

# Parámetros geomorfológicos y regresión múltiple en el comportamiento hidrológico de caudales en las cuencas altas de los ríos Tajo y Guadiana

Morphometrical parameters and multiple regression analysis in the hydrological response of Tajo and Guadiana Upper Basins

A. Potenciano <sup>(1)</sup> y G. Garzón <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geodinámica, Facultad de Geología, UCM, 28040 Madrid / Instituto Geológico y Minero de España (IGME), C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. a.potenciano@igme.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Geodinámica, Facultad de Geología, UCM, 28040 Madrid. minigar@geo.ucm.es

## ABSTRACT

A multiple regression model allows us to interpret differences in flood discharge between Tajo and Guadiana watersheds. Statistical relationships between discharge and rainfall and morphometrical parameters of each subbasin shows up the significance of relief, stream length and either rainfalls or permeability according also to the considered return period.

Key words: Floods, flood discharge, maximum probable discharge, multiple regression, morphometrical parameters, Tajo and Guadiana watersheds

Geogaceta, 38 (2005), 259-262  
ISSN: 0213683X

## Introducción

Este estudio se pretende profundizar en el conocimiento de los distintos comportamientos de las cuencas hidrológicas en cuanto a la generación de caudales de avenida, a través del análisis de las interrelaciones existentes con los parámetros físicos y climáticos que caracterizan a cada cuenca y que determinan las salidas del sistema. El objetivo principal es la caracterización del comportamiento frente a las avenidas de una serie de subcuencas del Tajo y el Guadiana, mediante la aplicación de un modelo de regresión múltiple (Escalante y Reyes, 1998), que determina qué características físicas, litológicas, morfológicas y climáticas son determinantes en la generación del caudal, es decir, cuáles de ellas contribuyen más directamente el caudal que llega al punto de salida. Finalmente, la validación de este modelo de regresión permitirá establecer una formulación o método de cálculo para la estimación de caudales máximos de avenida, que puede servir de complemento a otros métodos hidrológicos e hidrometeorológicos ya existentes para un mejor conocimiento del funcionamiento de las cuencas fluviales, teniendo en cuenta la integración de factores geomorfológicos, litológicos y climáticos.

## Metodología

Para este estudio se han seleccionado 31 subcuencas hidrográficas (Fig. 1), 19 pertenecientes a la cuenca alta del Tajo y 12 pertenecientes a la cuenca alta del Guadiana.

Los criterios de selección de las cuencas a analizar se han basado, fundamentalmente, en la disponibilidad de datos de caudal y precipitación suficientes y en la

existencia de registros históricos de inundaciones.

Se han seleccionado una serie de estaciones meteorológicas y estaciones de aforo, siguiendo criterios de proximidad a las cuencas de estudio y de calidad y continuidad en la serie de datos. De estas estaciones se han obtenido las series de precipitación y caudal máximas diarias, desde 1945 hasta la actualidad, en el caso de las precipitacio-

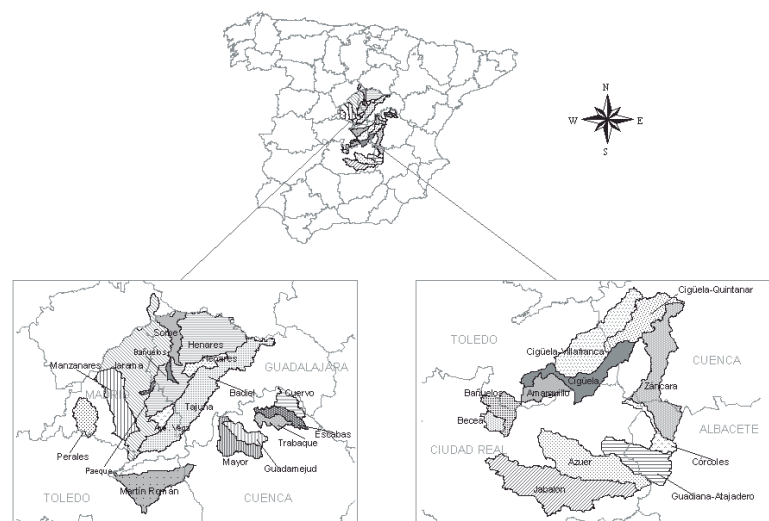


Fig. 1.- Esquema de situación de las cuencas hidrográficas analizadas (A Tajo y B Guadiana).

Fig. 1.- River Basins location (A. Tajo and B. Guadiana).

