



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE FOMENTO

MINISTERIO  
DE MEDIO AMBIENTE  
Y MEDIO RURAL  
Y MARINO

**CEDEX**  
CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN  
DE OBRAS PÚBLICAS

Bases teóricas del mapa de caudales máximos

Centro de Estudios Hidrográficos

# Bases teóricas del mapa de caudales máximos

*Antonio Jiménez Álvarez*  
**CEDEX**



## CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRABAJO

- Realizado dentro de un Convenio de colaboración entre el MARM y el CEDEX.
- Características generales de los mapas:
  - Realizado en el ámbito de las cuencas gestionadas por las distintas Confederaciones Hidrográficas.
  - Proporcionan información en los puntos de la red fluvial con cuencas iguales o superiores a 50 km<sup>2</sup>.
  - Correspondientes al régimen natural.
  - Proporcionan información para los periodos de retorno:
    - 2, 5, 10, 25, 100 y 500 años.
    - Estimación orientativa de la MCO a partir de fórmulas aproximadas.
  - Los resultados se representan mediante capas raster con resolución de 500x500 m.
  - Se ha elaborado una aplicación informática para facilitar la consulta y visualización de los mapas.
- Se adoptó como cuenca piloto del trabajo la cuenca del Tajo (presentado en mayo de 2009).



## PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS MAPAS

OBTENCIÓN DE LOS CUANTILES DE CAUDAL MÁXIMO EN LOS PUNTOS AFORADOS

- Selección y tratamiento de las series de caudales máximos anuales medidas en estaciones de aforos y embalses.
- Análisis de las funciones de distribución y procedimientos de estimación más adecuados.
- Incorporación de información regional e histórica para mejorar la extrapolación a altos periodos de retorno.

ESTIMACIÓN DE LOS CUANTILES EN LOS PUNTOS NO AFORADOS A PARTIR DEL PASO ANTERIOR

- Selección de los modelos a utilizar.
- Elaboración de capas de variables y parámetros.
- Calibración y ajuste de los modelos.

GENERACIÓN Y TRATAMIENTO DE LAS CAPAS SIG CON LOS RESULTADOS

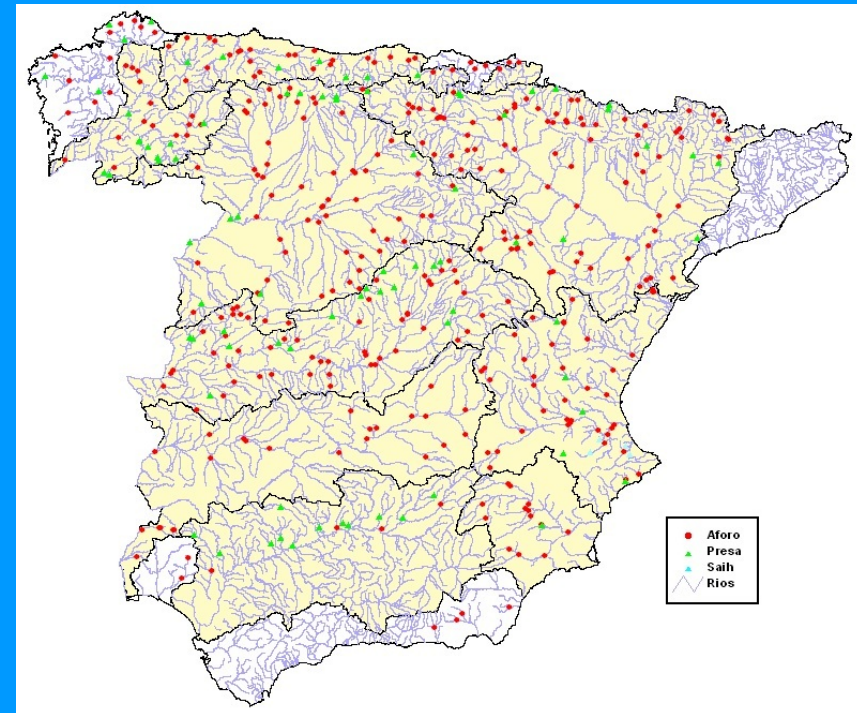
## SELECCIÓN DE LAS SERIES DE CAUDALES MÁXIMOS

- Tipos de puntos de medida considerados:

- Estaciones de aforos de la ROEA.
- Embalses.
- Estaciones SAIH.

- Criterio de selección:

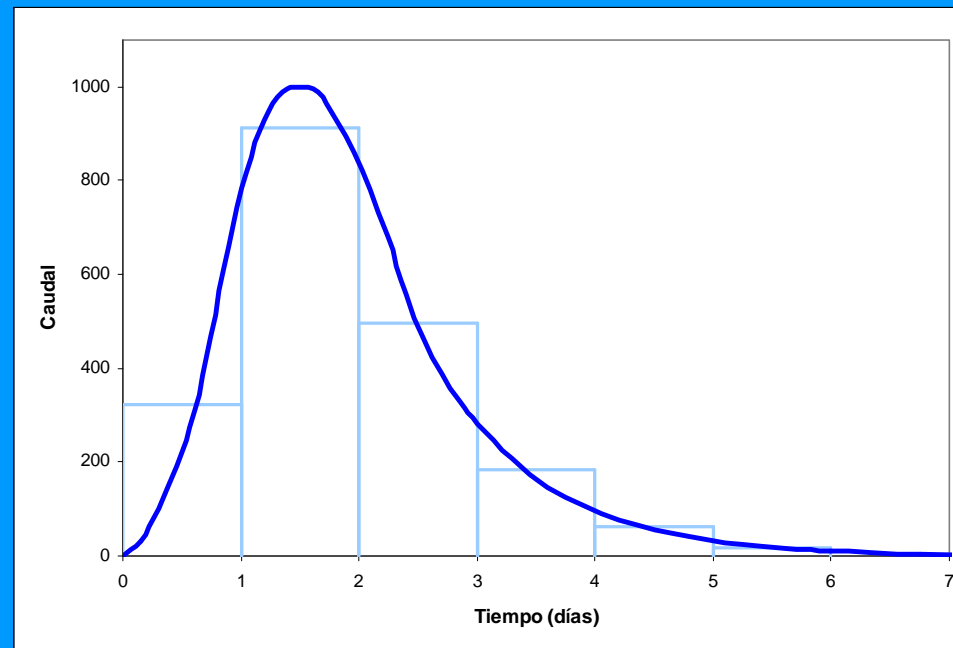
- Mínimo de 20 datos de caudal máximo medio diario (15 en zonas con pocas estaciones).
- No afectadas significativamente por la presencia de embalses aguas arriba:
  - Porcentaje de la cuenca controlada por embalses menor del 10%.
  - Volumen de embalse menor del 10% del volumen de avenida.
  - No considerada la alteración por embalses de menos de 5 hm<sup>3</sup>.



Puntos de medida seleccionados

## TRATAMIENTO DE LAS SERIES DE CAUDALES MÁXIMOS

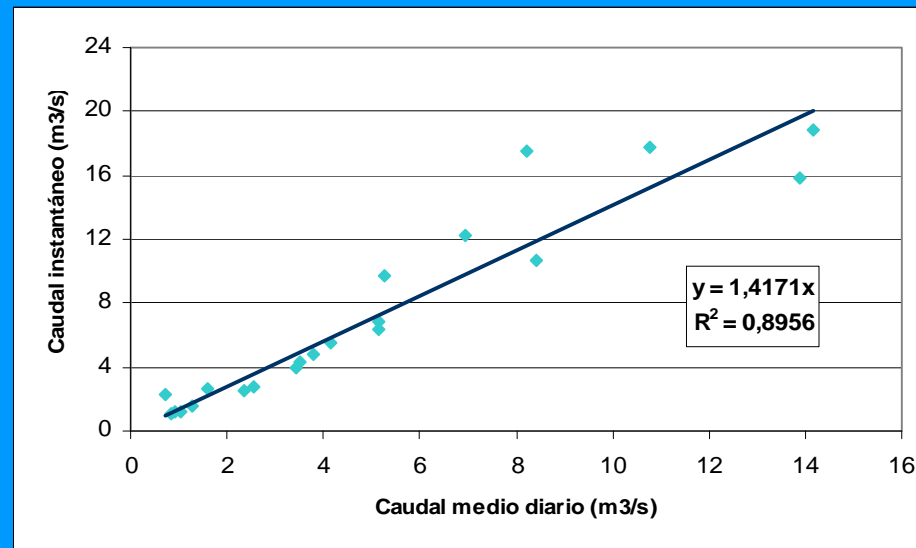
- En algunas estaciones y algunos periodos de registro solo se dispone del caudal máximo medio diario y no del caudal máximo instantáneo.



## TRATAMIENTO DE LAS SERIES DE CAUDALES MÁXIMOS

Procedimiento de obtención del caudal máximo instantáneo a partir del medio diario:

- Estaciones con datos instantáneos incompletos (al menos 10 datos de caudal máximo instantáneo):



Relación entre caudales máximos medios diarios e instantáneos

## TRATAMIENTO DE LAS SERIES DE CAUDALES MÁXIMOS

Procedimiento de obtención del caudal máximo instantáneo a partir del medio diario:

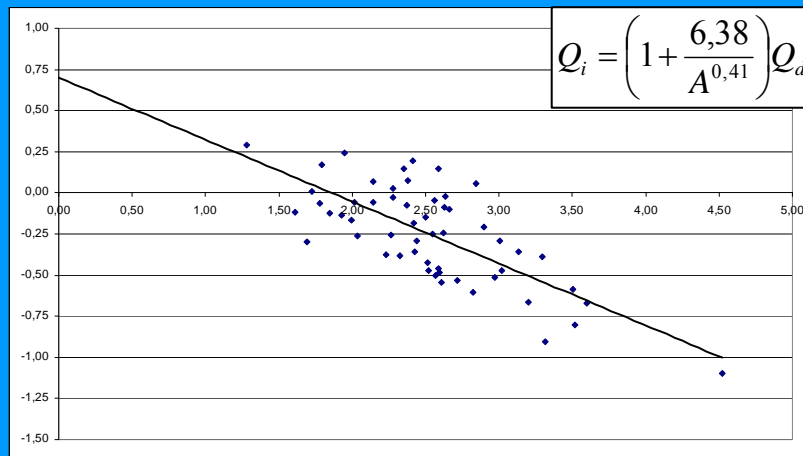
□ Estaciones sin información sobre caudales máximos instantáneos:

- Se ha aplicado la fórmula de Fuller:

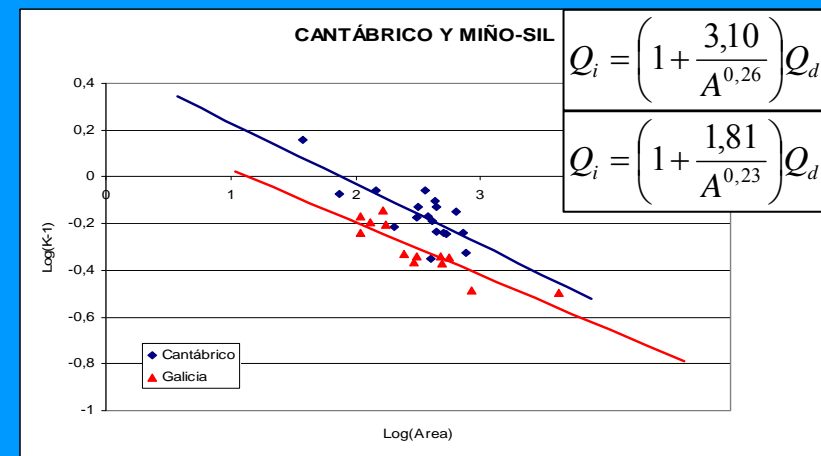
$$k = \frac{Q_i}{Q_{md}} = 1 + \frac{a}{A^b}$$

- Se ha realizado una calibración regional de los parámetros de la ecuación:

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



Ajuste de la ecuación de Fuller en la cuenca del Tajo

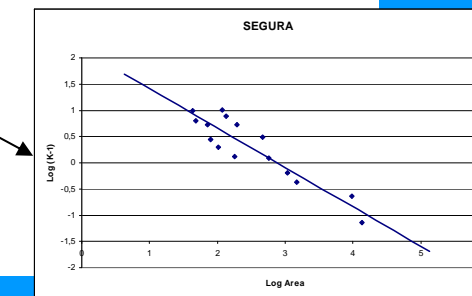
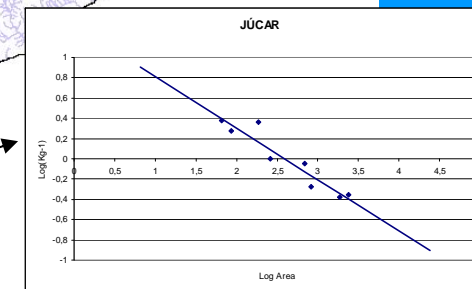
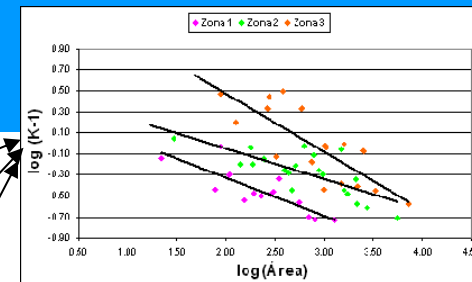
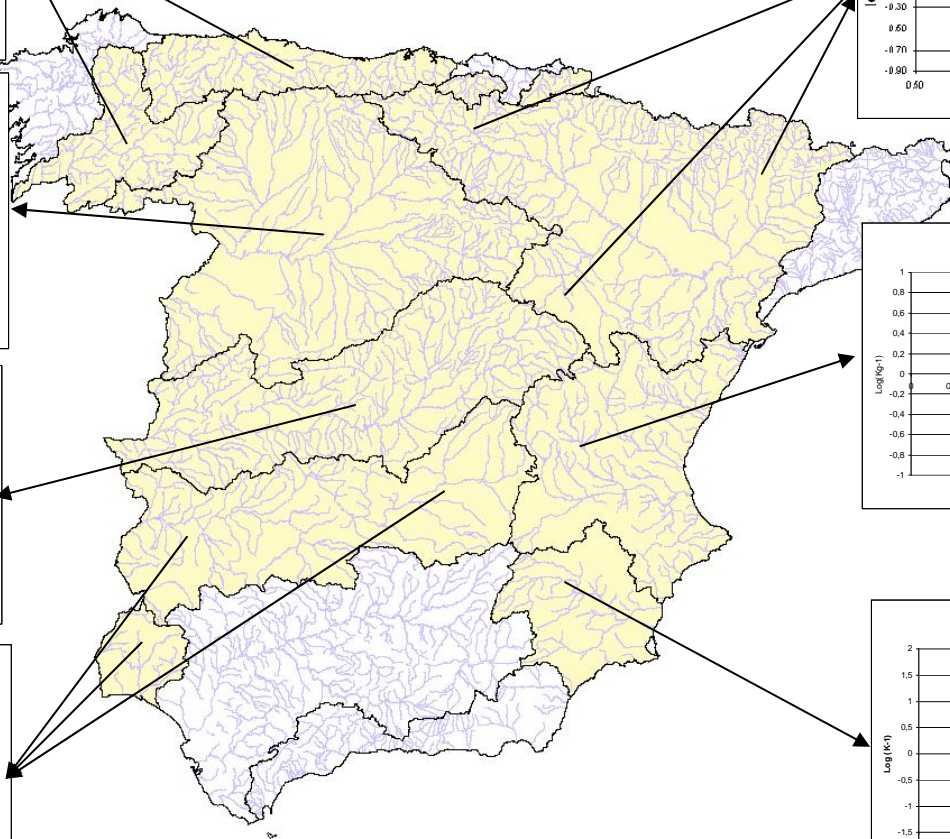
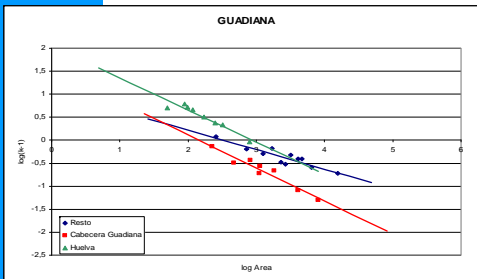
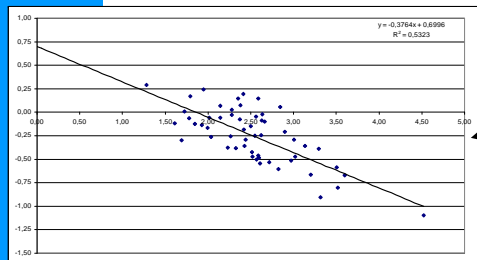
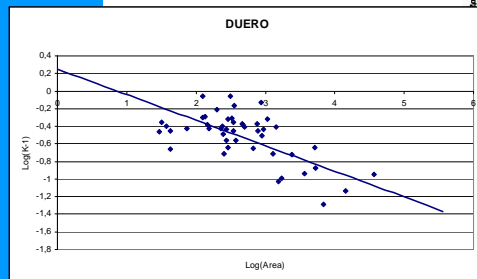
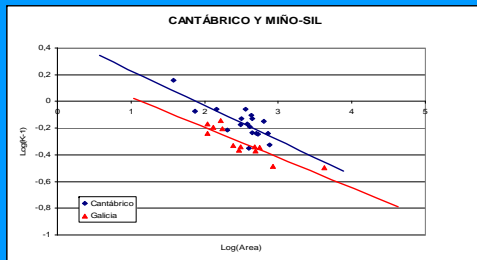


