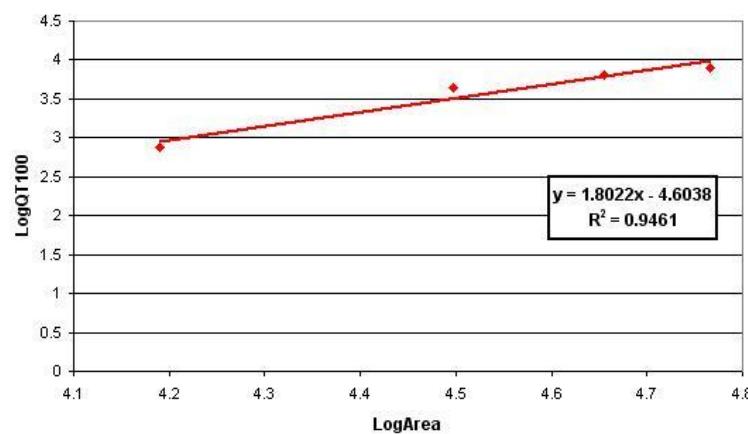
EJE DUERO (Región 26)



EJE TAJO (Región 34)



EJE GUADIANA (Región 43)



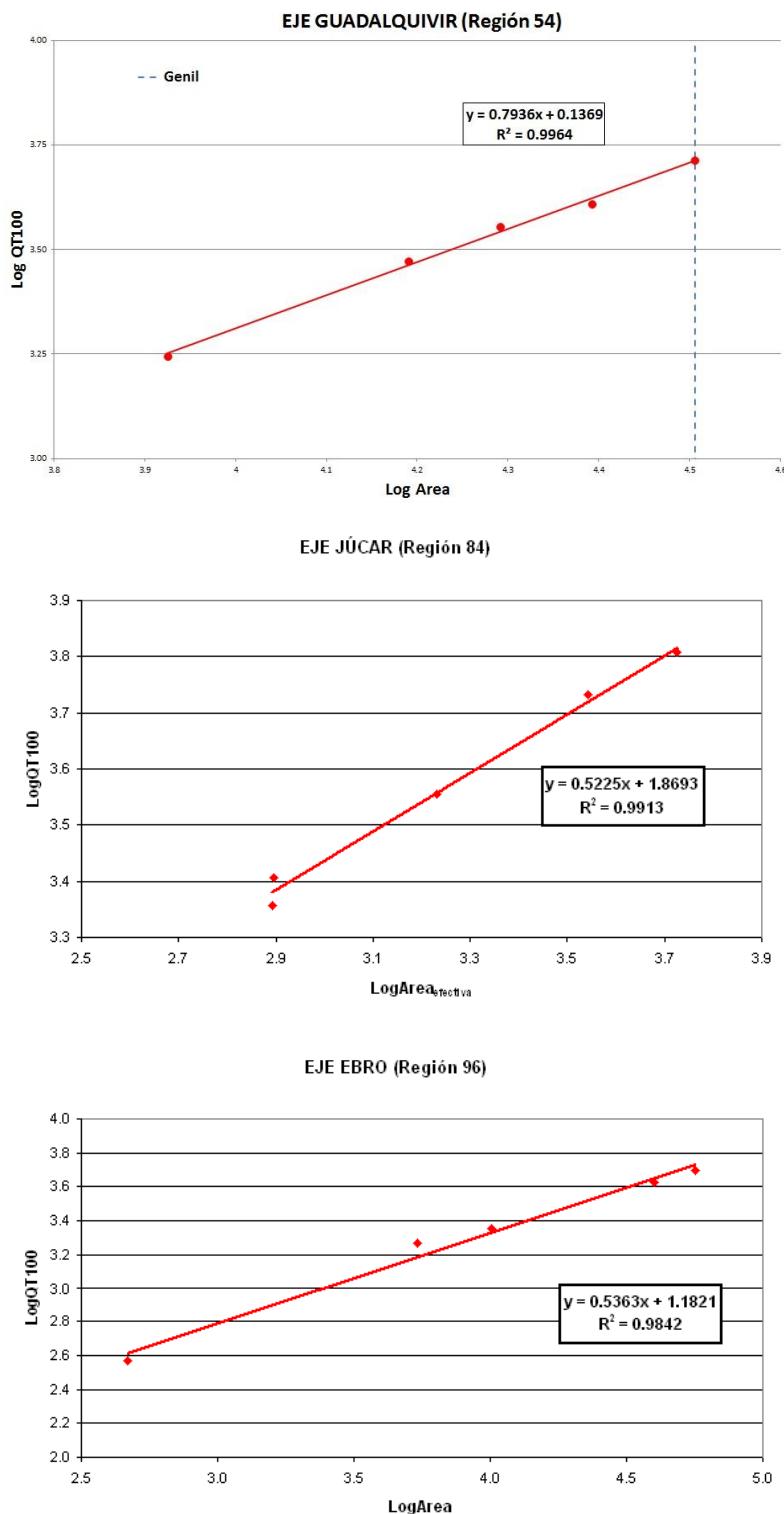


Figura 33. Relaciones entre los cuantiles de caudal máximo y el área vertiente a lo largo de la corriente principal de los grandes ríos para T= 100 años

Tabla 8. Ecuaciones de regresión aplicadas en las corrientes principales.

| Región 26 (eje Duero) | |
|-------------------------------------|--------------|
| $Q_2 = 0.0168 \cdot A^{1.0155}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_5 = 0.0246 \cdot A^{1.0388}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_{10} = 0.0311 \cdot A^{1.0459}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_{25} = 0.0409 \cdot A^{1.0514}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_{100} = 0.0588 \cdot A^{1.0561}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_{500} = 0.0862 \cdot A^{1.0593}$ | $R^2 = 0.99$ |

| Región 34 (eje Tajo) | |
|-------------------------------------|--------------|
| $Q_2 = 10^{-0.1226} A^{0.6557}$ | $R^2 = 0.97$ |
| $Q_5 = 10^{0.227} A^{0.6336}$ | $R^2 = 0.98$ |