Ajuste de la ecuación de Fuller en las cuencas del Cantábrico y Miño-Sil



# TRATAMIENTO DE LAS SERIES DE CAUDALES MÁXIMOS

Centro de Estudios Hidrográficos



Ajustes de la ecuación de Fuller



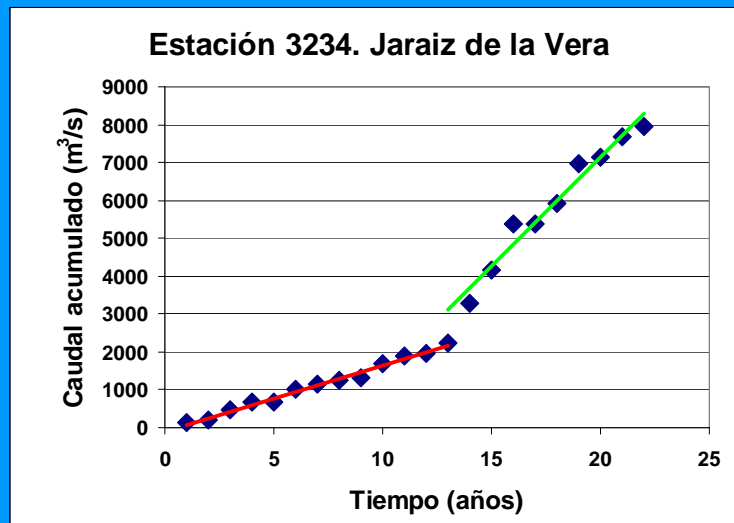
## REVISIÓN DE LA CALIDAD DE LAS SERIES DE DATOS

- Identificación de tendencias temporales en las series:

- Se ha aplicado el test de Mann-Kendall.

- Permite detectar la presencia en la serie de periodos temporales con información no homogénea:

- Cambios de ubicación de la estación.
- Cambios en la curva de gasto.

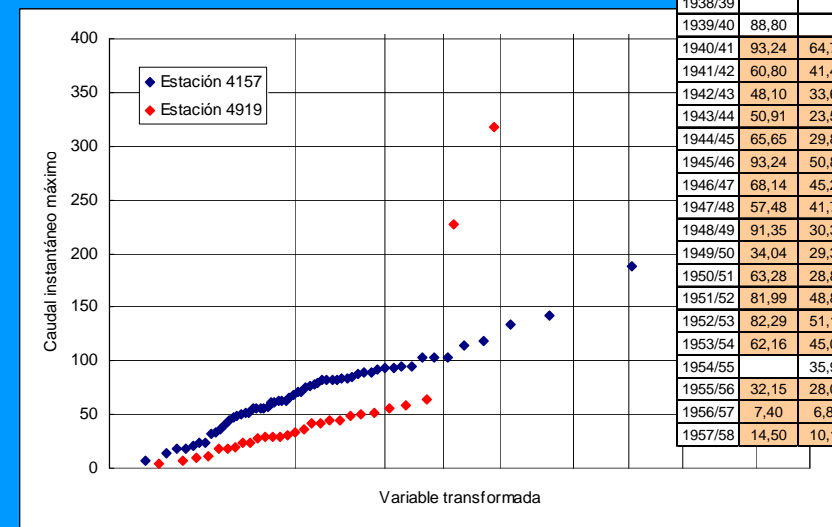
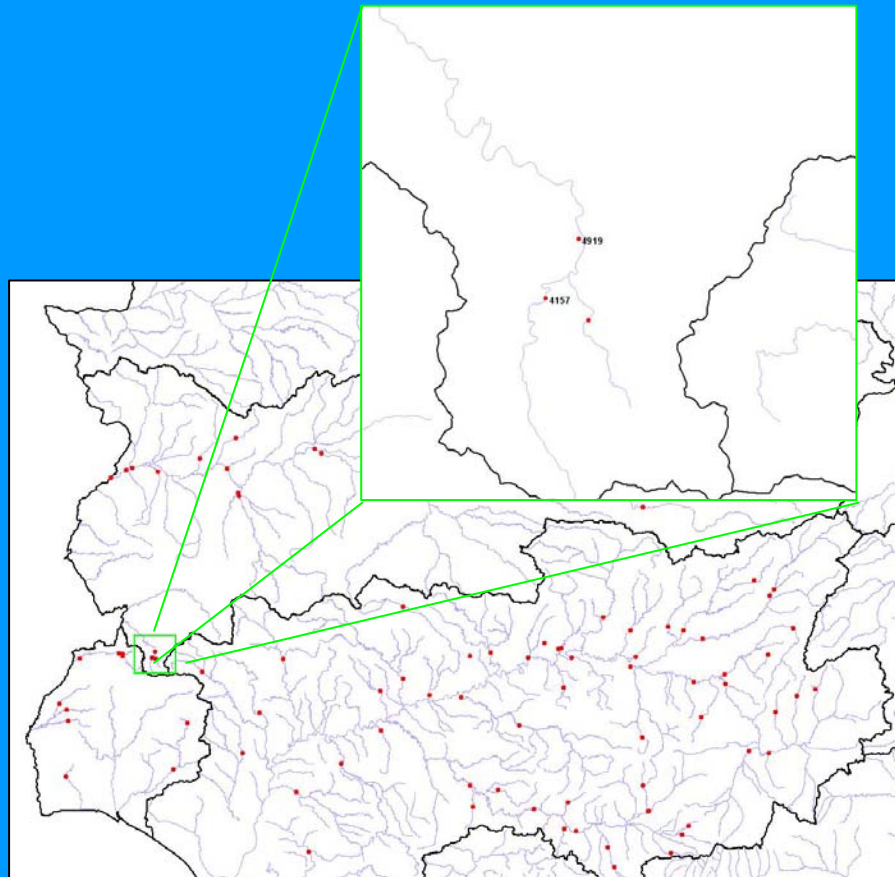


Ejemplos de series con y sin tendencia temporal

# REVISIÓN DE LA CALIDAD DE LAS SERIES DE DATOS

- Análisis de inconsistencias con los datos de otras estaciones situadas aguas arriba o aguas abajo:

Centro de Estudios Hidrográficos

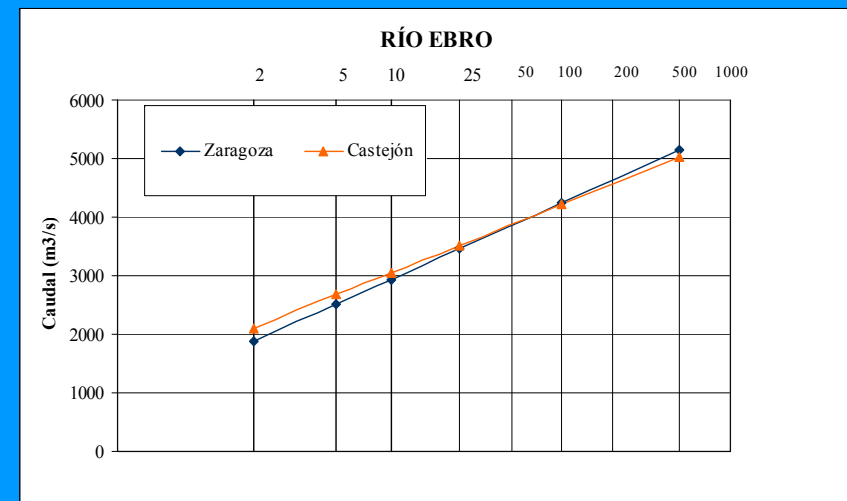
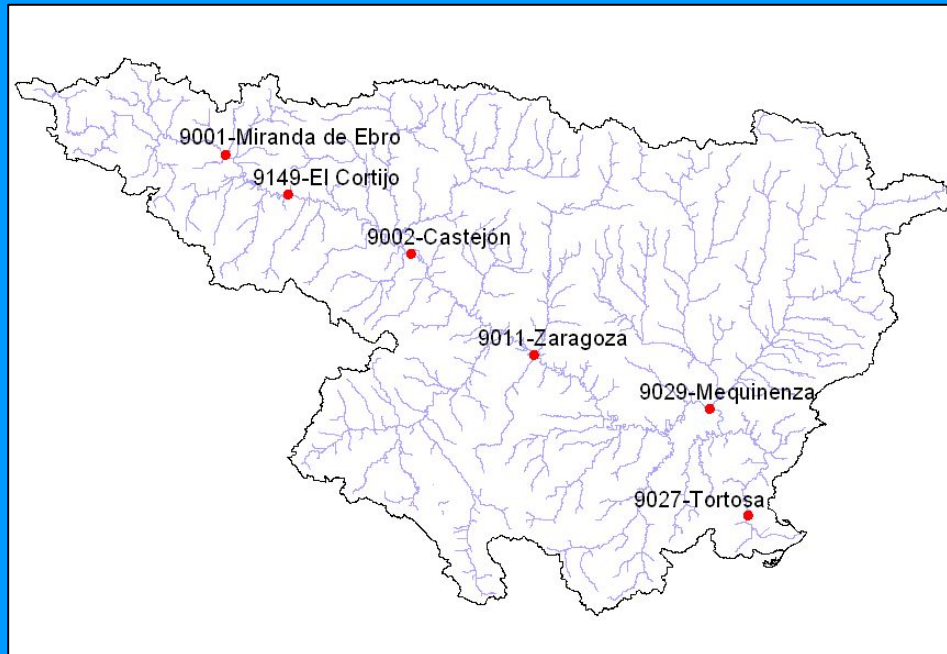


Ejemplo de incoherencias entre estaciones

## REVISIÓN DE LA CALIDAD DE LAS SERIES DE DATOS

- Análisis de inconsistencias con los datos de otras estaciones situadas aguas arriba o aguas abajo:

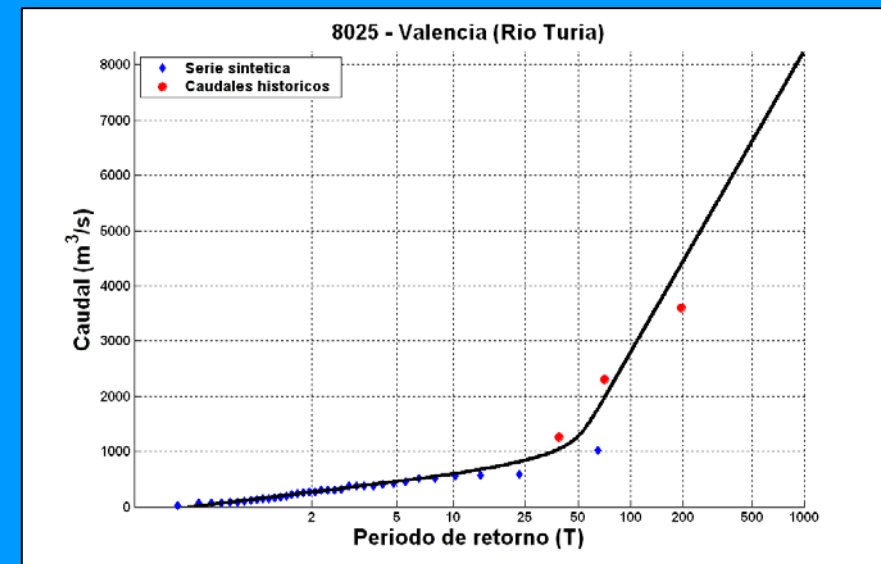
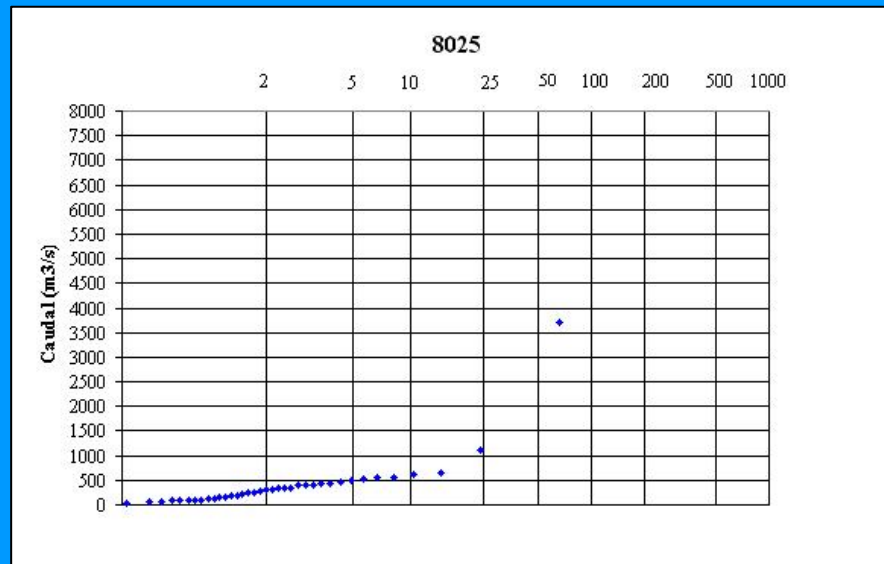
Centro de Estudios Hidrográficos