| $Q_{10} = 10^{0.1896} A^{0.6757}$ | $R^2 = 0.98$ |
| $Q_{25} = 10^{0.1052} A^{0.7306}$ | $R^2 = 0.98$ |
| $Q_{100} = 10^{-0.1378} A^{0.8331}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_{500} = 10^{-0.5193} A^{0.9695}$ | $R^2 = 0.99$ |

| Región 43 (eje Guadiana) | |
|---|--------------|
| $Q_2 = 1.3101 \cdot 10^{-6} A^{1.9200}$ | $R^2 = 0.97$ |
| $Q_5 = 4.8876 \cdot 10^{-6} A^{1.8574}$ | $R^2 = 0.98$ |
| $Q_{10} = 8.2395 \cdot 10^{-6} A^{1.8377}$ | $R^2 = 0.97$ |
| $Q_{25} = 1.3721 \cdot 10^{-5} A^{1.8204}$ | $R^2 = 0.96$ |
| $Q_{100} = 2.4900 \cdot 10^{-5} A^{1.8022}$ | $R^2 = 0.95$ |
| $Q_{500} = 4.4116 \cdot 10^{-5} A^{1.7854}$ | $R^2 = 0.92$ |

| Región 54 (eje Guadalquivir) | |
|------------------------------------|---------------------|
| Hasta la confluencia con el Genil | |
| $Q_2 = 10^{-1.2190} A^{0.9590}$ | $R_{corr}^2 = 0.98$ |
| $Q_5 = 10^{-1.1284} A^{0.9938}$ | $R_{corr}^2 = 0.99$ |
| $Q_{10} = 10^{-0.8938} A^{0.9671}$ | $R_{corr}^2 = 0.99$ |
| $Q_{25} = 10^{-0.5163} A^{0.9088}$ | $R_{corr}^2 = 0.99$ |
| $Q_{100} = 10^{0.1369} A^{0.7936}$ | $R_{corr}^2 = 0.99$ |
| $Q_{500} = 10^{0.9767} A^{0.6343}$ | $R_{corr}^2 = 0.99$ |