Contraste de leyes de frecuencia en el río Ebro

## REVISIÓN DE LA CALIDAD DE LAS SERIES DE DATOS

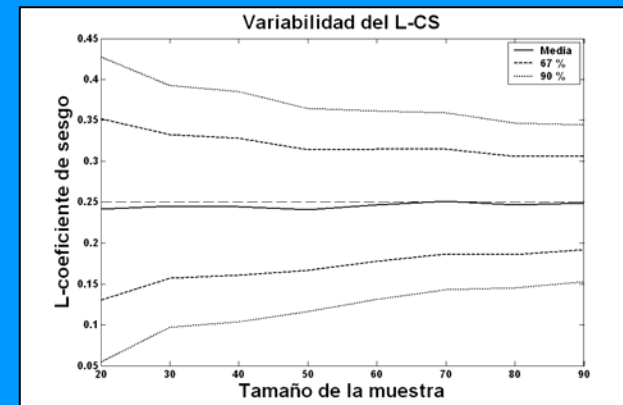
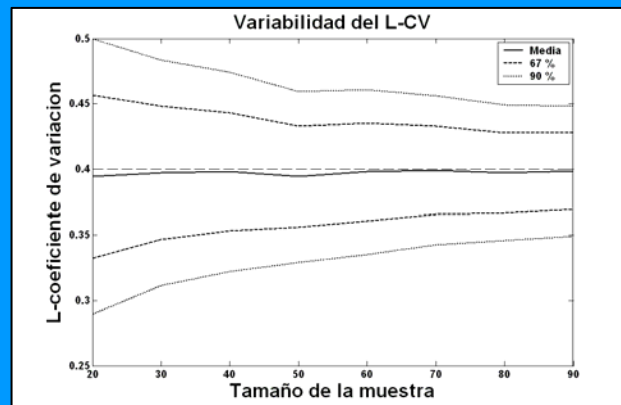
- **Identificación de datos anómalos (outliers):** Este proceso no pretende detectar deficiencias en la calidad de la información sino localizar aquellos datos singulares dentro de las series temporales poco representativos desde un punto de vista estadístico a la hora de realizar el ajuste de la ley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



Comparación de probabilidades muestrales y leyes de frecuencia con y sin el valor anómalo

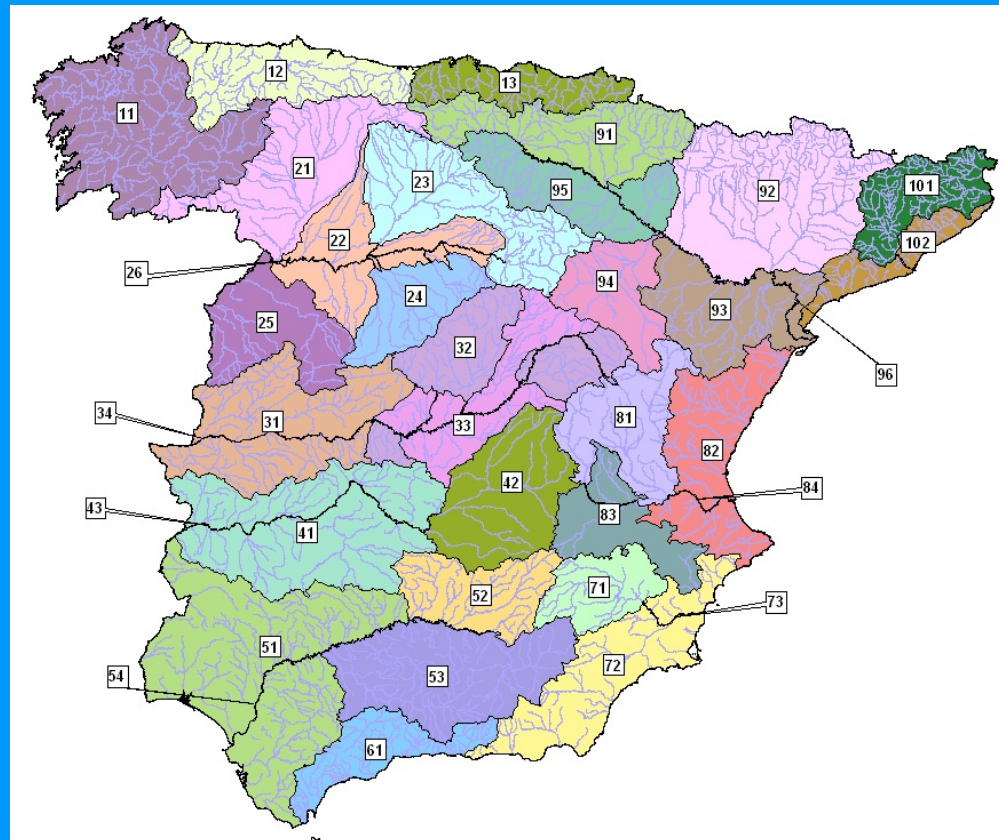
## AJUSTE DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN

- Análisis de las funciones de distribución y de los procedimientos de ajuste más idóneos.
  - Análisis de la capacidad de las funciones para adaptarse a los datos de las muestras (capacidad descriptiva).
  - Análisis de la precisión y robustez de las funciones para extrapolar a altos periodos de retorno (capacidad predictiva).
- Utilización de información adicional para mejorar la extrapolación a altos periodos de retorno.
  - Información histórica.
  - Información regional.



## DEFINICIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS

- Se han utilizado los tests de homogeneidad de Wiltshire y Hosking y Wallis.
- Se ha tomado la decisión de asumir en el análisis información regional relativa al coeficiente de sesgo.

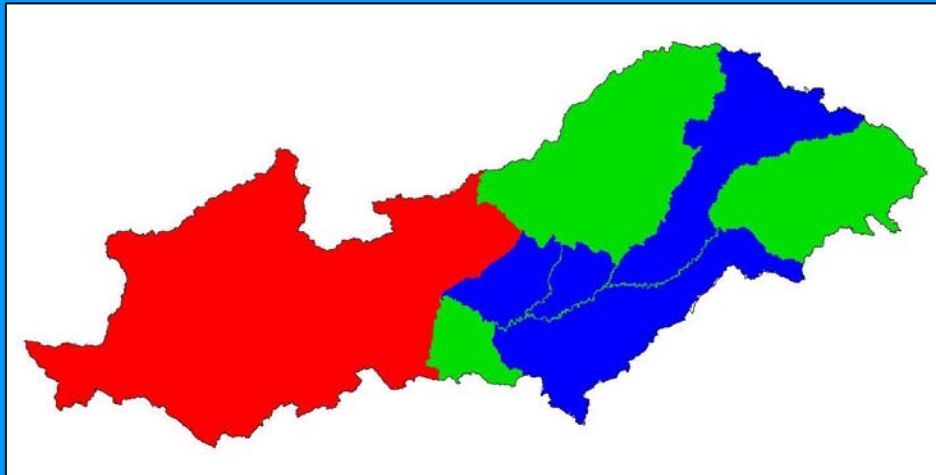


Regiones con homogeneidad estadística

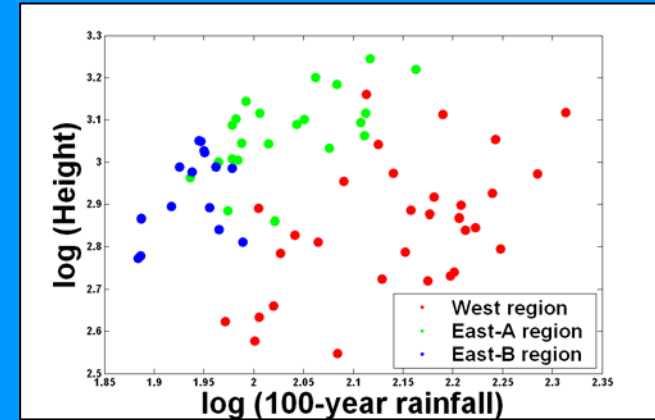


# DEFINICIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS

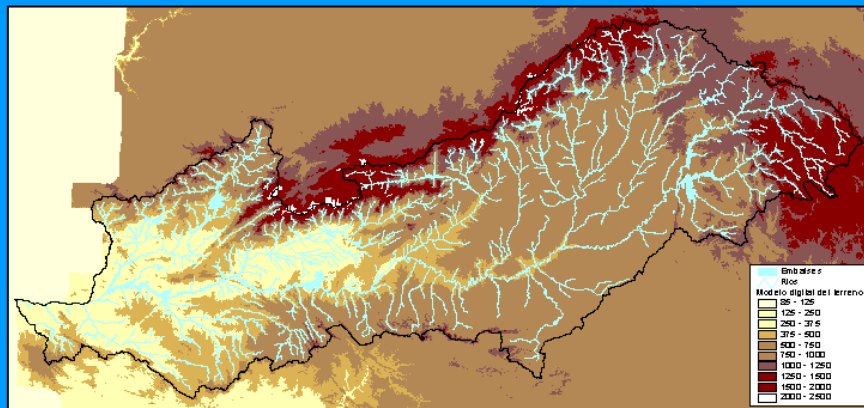
Centro de Estudios Hidrográficos



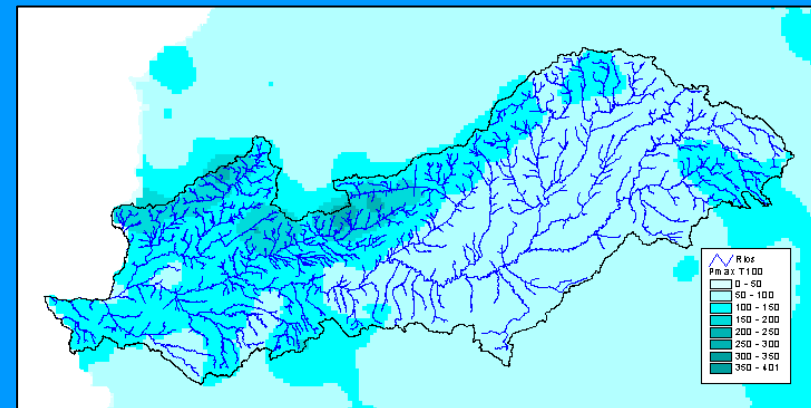
Regiones consideradas en la cuenca del Tajo



Relación altitud media - precipitación



Cuenca del Tajo: modelo digital del terreno



Cuenca del Tajo: cuantil de 100 años de precipitación diaria

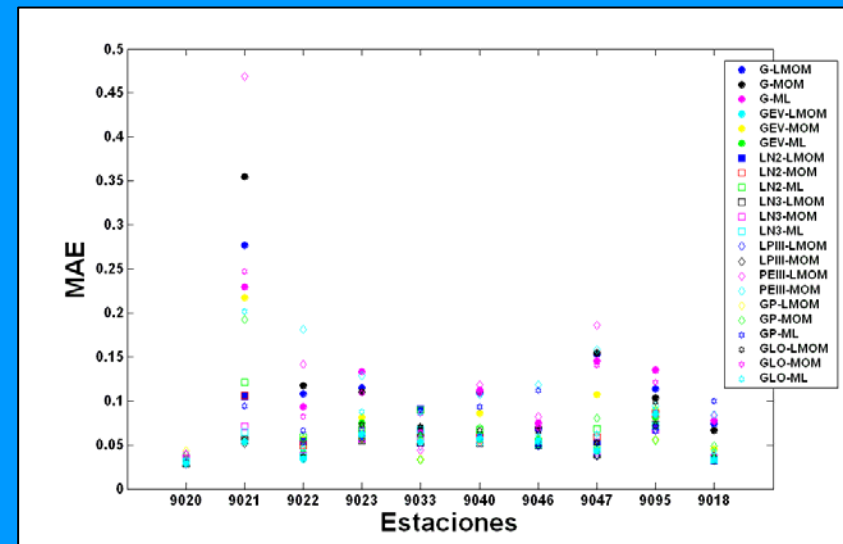
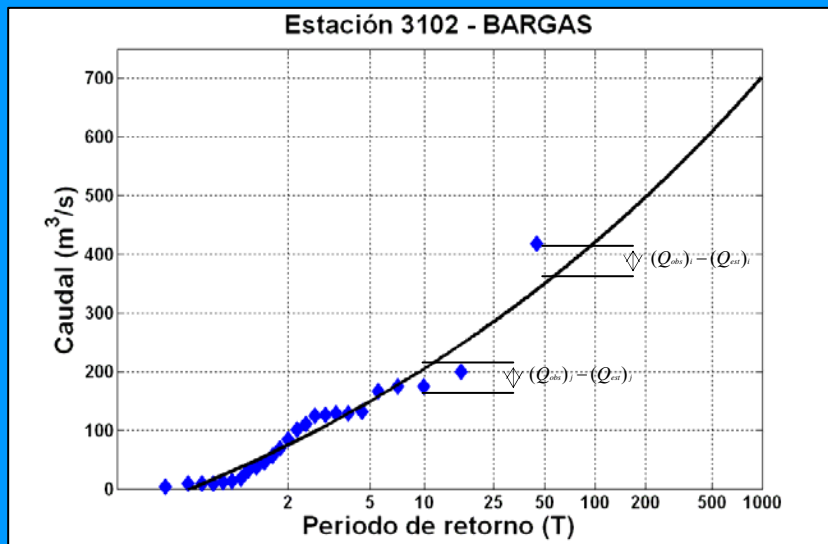
## ANÁLISIS DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN

- Análisis de las funciones de distribución y de los procedimientos de ajuste más idóneos: Capacidad descriptiva.

□ Funciones analizadas: GEV, Gumbel, LN2, LN3, LPIII, PEIII, GP, GLO.

□ Procedimientos de ajuste considerados: momentos, momentos ponderados probabilísticamente – L-momentos, máxima verosimilitud.

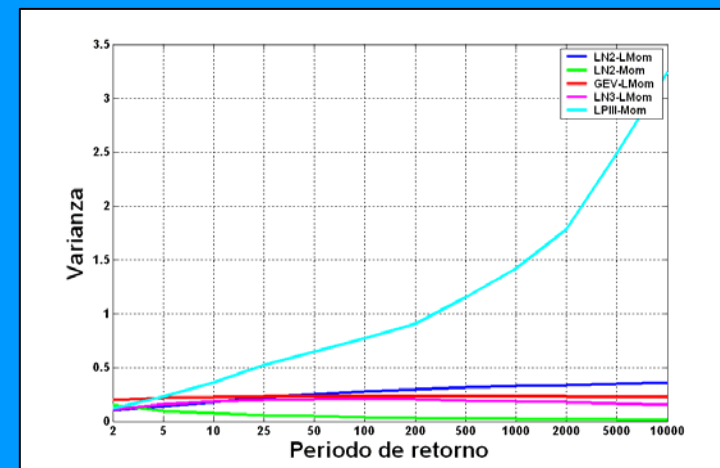
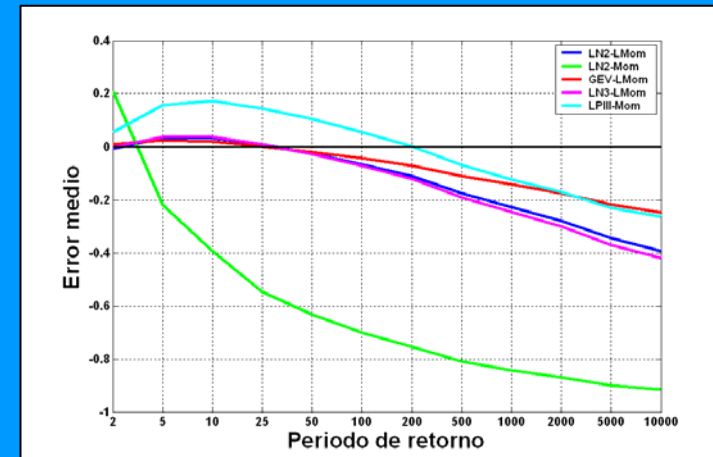
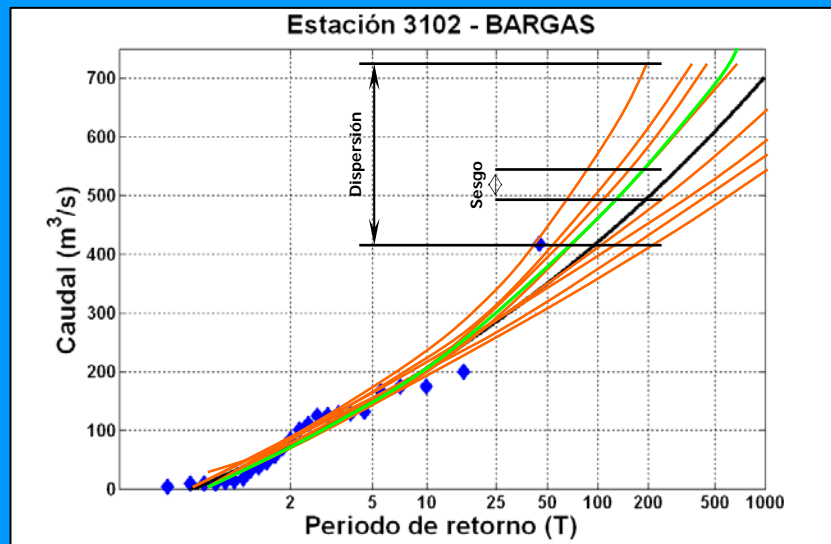
$$e_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(Q_{obs})_i - (Q_{est})_i|}{(Q_{obs})_i}$$





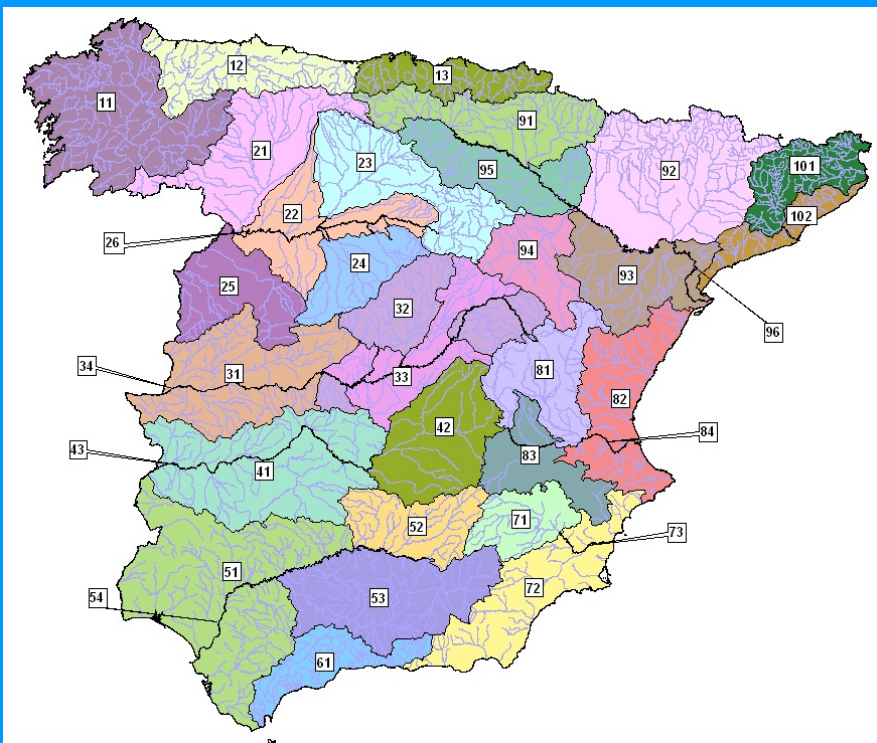
# ANÁLISIS DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN

- Análisis de las funciones de distribución y de los procedimientos de ajuste más idóneos: Capacidad predictiva.



## AJUSTE DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN

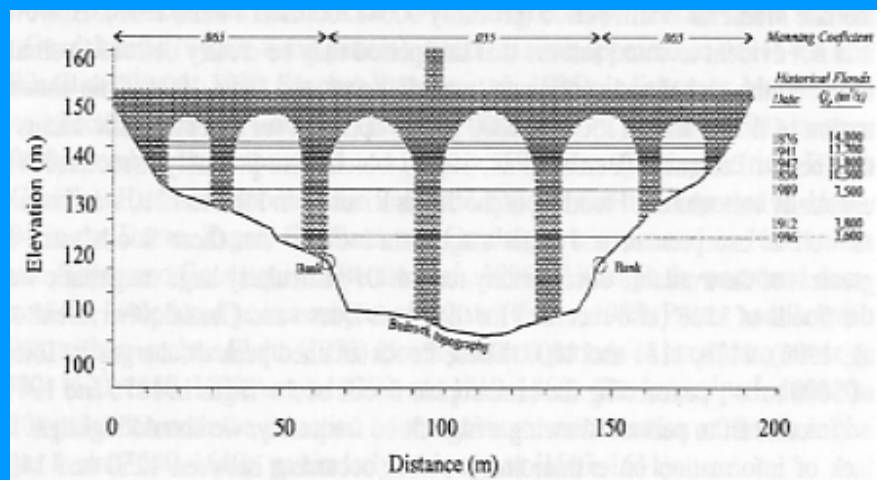
- Función de distribución y procedimiento de ajuste seleccionado:
  - Función de distribución de Valores Extremos Generalizada (GEV).
  - Ajuste por L-momentos.
  - Se impone en el ajuste un valor regional para el L-Cs.



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

## RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN HISTÓRICA

- Incorporación al análisis estadístico de información sobre grandes avenidas ocurridas en el pasado:
  - Es una de las formas, junto con el uso de información regional, de mejorar la estimación de los caudales de alto periodo de retorno.
  - Proporciona directamente información sobre la magnitud de los caudales de pequeña probabilidad.



Avenidas históricas en el puente de Alcántara

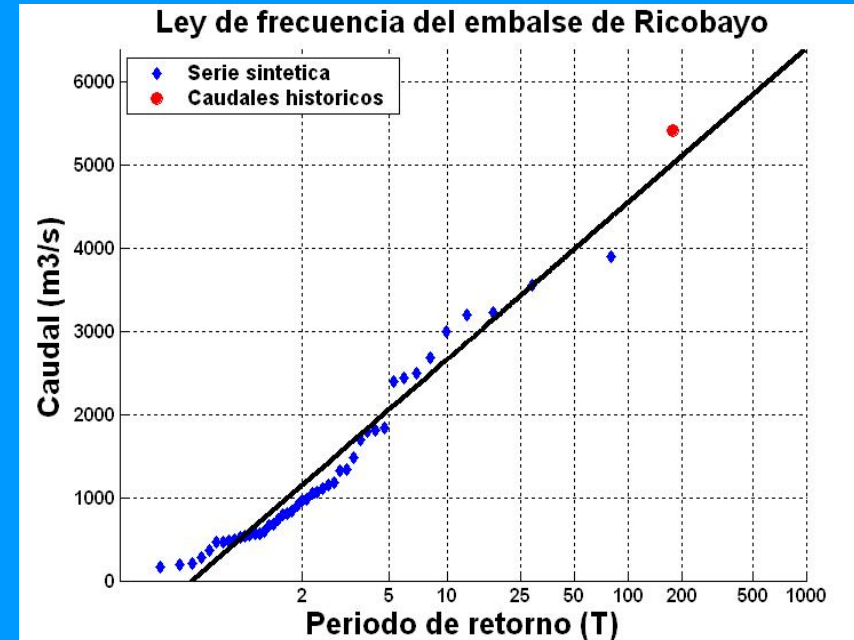
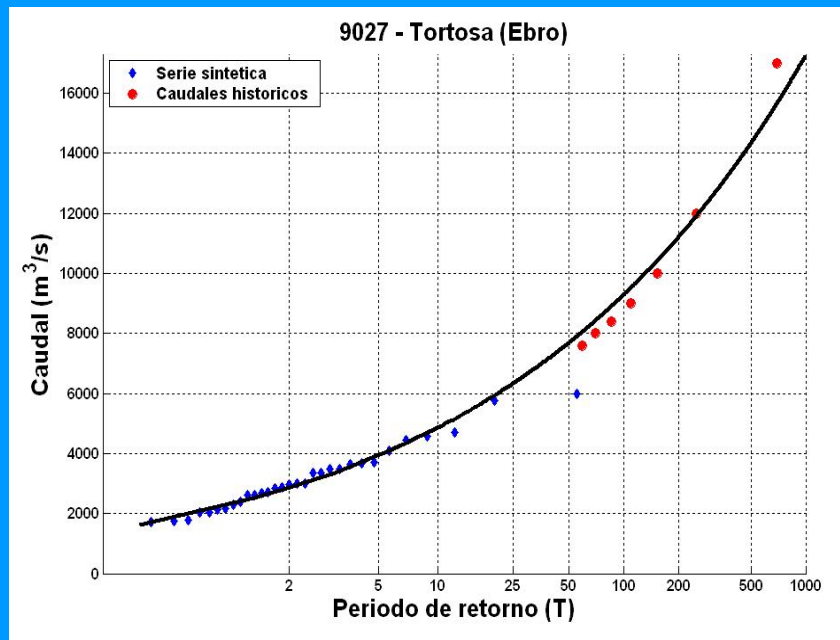


Avenidas históricas en el río Huebra





# RECOPILOCIÓN DE INFORMACIÓN HISTÓRICA

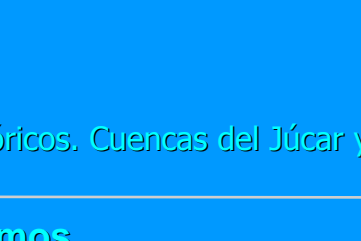
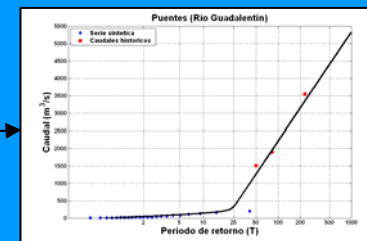
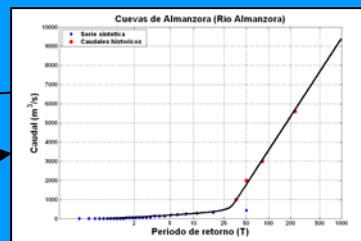
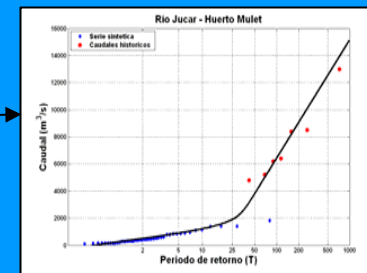
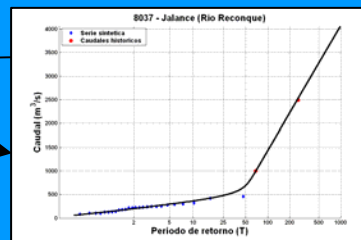
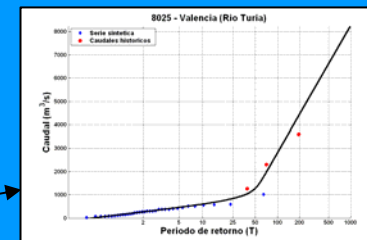
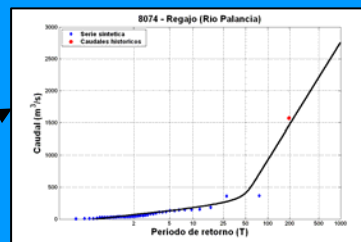
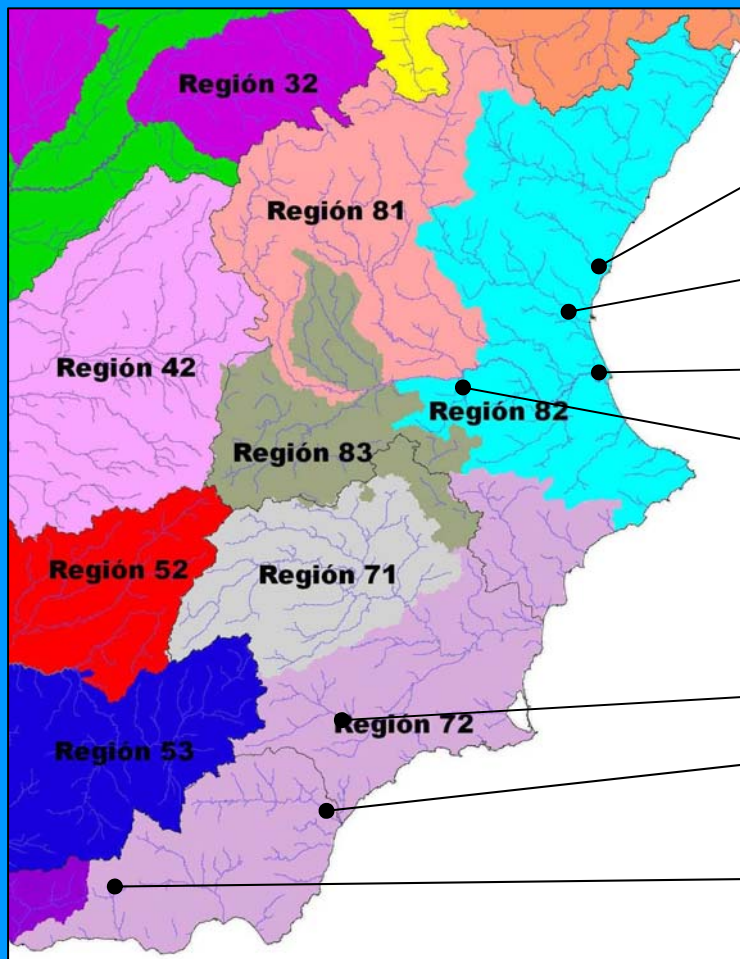


Ejemplos de ajustes de leyes de frecuencia con datos históricos



# FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN TCEV

Centro de Estudios Hidrográficos



Leyes de frecuencia con datos históricos. Cuencas del Júcar y Segura

## FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN TCEV

- Función de Valores Extremos de Dos Componentes (TCEV):

$$F(x) = e^{-\left[ -\alpha_1 e^{-\frac{x}{\theta_1}} - \alpha_2 e^{-\frac{x}{\theta_2}} \right]}$$

Parámetros:  $\alpha_1, \alpha_2, \theta_1, \theta_2$

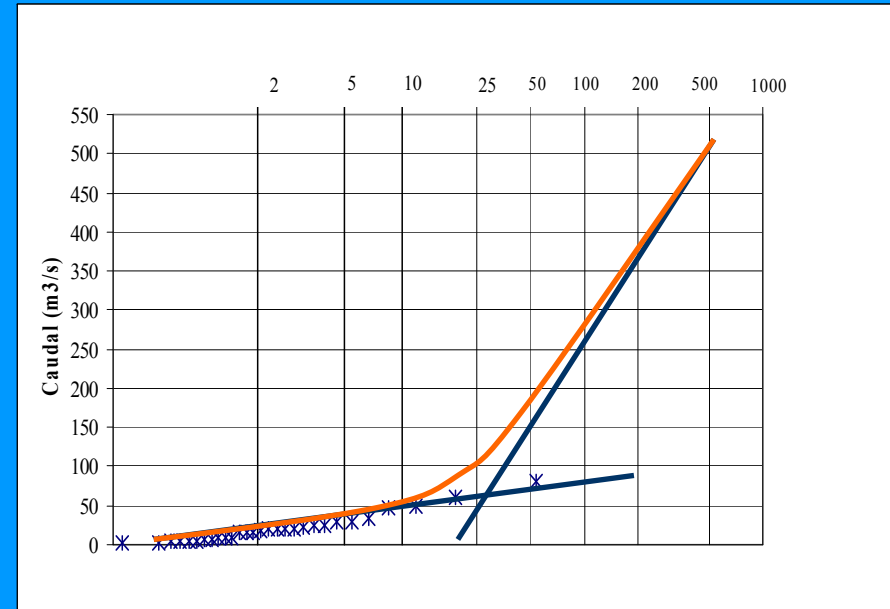
- Procedimiento de ajuste de la función TCEV:

Si se dispone de suficiente información

histórica: ajuste local mediante máxima verosimilitud.