| Región 84 (eje Júcar) | |
|---|--------------|
| $Q_2 = 10^{-3.5639} A^{1.4777}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_5 = 10^{-3.3741} A^{1.4881}$ | $R^2 = 0.97$ |
| $Q_{10} = 10^{-3.3772} A^{1.5174}$ | $R^2 = 0.95$ |
| $Q_{25} = 10^{-3.7240} A^{1.6391}$ | $R^2 = 0.90$ |
| $Q_{100} = 10^{1.8693} A_{ef}^{0.5225}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_{500} = 10^{2.5818} A_{ef}^{0.4105}$ | $R^2 = 0.94$ |

| Región 96 (eje Ebro) | |
|------------------------------------|--------------|
| $Q_2 = 10^{0.7030} A^{0.5620}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_5 = 10^{0.9160} A^{0.5410}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_{10} = 10^{0.9772} A^{0.5451}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_{25} = 10^{1.0873} A^{0.5360}$ | $R^2 = 0.99$ |
| $Q_{100} = 10^{1.1820} A^{0.5363}$ | $R^2 = 0.98$ |
| $Q_{500} = 10^{1.2706} A^{0.5365}$ | $R^2 = 0.98$ |



6. GENERACIÓN DE LOS MAPAS Y FORMATO DE PRESENTACIÓN

Una vez ajustadas las ecuaciones de regresión y realizada la calibración del método racional, se ha procedido a obtener los mapas de caudales máximos para los distintos períodos de retorno considerados. Como se comentó anteriormente, se ha decidido aplicar el método racional en las cuencas de menor tamaño, hasta unos 500 km² de cuenca, por considerar que el empleo de un método hidrometeorológico, aunque simplificado, permite reproducir mejor la variabilidad en los valores de los cuantiles entre los distintos puntos, al tener en cuenta los distintos procesos físicos que tienen lugar en la cuenca, y que en ese rango de tamaños de cuenca las hipótesis simplificadoras del método son suficientemente aproximadas. En cuencas de mayor tamaño se han aplicado las ecuaciones de regresión múltiple descritas anteriormente.

En el caso de las regiones 33, 42, 72, 82 y 94 no se ha empleado el método racional para la elaboración de los mapas por no proporcionar buenos resultados. En las regiones 13 y 83, como ya se ha comentado anteriormente, los cálculos se han realizado aplicando únicamente el método racional.

Para ello se han obtenido en primer lugar los mapas con las distintas variables auxiliares empleadas en ambos métodos de cálculo, mediante el uso de sistemas de información geográfica:

- Método racional:
 - Área
 - Tiempo de concentración
 - Cuantiles de precipitación diaria
 - Umbral de escorrentía (P_0).
- Ecuaciones de regresión:
 - Área (o área equivalente o área efectiva)
 - Área con altitud mayor de 1500 m.
 - Cuantiles de precipitación diaria
 - Altitud media de la cuenca.
 - Umbral de escorrentía
 - Tasa mínima de infiltración.
 - Pendiente media de la cuenca

El cálculo de las variables se ha realizado a partir de la información contenida en las siguientes coberturas:

- Modelo Digital del Terreno del Servicio Geográfico del Ejército y mapa de direcciones de drenaje elaborado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX a partir del mismo con resolución de 500mx500m (figura 34).
- Mapas de precipitaciones elaborados a partir del trabajo de Máximas Lluvias Diarias en la España Peninsular con resolución de 1000mx1000 m.
- Mapa de umbral de escorrentía (P_0), elaborado siguiendo la metodología utilizada en la Tesis doctoral “Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva del modelo hidrológico del SCS: Datos de perfiles de suelos y teledetección” (Ferrer, 2003), a partir del mapa de usos de suelo Corine Land Cover 2000 y datos de infiltración actualizados, con resolución de 500mx500 m.