Si no se dispone de información histórica:

- Ajuste local de una función Gumbel para la rama baja, eliminando previamente los outliers de la serie.
- Ajuste de una función Gumbel para la rama alta a partir de información regional.
- La función TCEV queda definida mediante el producto de ambas funciones.



$$(L - C_V)_2 = -0.26$$

$$M_2 = -10^{1.5846} \cdot M_1^{1.2280} \cdot (L - C_V)_1^{0.8554}$$

Cuenca del Segura

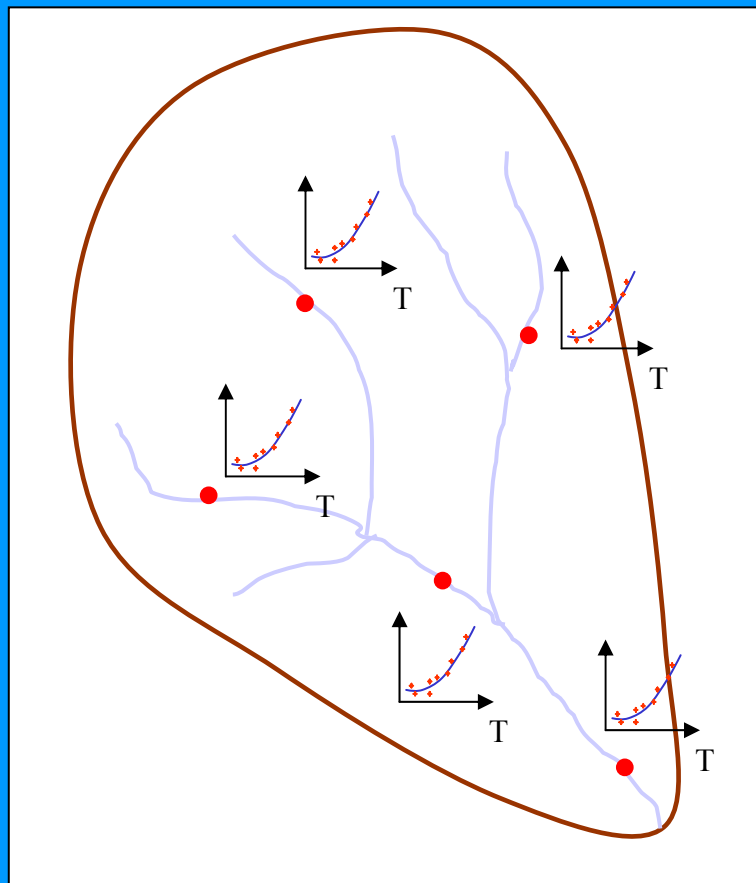
$$(L - C_V)_2 = -0.24$$

$$M_2 = -10^{2.5605} \cdot M_1^{0.6346} \cdot (L - C_V)_1^{0.9286}$$

Cuenca del Júcar



# CÁLCULO DE CUANTILES EN LOS PUNTOS AFORADOS



Región	Estación	Corriente	T=2	T=5	T=10	T=25	T=100	T=500
11	1010	SIL	273	424	534	687	941	1284
	1438	LANDRO	109	205	276	373	535	754
	1443	MERA	119	186	235	302	415	567
	1446	G. DE JUBIA	52	89	116	154	216	301
	1464	PISUERGA	113	195	255	337	475	660
	1485	ALLONES	83	124	154	196	266	360
	1519	TAMBRE	421	651	818	1049	1435	1954
	1542	FURELOS	95	144	179	228	310	421
	1552	DEZA	237	382	487	633	877	1205
	1564	UMIA	166	248	307	388	525	709
	1609	MINO	208	321	403	516	706	962
	1617	PARGA	106	160	199	253	344	467
	1619	LADRA	321	480	596	756	1024	1384
	1621	MINO	443	657	812	1028	1387	1871
	1626	SARRIA	58	105	140	188	268	376
	1631	MINO	1883	2942	3715	4782	6564	8963
	1647	LOURO	60	96	122	159	220	302
	1724	CUA	131	233	308	411	583	815
	1727	BURBIA	181	291	371	481	666	915
	1734	CABRERA	168	288	375	495	696	967
1739	SIL	745	1174	1486	1918	2639	3610	
1754	LOR	166	242	298	375	503	676	
1765	CABE	76	134	177	236	334	466	
1805	LIMIA	92	141	177	227	310	421	
1920	DUBRA	65	105	134	174	241	331	
1940	SOR	63	89	107	133	175	232	
E1490	COBO	12	21	27	36	52	72	
E1445	FORCADAS	14	19	22	28	36	48	
E1454	EUME	94	148	188	242	334	457	
E1507	JALLAS	228	344	429	546	741	1003	
E1546	ULLA	329	514	649	835	1146	1565	
E1627	MINO	888	1405	1783	2305	3176	4350	
E1718	BOEZA	121	213	280	372	527	735	
E1741	BIBEY	107	167	211	271	372	508	
E1770	CAMBA	187	261	315	389	513	680	
E1780	EDRADA	45	72	92	120	165	227	
E1781	CONSO	42	67	85	109	151	206	
E1790	NAVEA	115	168	206	259	348	467	
E1791	JARES	68	104	131	168	230	312	
E1795	MALO	33	59	77	103	145	202	
E1807	SALAS	95	165	215	285	402	559	
E1808	LIMIA	181	348	469	637	818	1296	

Cuantiles de caudal máximo. Demarcación del Miño-Sil





## ESTIMACIÓN DE LOS CUANTILES EN LOS PUNTOS NO AFORADOS

- Dos posibilidades:

- Métodos hidrometeorológicos:

- Simulan matemáticamente el proceso lluvia-escorrentía.
    - Requieren hipótesis simplificadoras (solo aplicable a cuencas pequeñas).
    - Calibrados para reproducir la ley de frecuencia de los puntos aforados.

- Métodos estadísticos:

- A partir del estudio de la correlación de las características estadísticas de los puntos aforados con diversas características físicas de las cuencas.

# ESTIMACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL

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

Intensidad de precipitación:

$$I_t = I_d \left( \frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0.1-t^{0.1}}}{28^{0.1}-1}}$$

Coeficiente de escorrentía:

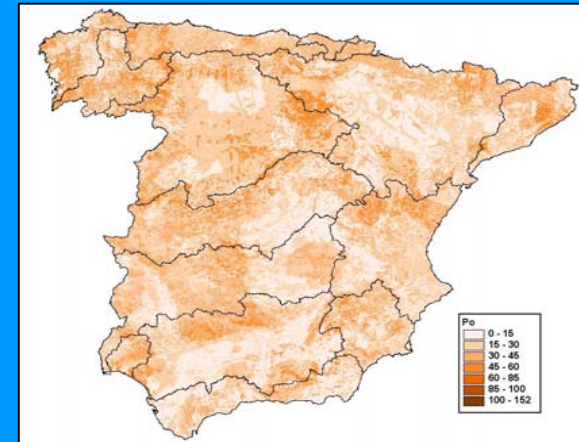
$$C = \frac{(P_d / P_0 - 1)(P_d / P_0 + 23)}{(P_d / P_0 + 11)^2}$$

Coeficiente de uniformidad:

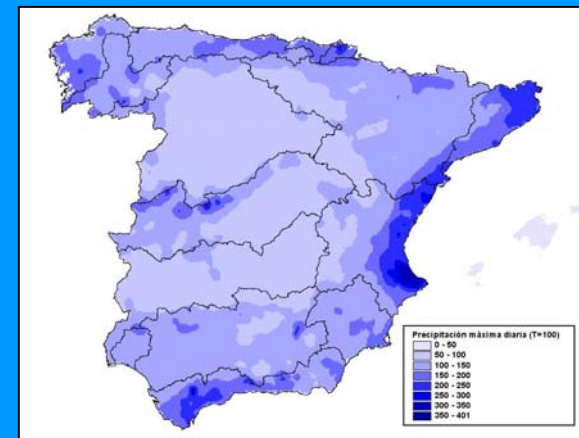
$$K = 1 + \frac{T_c^{1.25}}{T_c^{1.25} + 14}$$

- Capas utilizadas (resolución 500x500):

- MDT y mapa de direcciones de drenaje generado a partir del MDT del Servicio Geográfico del Ejército.
- Mapas de precipitaciones elaborados a partir del trabajo de Máximas Lluvias Diarias en la España Peninsular.
- Mapa de  $P_0$  procedente de la Tesis "Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva: datos de perfiles de suelos y teledetección", actualizado.



Mapa del umbral de escorrentía en condiciones medias de humedad



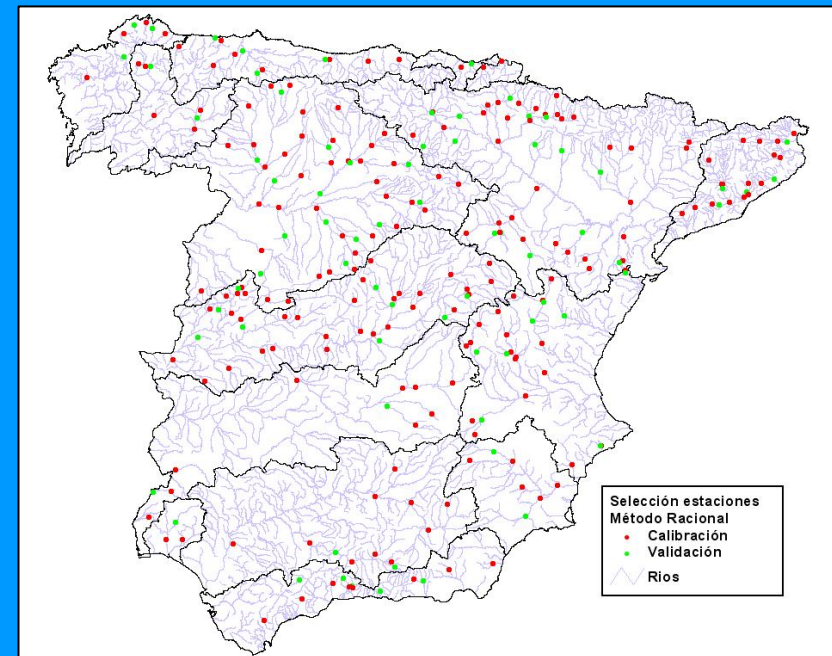
Mapa de precipitaciones diarias para 100 años de periodo de retorno

## CALIBRACIÓN REGIONAL DEL MÉTODO RACIONAL

- Calibración del parámetro  $P_0$ :

$$P'_0 = \beta \cdot P_0$$

- Criterio de selección de estaciones de aforos:
  - Series con más de 30 datos de caudal máximo instantáneo.
  - Estaciones no afectadas por embalses.
- Número de estaciones seleccionadas:
  - 185 estaciones para calibración.
  - 60 estaciones para validación.



Estaciones seleccionadas para calibración del método racional

# CALIBRACIÓN REGIONAL DEL MÉTODO RACIONAL

- Calibración del parámetro  $P_0$ :

$$P'_0 = \beta \cdot P_0$$

- Asignación de probabilidades a los datos mediante la fórmula de Gringorten.

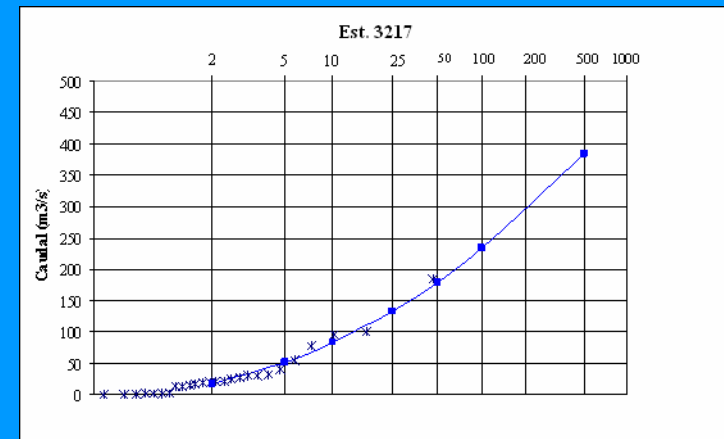
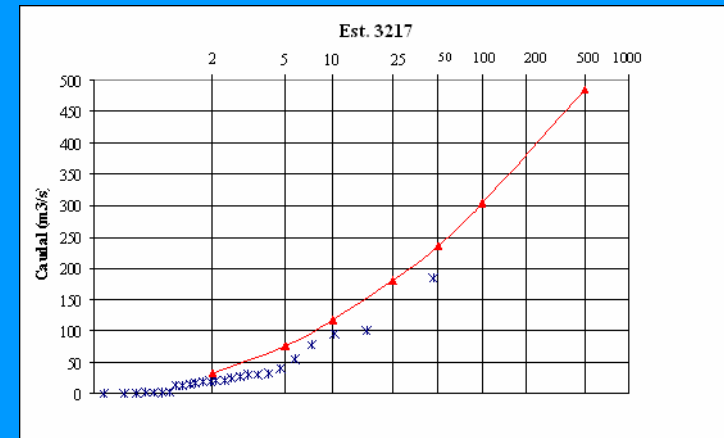
$$F(x) = \frac{i - 0.44}{N + 0.12}$$

$F(x)$ : Valor de la función de distribución para el dato  $x$ .

$i$ : Posición del dato en la serie ordenada de menor a mayor.

$N$ : número de datos de la serie.

- Cálculo de los cuantiles con el método racional para distintos  $\beta$ .
- Determinación del coeficiente  $\beta$  que ajusta los resultados del modelo a los aforos.
  - Ajustado al cuantil de 10 años de periodo de retorno.

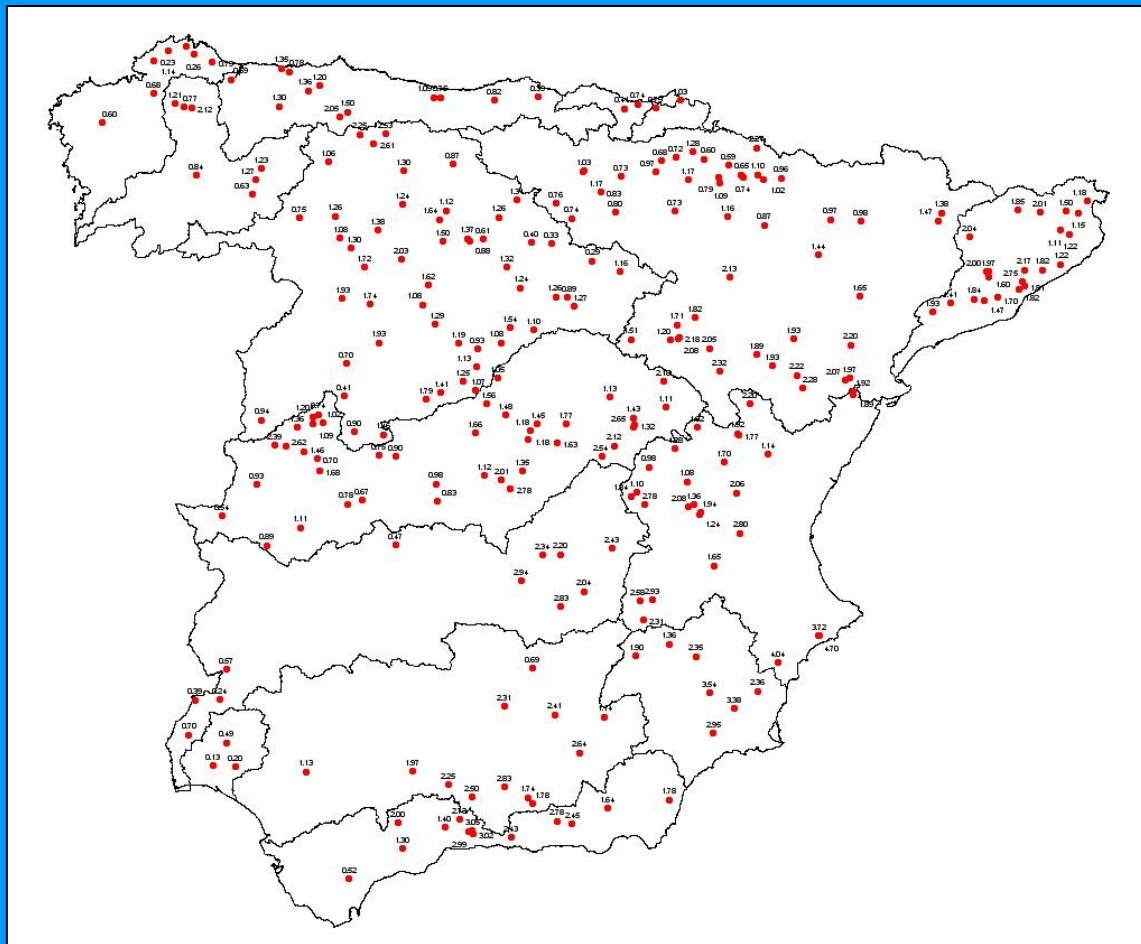


Estaciones seleccionadas para calibración del método racional



# CALIBRACIÓN REGIONAL DEL MÉTODO RACIONAL

Centro de Estudios Hidrográficos

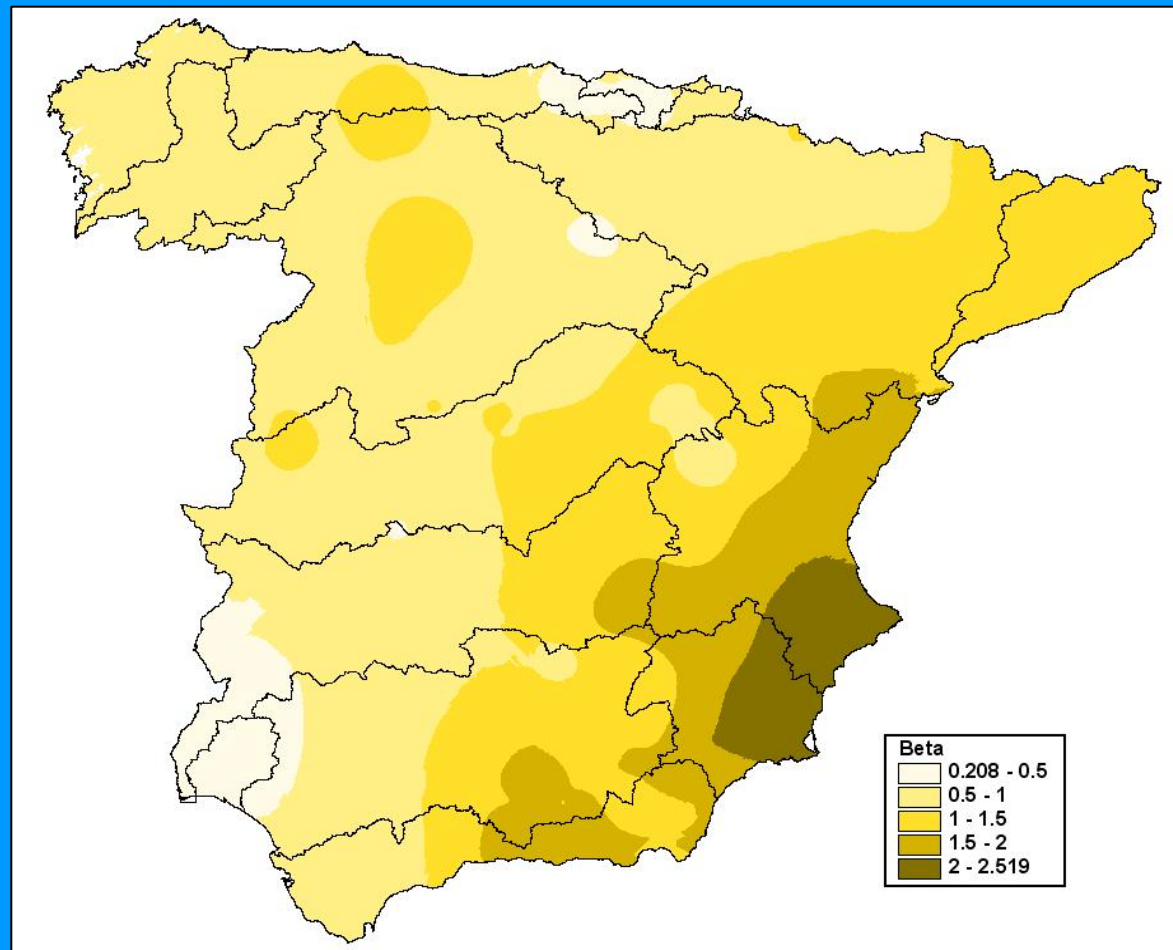


Valores del coeficiente corrector  $\beta$  en las estaciones seleccionadas



# CALIBRACIÓN REGIONAL DEL MÉTODO RACIONAL

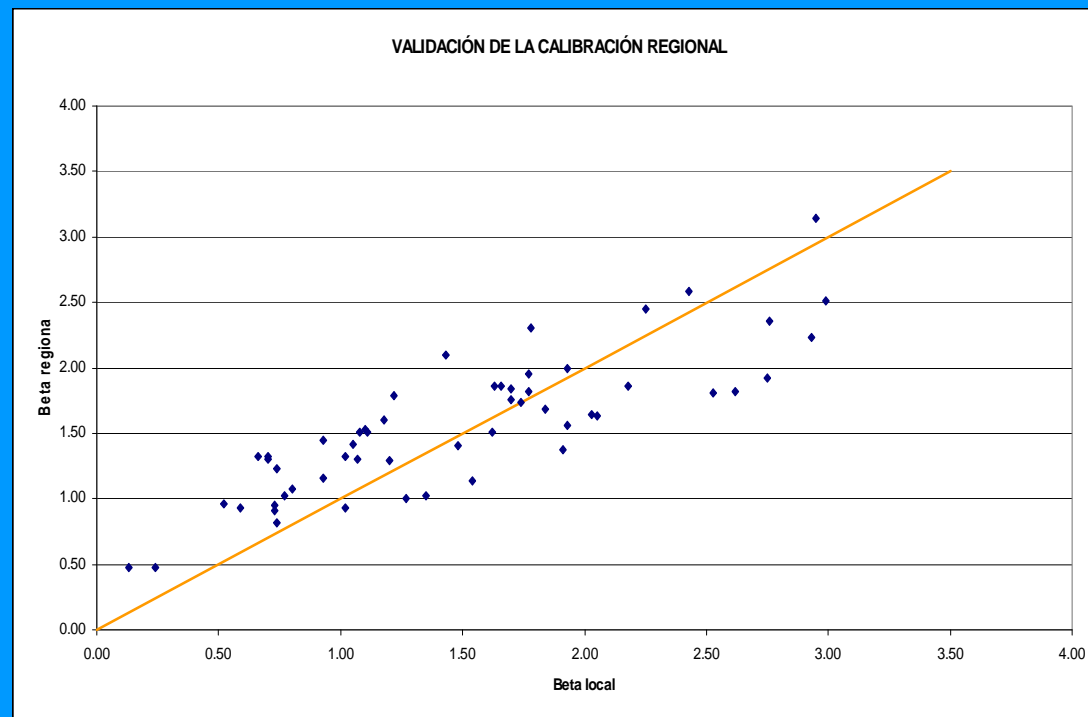
Centro de Estudios Hidrográficos



Mapa del coeficiente corrector  $\beta$  obtenido mediante interpolación espacial

## ESTIMACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL

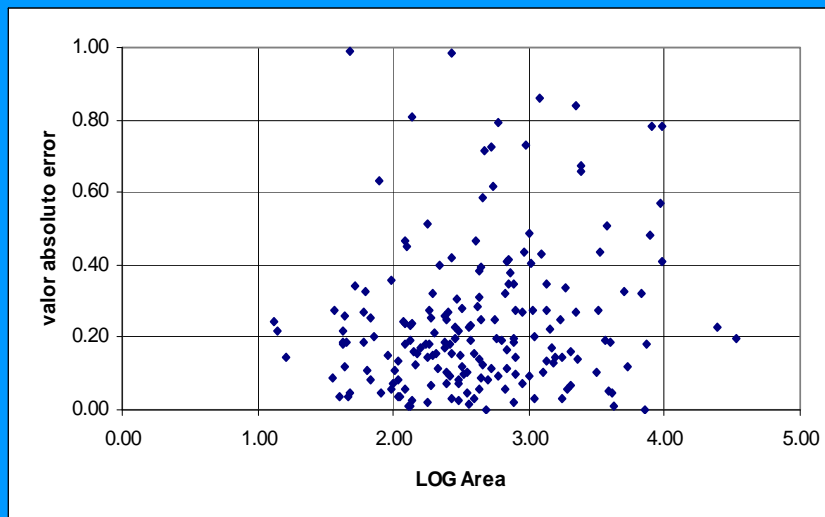
- Validación del mapa del coeficiente corrector  $\beta$ .



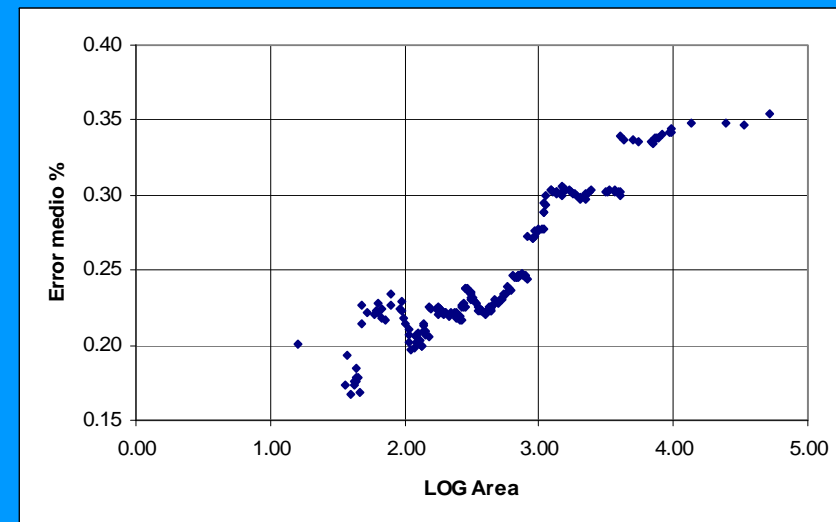
Comparación entre los valores regionales y locales del coeficiente  $\beta$  para las estaciones de validación

## ESTIMACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL

- Análisis del error en la estimación en función del tamaño de la cuenca.



Error en función del tamaño de la cuenca



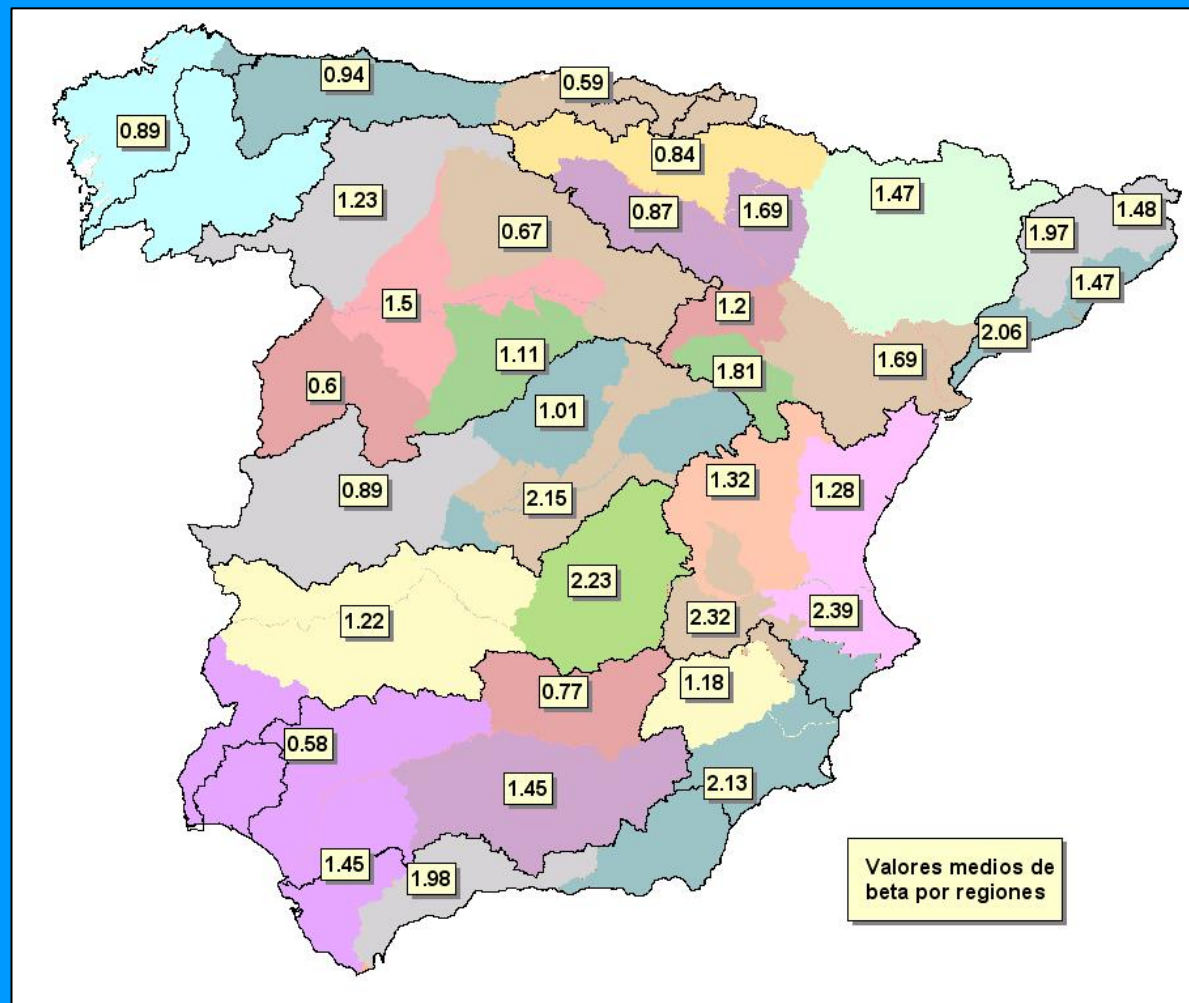
Error medio en función del tamaño de la cuenca