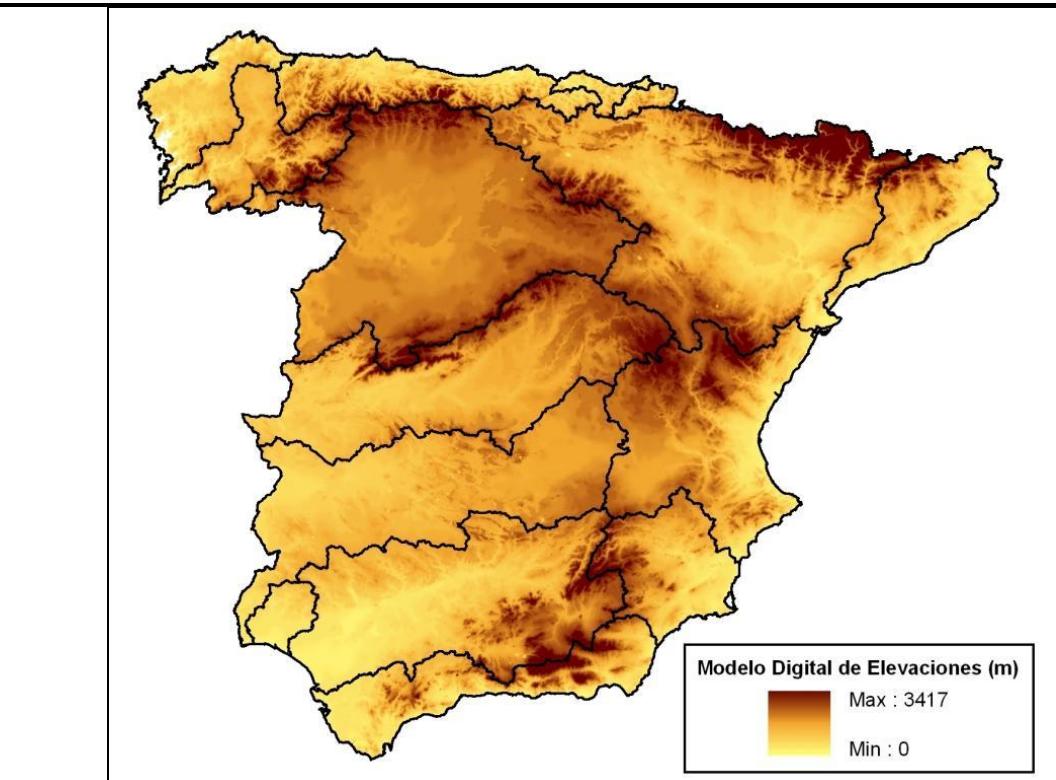


Figura 34. Modelo digital del terreno.

Los cálculos se han realizado con una resolución de 500mx 500 m, siendo el resultado final un conjunto de seis capas de un sistema de información geográfica en formato raster con resolución de 500mx500 m (para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 100 y 500 años), con información para aquellos puntos de la red fluvial con una cuenca vertiente igual o superior a 50 km². Los caudales resultantes se han redondeado a números enteros, por lo que en aquellas zonas con caudales muy pequeños (especialmente para períodos de retorno bajos) podría obtenerse el mismo valor de cuantil para varios períodos de retorno. En algunos casos el valor suministrado por la aplicación es igual a cero, lo que significa que el cuantil está comprendido entre 0 y 0,5 m³/s.

Los mapas obtenidos mediante la aplicación del método racional y las ecuaciones de regresión han sido objeto de ajustes posteriores con el objetivo de garantizar la adecuada coherencia de los resultados entre todos los puntos de la red fluvial. De esta forma, se han realizado transiciones en aquellas zonas en las que se producía un cambio de método de cálculo o un cambio de región estadística, se han ajustado los resultados en las confluencias, o se han realizado correcciones de los mapas en base a los cuantiles obtenidos en las estaciones de aforo, para lo cual se han desarrollado herramientas informáticas sobre SIG para automatizar los procesos.

7. ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA CRECIDA ORDINARIA

Como se ha comentado, el resultado del trabajo es una colección de mapas que proporcionan una estimación de los caudales máximos correspondientes a distintos períodos de retorno en situación natural, en cualquier punto de la red fluvial.

Una de las aplicaciones más inmediatas de esa información podría ser su uso en la zonificación de áreas inundables. Un elemento clave a delimitar en dichas zonificaciones es el cauce, el cual forma parte del dominio público hidráulico, quedando definido en el Texto Refundido de la Ley de Aguas y en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico como:



1. “Álveo o cauce natural de una corriente continua o discontinua es el terreno cubierto por las aguas en las máximas crecidas ordinarias” (art.4 TRLA). “La determinación de ese terreno se realizará atendiendo a sus características geomorfológicas, ecológicas y teniendo en cuenta las informaciones hidrológicas, hidráulicas, fotográficas y cartográficas que existan, así como las referencias históricas disponibles.

2. Se considerará como caudal de la máxima crecida ordinaria la media de los máximos caudales anuales, en su régimen natural, producidos durante diez años consecutivos, que sean representativos del comportamiento hidráulico de la corriente y que tengan en cuenta lo establecido en el apartado 1” (art. 4 RDPH).

Sería, por tanto, conveniente contar, junto con los cuantiles de distintos períodos de retorno, con una estimación del caudal correspondiente a la máxima crecida ordinaria. La estimación de dicho caudal no ha sido objeto del trabajo expuesto en los apartados anteriores y, por tanto, no se cuenta con una estimación de dicho caudal como resultado del mismo, lo que requeriría la aplicación de metodologías diferentes a las expuestas. No obstante, se puede realizar una estimación de la máxima crecida ordinaria, si se conoce la ley de frecuencia de caudales máximos en situación natural, aplicando la metodología expuesta en el informe “Aspectos prácticos de la definición de la máxima crecida ordinaria” (CEDEX, 1994).

En el citado informe, se realizó un estudio experimental en 20 puntos distribuidos a lo largo de la geografía nacional, en los que se disponía de la serie histórica de máximos caudales anuales así como de información sobre el caudal de desbordamiento del cauce. El caudal de desbordamiento se considera dentro de la hidráulica fluvial como representativo del comportamiento de la corriente, y su línea de agua marca los límites de lo que comúnmente se entiende por cauce. Además, se pudo comprobar en distintos puntos de la geografía española que dicho caudal está dentro del rango de los valores compatibles con los términos en que el Reglamento del Dominio Público Hidráulico define como máxima crecida ordinaria, y además es indicativo del posicionamiento central de los mismos, motivos por los cuales se propuso identificar la máxima crecida ordinaria con el caudal de desbordamiento.

De acuerdo con la información disponible, se pudo establecer una relación entre el caudal de la máxima crecida ordinaria (realmente el caudal de desbordamiento) y diversas magnitudes descriptivas de las características estadísticas de la serie temporal de caudales máximos anuales.

De forma aproximada, se puede determinar el caudal correspondiente a la máxima crecida ordinaria (Q_{MCO}) en función de la media (Q_m) y el coeficiente de variación (C_v) de la serie temporal de caudales máximos anuales mediante la siguiente expresión:

$$Q_{MCO} = Q_m (0,7 + 0,6 \cdot C_v)$$

Una expresión alternativa, para la que es necesario conocer la ley de frecuencia de caudales máximos, es la siguiente en la que se relaciona el periodo de retorno correspondiente al caudal de la máxima crecida ordinaria (T_{MCO}) con el coeficiente de variación de la serie temporal:

$$T_{MCO} = 5 \cdot C_v$$

Esta última expresión es más útil que la anterior para estimar la máxima crecida ordinaria a partir de los resultados de este trabajo puesto que se dispone de la ley de frecuencia de caudales máximos y se ha realizado una regionalización estadística de la cuenca de estudio en la que se conocen los valores regionales de los principales estadísticos, entre ellos el coeficiente de variación y, por lo tanto, ha sido la adoptada para estimar dicho caudal en los distintos puntos de la red fluvial.