# CARACTERIZACIÓN DEL COEFICIENTE $\beta$ POR REGIONES

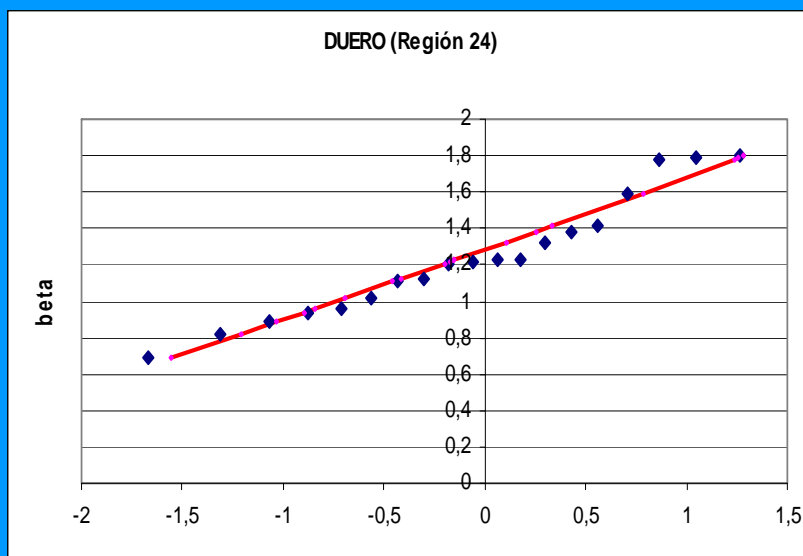
Centro de Estudios Hidrográficos



Valor medio del coeficiente corrector en cada región estadística



# CARACTERIZACIÓN DEL COEFICIENTE $\beta$ POR REGIONES

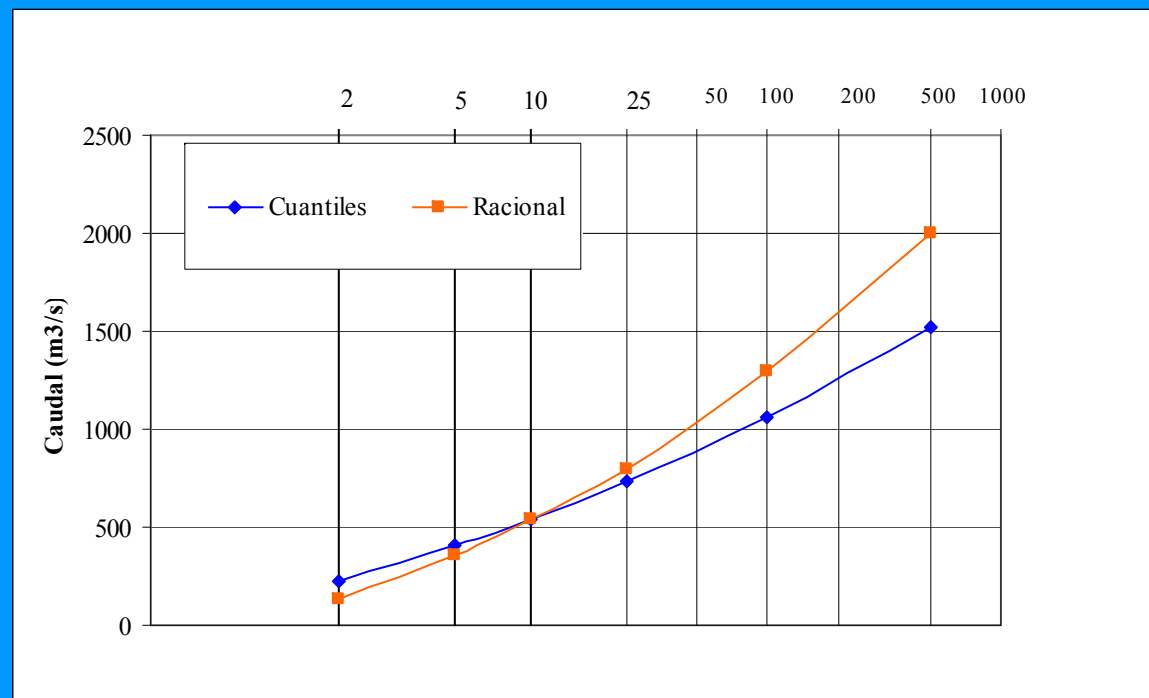


Distribución de probabilidades del coeficiente corrector  $\beta$  en la región 24 – Cuenca del Duero

Región	Valor medio ( $\beta_m$ )	Desviación respecto al valor medio		
		Intervalo de confianza del 50% ( $\Delta_{50}$ )	Intervalo de confianza del 67% ( $\Delta_{67}$ )	Intervalo de confianza del 90% ( $\Delta_{90}$ )
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
51	0.60	0.20	0.25	0.45
52	0.75	0.15	0.20	0.35
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

## CALIBRACIÓN REGIONAL DEL MÉTODO RACIONAL

- Valor del coeficiente corrector  $\beta$  para distintos periodos de retorno:

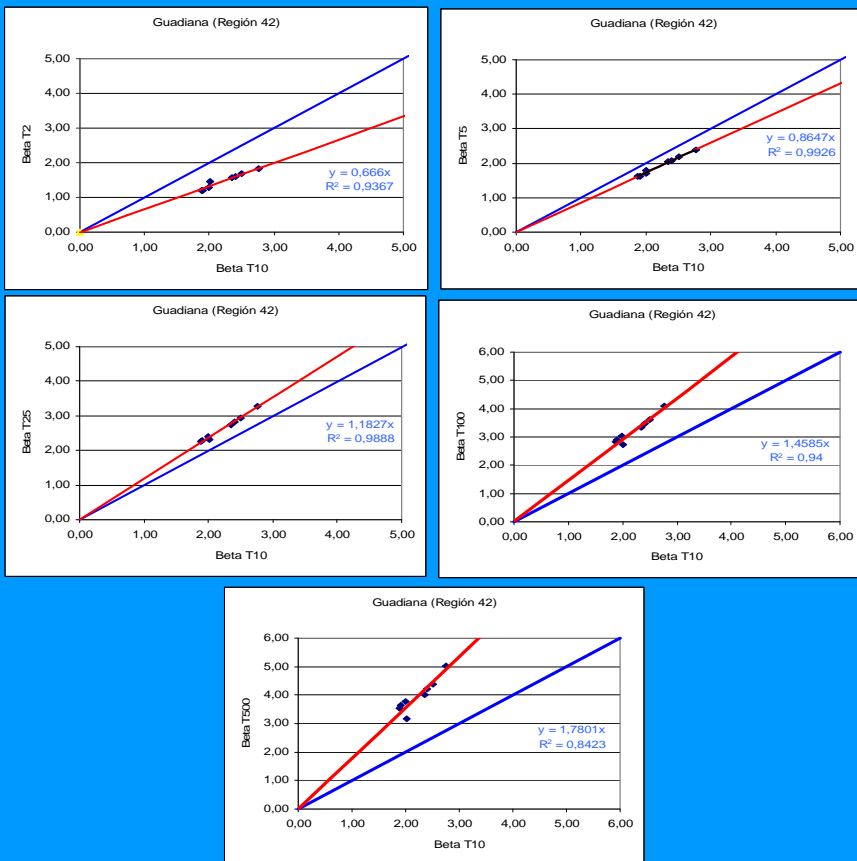


Comparación de la ley de frecuencia obtenida a partir de los datos de aforos y del método racional

# CALIBRACIÓN REGIONAL DEL MÉTODO RACIONAL

- Valor del coeficiente corrector  $\beta$  para distintos periodos de retorno:

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



Coefficientes correctores en función del periodo de retorno

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
51	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
52	0.91	0.95	1.09	1.23	1.41
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

Factores correctores del coeficiente  $\beta$



## MÉTODO ESTADÍSTICO

- Métodos para el cálculo de caudales con información regional:
  - Permiten la transferencia de información estadística de los puntos aforados a localizaciones sin registros.
- Posibles enfoques:
  - Regionalización de los cuantiles de cada periodo de retorno estimados en las estaciones a partir de un análisis local.
  - Selección de un tipo de función de distribución y regionalización de los estadísticos necesarios para su ajuste (media,  $C_v$ ,  $C_s$ , ...).
- Ventajas del método seleccionado:
  - Capacidad para considerar en el análisis la información histórica.
  - Capacidad para considerar la correlación entre estaciones.
  - Amplia experiencia en su aplicación a escala nacional (método empleado por el USGS para el cálculo de caudales máximos en EE.UU.).



## MÉTODO ESTADÍSTICO

- Procedimiento para el cálculo de los cuantiles de caudal con información regional:
  - Definición de las regiones con comportamiento estadístico homogéneo.
  - Cálculo del modelo estadístico: relación entre los cuantiles de distintos periodos de retorno y distintas características de la cuenca.
    - Mediante modelos de regresión lineal múltiple entre los logaritmos de las variables.

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

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

## MÉTODO ESTADÍSTICO

- Variables analizadas:

- Características físicas de la cuenca: Área de la cuenca, Perímetro de la cuenca, Longitud del río principal, Pendiente del río principal, Altitud media de la cuenca, Pendiente media de la cuenca.

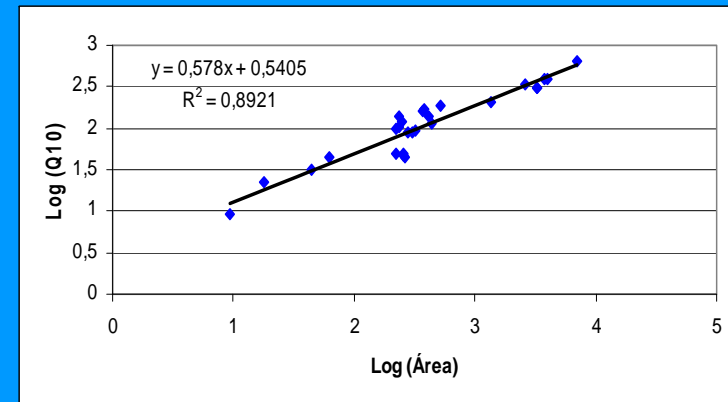
- Características climáticas: Cuantiles de precipitación máxima diaria, Precipitación media anual.

- Características del suelo y de los usos del suelo: Parámetro  $P_0$ , Tasa mínima de infiltración.

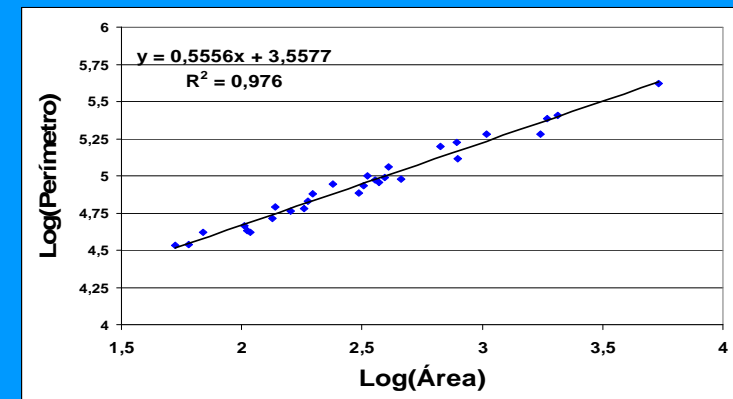
- Criterio para selección de las variables del modelo:

- Alta correlación con los cuantiles.

- Baja correlación con el resto de variables.



Correlación entre el Log del área y el del cuantil



Correlación entre las variables área y perímetro



## MÉTODO ESTADÍSTICO

- Variables seleccionadas para los modelos:

- Área de la cuenca
- Área con altitud mayor de 1500 m
- Cuantil de precipitación máxima
- Altitud media de la cuenca
- Pendiente media de la cuenca
- Umbral de escorrentía
- Tasa mínima de infiltración

- Proceso de ajuste de las ecuaciones de regresión:

- Ajustadas mediante mínimos cuadrados.
- Estadístico empleados para la selección del modelo: coeficiente de Mallow, coeficiente de determinación, error cuadrático medio, error cuadrático de predicción.

Región	Modelo de regresión	R <sup>2</sup>
11	$Q_{10} = 10^{-3.4334} A^{0.7608} P_{10}^{1.6973} H^{0.2153}$	0.98
12	$Q_{10} = 10^{-3.1828} A^{0.8122} P_{10}^{1.7884}$	0.92
21	$Q_{10} = 10^{-2.8375} A^{0.7909} P_{10}^{2.0257} P_0^{-0.6612} A_{1500}^{0.0323}$	0.82
22	$Q_{10} = 10^{-2.0814} A^{0.6364} P_{10}^{1.6693}$	0.96
23	$Q_0 = 10^{-9.3444} A^{0.7338} H^{3.2814} In f^{-0.4118}$	0.90
24	$Q_0 = 10^{-0.9049} A^{0.5851} P_{10}^{0.9128} P_0^{-0.2529}$	0.93
25	$Q_0 = 10^{-1.5903} A^{0.8534} P_{10}^{1.5593} In f^{-0.8144}$	0.94
31	$Q_0 = 10^{-3.3402} A^{0.8419} P_{10}^{1.1913} H^{0.4451}$	0.97
32	$Q_0 = 10^{-2.3875} A^{0.4419} P_{10}^{0.7751} H^{0.4444}$	0.92
33	$Q_0 = 10^{-4.3343} A^{0.9344} P_{10}^{2.9878}$	0.70
41	$Q_0 = 10^{-2.4015} A^{0.7444} P_{10}^{1.4743}$	0.99
42	$Q_0 = 10^{1.2172} A^{0.2848} P_0^{-0.4487}$	0.81
71	$Q_0 = 10^{-12.3454} A^{0.5458} P_{10}^{4.8502} P_{cuenca}^{0.1139}$	0.97
72	$Q_0 = 10^{-0.4982} A^{0.5304} P_{10}^{0.4003} P_{cuenca}^{0.0715}$	0.90
811	$Q_0 = 10^{-1.1432} A^{0.5479} P_{10}^{1.5149} In f^{-0.8555}$	0.98
812	$Q_0 = 10^{-9.0514} A^{0.4378} P_{10}^{4.9170} P_0^{-0.1224}$	0.93
82	$Q_0 = 10^{-0.5844} A^{0.7299} P_{10}^{0.5127}$	0.93
91	$Q_0 = 10^{-5.3835} A^{0.7708} P_{10}^{2.7154} H^{0.2044} In f^{-0.0144}$	0.94
92	$Q_0 = 10^{-5.2974} A^{0.4731} P_{10}^{2.9953} A_{1500}^{0.0534}$	0.93
93	$Q_0 = 10^{-3.8337} A^{0.5454} P_{10}^{2.2415}$	0.93
941	$Q_0 = 10^{-0.2003} A_{1500}^{0.4431}$	0.81
942	$Q_0 = 10^{0.7892} A_{1500}^{0.4083}$	0.95
95	$Q_0 = 10^{0.2444} A^{0.4141} A_{1500}^{0.0438} P_{cuenca}^{0.0949}$	0.93

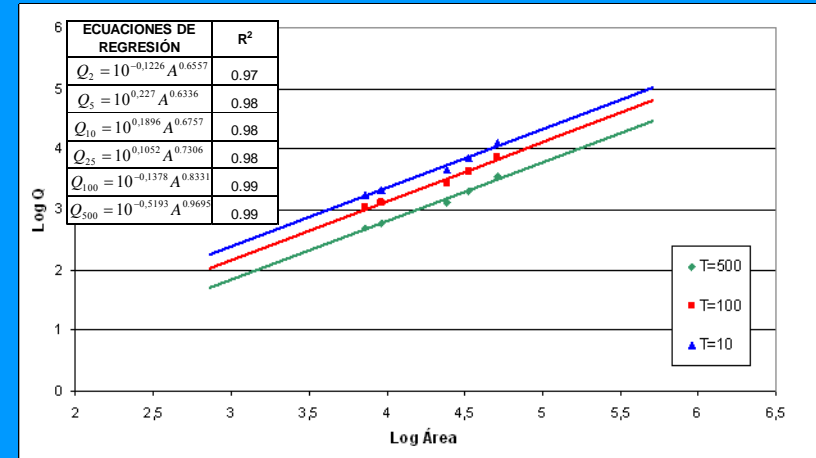
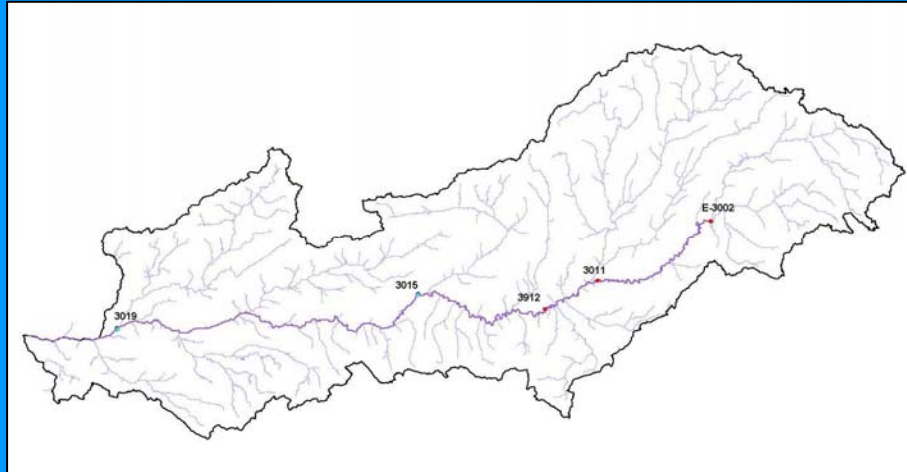
Ecuaciones en las distintas regiones para 10 años de período de retorno