En la tabla 9 se recogen los valores regionales del coeficiente de variación en las regiones estadísticas adoptadas en el estudio, así como los valores correspondientes para el periodo de retorno aproximado de la máxima crecida ordinaria.

Tabla 9. Coeficientes de variación regionales y periodos de retorno para la máxima crecida ordinaria en las regiones estadísticas.

| Región | CV | T |
|--------|------|------------|
| 11 | 0.59 | 3.0 |
| 12 | 0.54 | 2.5 |
| 13 | 0.54 | 2.5 |
| 21 | 0.48 | 2.5 |
| 22 | 1.15 | 6.0 |
| 23 | 0.66 | 3.5 |
| 24 | 0.75 | 4.0 |
| 25 | 0.75 | 4.0 |
| 26 | 0.81 | 4.0 |
| 31 | 0.79 | 4.0 |
| 32 | 0.79 | 4.0 |
| 33 | 1.04 | 5.0 |
| 34 | 0.76 | 4.0 |
| 41 | 1.20 | 6.0 |
| 42 | 1.05 | 5.5 |
| 43 | 0.83 | 4.0 |
| 51 | 0.92 | 4.5 |
| 52 | 0.88 | 4.5 |
| 53 | 1.00 | 5.0 |
| 54 | 0.66 | 3.5 |
| 71 | 1.13 | 5.5 |
| 72 | 1.44 | 7.0 |
| 73 | 1.07 | 5.5 |
| 81 | 0.87 | 4.5 |
| 82 | 1.21 | 6.0 |
| 83 | 1.19 | 6.0 |
| 84 | 0.88 | 4.5 |
| 91 | 0.47 | 2.5 |
| 92 | 0.70 | 3.5 |
| 93 | 1.36 | 7.0 |
| 94 | 1.04 | 5.0 |
| 95 | 0.69 | 3.5 |
| 96 | 0.50 | 2.5 |

La aplicación informática desarrollada para la visualización y consulta de los mapas de caudales máximos incorpora herramientas que proporcionan un valor aproximado de la máxima crecida ordinaria en base a los periodos de retorno indicados anteriormente. Es importante destacar que los valores que proporciona esta aplicación para la máxima crecida ordinaria son solo valores orientativos que no sustituyen a los valores obtenidos en los estudios concretos realizados para el deslinde del dominio público hidráulico.



REFERENCIAS

Benito, G., Diez, A. y Fernández, M., 2003. "Magnitude and frequency of flooding in the Tagus basin over the last millennium". *Climatic Change* 58. Pág. 171 – 192. 2003.

CEDEX, 1994. "Aspectos prácticos de la definición de la máxima crecida ordinaria". CEDEX. 1994.

DGC, 1991. "Máximas lluvias diarias en la España peninsular". Serie monografías. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento. 1999.

Ferrer, 2003. "Análisis de Nuevas Fuentes de Datos para la Estimación del Parámetro Número de Curva del Modelo Hidrológico del SCS". Cuadernos de Investigación CEDEX. C48. 2003.

Hawkins, R. H., Hjelmfelt, A. T. y Zevenbergen, A. W., 1985. "Runoff probability storm depth and curve numbers". *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 111(4): 330-340. 1985.

Hosking y Wallis, 1997. "Regional frequency analysis". J.R.M. Hosking y J.R. Wallis. Cambridge University Press. 1997.

Ponce, V. M. y Hawkins, R. H., 1996. "Runoff curve number: has it reached Maturity?". *Journal of Hydrologic Engineering*, January: 11-19. 1996.

Témez, J.R, 1987. "Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales". Dirección General de Carreteras. MOPU. 1987.

Témez, J.R., 1991. "Extended and improved rational method. Version of the Highways Administration of Spain". Proc. XXIV Congress. Madrid. Vol. A. pp. 33-40. 1991.

USWRC, 1981. "Guidelines for determining flood flow frequency". Water Resources Council. 1981.