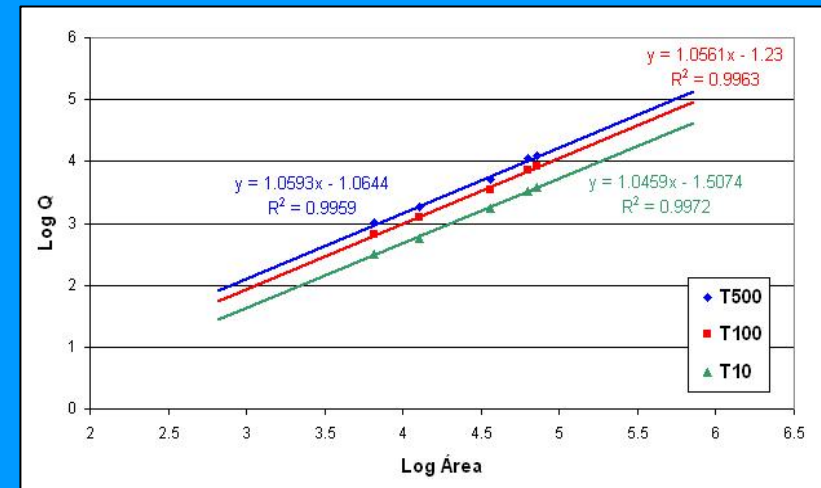
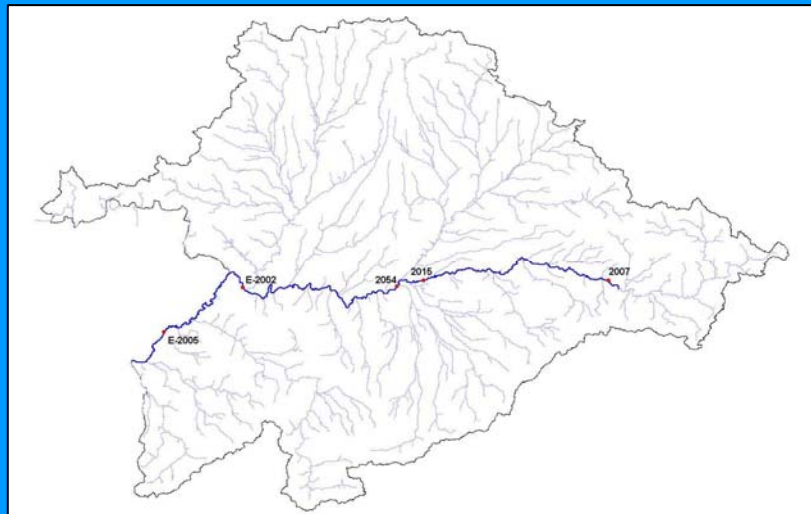


# ECUACIONES EN GRANDES EJES FLUVIALES

Centro de Estudios Hidrográficos



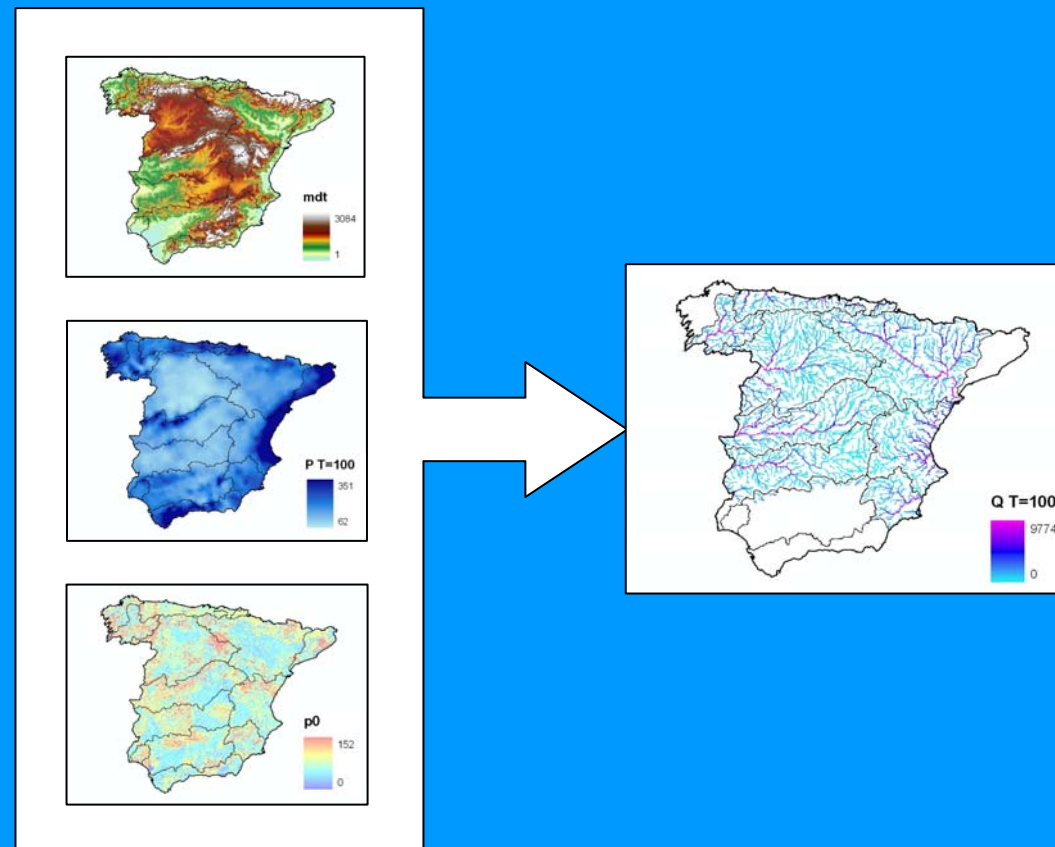
Ecuaciones en el río Tago



Ecuaciones en el río Duero

## ELABORACIÓN DE LOS MAPAS CON LOS RESULTADOS

- Composición de los resultados obtenidos mediante los métodos racional modificado y estadístico.
- Correcciones locales para conseguir transiciones suaves en los puntos de enlace de ambos métodos.

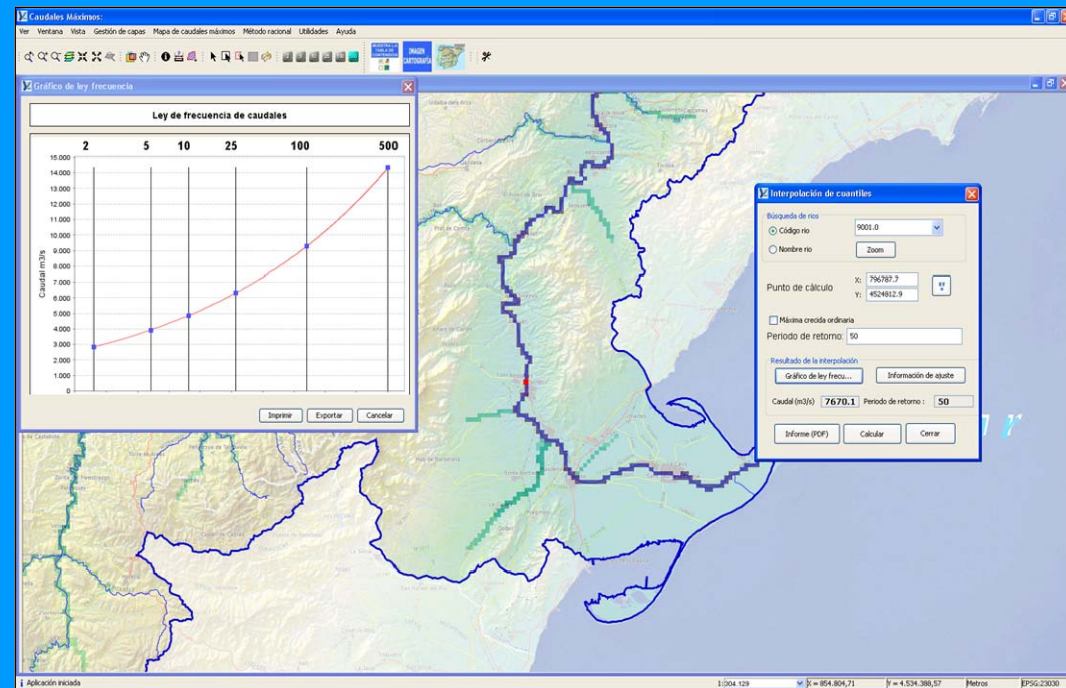




## APLICACIÓN INFORMÁTICA

- Facilita la visualización y consulta de los mapas.
- Incluye herramientas para estimar los caudales en cuencas de menos de 50 km<sup>2</sup> mediante aplicación del método racional.

Centro de Estudios Hidrográficos



[http://hercules.cedex.es/caumax/caumax\\_v2.rar](http://hercules.cedex.es/caumax/caumax_v2.rar)

## OBTENCIÓN DE UN VALOR ORIENTATIVO PARA LA MCO

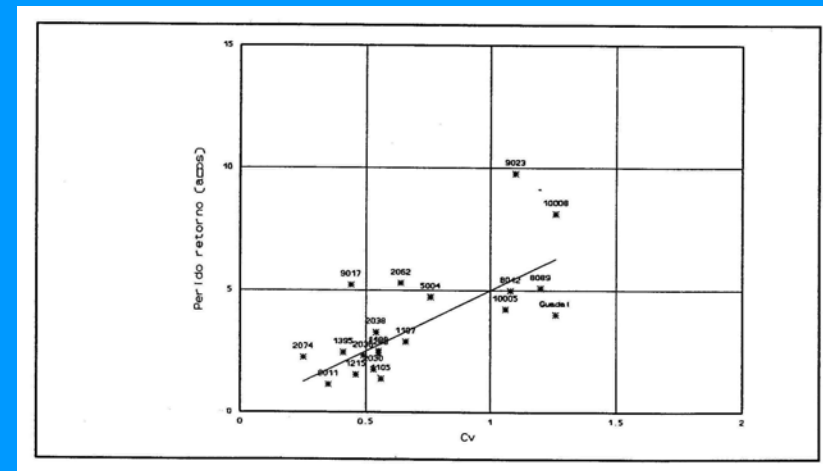
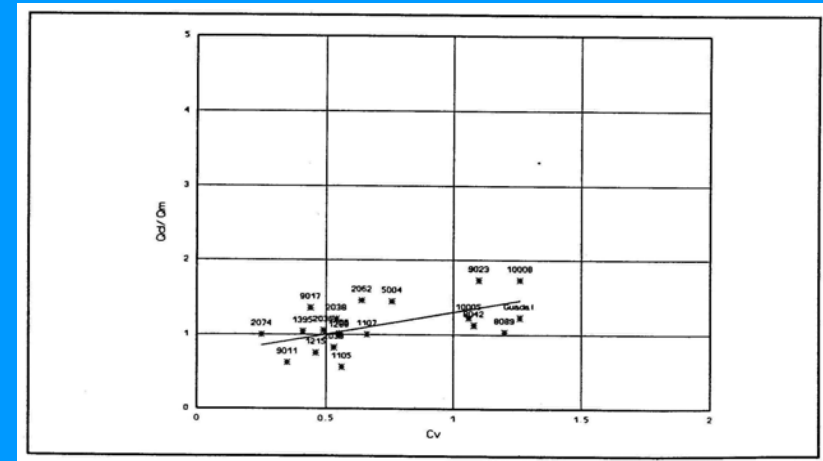
- Expresiones aproximadas propuestas en "*Aspectos prácticos de la definición de la Máxima Crecida Ordinaria (CEDEX, 1994)*":

- Relación entre el caudal de la MCO y la media ( $Q_m$ ) y el  $C_v$  de la serie de caudales máximos anuales:

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

- Relación entre el periodo de retorno de la MCO y el  $C_v$  de la serie de caudales máximos anuales:

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



Relaciones aproximadas de la MCO con los estadísticos de la serie de caudales máximos anuales (CEDEX, 1994)

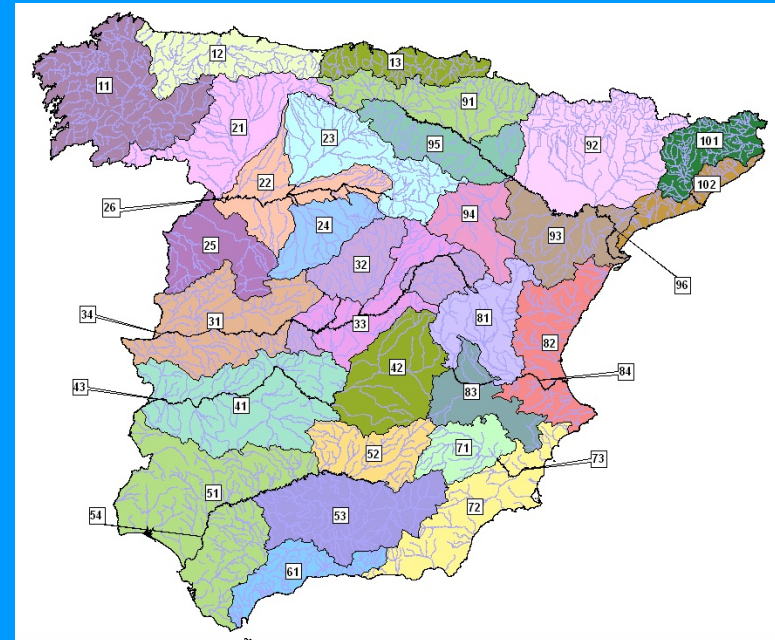
## OBTENCIÓN DE UN VALOR ORIENTATIVO PARA LA MCO

- Se puede obtener una estimación aproximada para la MCO mediante:

- La expresión aproximada que relaciona el periodo de retorno de la MCO con el Cv:

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

- Asignación de un valor regional del Cv a cada una de las regiones estadísticas.
- Interpolación entre los cuantiles del mapa de caudales máximos.



Región	CV	T	Región	CV	T
11	0.59	3.0	51	0.96	5.0
12	0.54	2.5	52	0.74	3.5
13	0.54	2.5	71	1.13	5.5
21	0.48	2.5	72	1.44	7.0
22	1.15	6.0	73	1.07	5.5
23	0.66	3.5	81	0.87	4.5
24	0.75	4.0	82	1.21	6.0
25	0.75	4.0	83	1.19	6.0
26	0.81	4.0	84	0.88	4.5
31	0.79	4.0	91	0.47	2.5
32	0.79	4.0	92	0.70	3.5
33	1.04	5.0	93	1.36	7.0
34	0.76	4.0	94	1.04	5.0
41	1.20	6.0	95	0.69	3.5
42	1.05	5.5	96	0.50	2.5
43	0.83	4.0			

Se trata de un valor orientativo obtenido a través de expresiones aproximadas.