	Parámetros más representativos frente al caudal	Periodos de retorno	Coefficientes correlación Pearson	ANOVA P Value	Durbin Watson
Todas las subcuencas del Tajo y del Guadiana	Relación relieve cuenca	10	0.44	0.0019	2.5-2.6
		25	0.47	0.0005	
		100	0.53	0.0000	
		500	0.59	0.0000	
	Longitud cauce	10	0.27	0.0028	
		25	0.26	0.0006	
		100	0.24	0.0001	
		500	0.17	0.0001	
	Impermeabilidad cuenca	10	0.07	0.2000	
		25	0.10	0.0902	
		100	0.17	0.0243	
		500	0.27	0.0033	
	Pb (precipitación máxima ajuste GEV_momentos ponderados)	10	-0.18	0.1939	
		25	-0.15	0.0969	
		100	-0.09	0.0446	
		500	-0.05	0.0444	
Subcuencas del Tajo	Relación relieve cuenca	10	0.42	0.3841	2.1-2.8
		25	0.46	0.1481	
		100	0.52	0.0241	
		500	0.59	0.0045	
	Longitud cauce	10	0.44	0.0017	
		25	0.45	0.0009	
		100	0.46	0.0005	
		500	0.45	0.0006	
	Impermeabilidad cuenca	10	0.79	0.0004	
		25	0.78	0.0005	
		100	0.75	0.0014	
		500	0.68	0.0146	
	Pb (precipitación máxima ajuste GEV_momentos ponderados)	10	-0.17	0.7347	
		25	-0.12	0.5555	
		100	-0.04	0.3720	
		500	0.05	0.3008	
Subcuencas del Guadiana	Relación de relieve	10	-0.13	0.5480	1.8-2.5
		25	0.002	0.5471	
		100	0.23	0.7048	
		500	0.51	0.2989	
	Longitud cauce	10	0.59	0.0382	
		25	0.49	0.1843	
		100	0.29	0.1895	
		500	0.01	0.1195	
	Impermeabilidad cuenca	10	-0.08	0.2072	
		25	0.04	0.2337	
		100	0.24	0.5546	
		500	0.49	0.5170	
	Pb (precipitación máximo ajuste GEV_momentos ponderados)	10	0.12	0.3925	
		25	0.30	0.4186	
		100	0.36	0.9746	
		500	0.04	0.7921	

Tabla I.- Resultados del análisis de correlación de Pearson, del análisis de la varianza y de las pruebas de independencia Durbin Watson que indican los parámetros más representativos frente al caudal y que se incluirán como variables independientes en el modelo de regresión.

Table I.- Results of Pearson correlation, Anova and Durbin Watson independence tests showing the most significant parameters related to discharge. They are considered as independent variables for the regression analysis.

nes, y desde 1911 hasta la actualidad en el caso de los caudales, a partir de los datos proporcionados por el I.N.M. – Instituto Nacional de Meteorología y el CEDEX-Centro de Estudios Hidrográficos.

Se han considerado los caudales no regulados teniendo solo en cuenta las cuencas aguas arriba de embalses o los datos de caudal de fechas anteriores a la construcción de dichas obras.

En cada cuenca se han calculado las máximas precipitaciones (Pb) y los máximos caudales probables (Q) para períodos de retorno de 10, 25, 100 y 500 años, aplicando a las series máximas diarias distintas funciones de distribución combinadas con métodos de ajuste probabilísticos. En el estudio de avenidas se debe partir de la hipótesis «más desfavorable», es decir, que se registre la máxima precipitación probable y se produzca el máximo caudal de avenida probable. Por ello, se deben utilizar los modelos de ajuste

probabilístico que arrojen los valores máximos, pero también que se adecuen al tipo de distribución de la serie, para ello se puede comprobar gráficamente el ajuste de la curva de probabilidades a la nube de puntos que forman los datos de partida. En nuestro caso el método de ajuste que mejor cumple estas características es la función de distribución de valores extremos generalizados (GEV), que es además una de las más utilizadas actualmente a nivel internacional (WMO, 1989; Ferrer, 1992 y Díez Herrero, 2002)

En cada una de las 31 subcuencas del Tajo y del Guadiana seleccionadas se han medido una serie de parámetros morfológicos, geométricos y de relieve, de las cuencas y redes de drenaje, a partir de los mapas topográficos y MDT del IGN, de cubierta forestal del ICONA, de cultivos y aprovechamiento del MAPA y cartografía geológica de las series MAGNA del IGME. Estos parámetros se han medido utilizando

los métodos y formulaciones desarrolladas por diversos autores como Schumm, 1977 y Témez, 1978, y son los siguientes:

*Geometría de la cuenca:* área de la cuenca (Km<sup>2</sup>), longitud de la cuenca (Km), forma de la cuenca (índice de elongación).

*Geometría y jerarquización de la red de drenaje:* longitud del cauce principal (Km), densidad de cauces (nº cauces/Km), densidad de drenaje (Km/Km<sup>2</sup>), orden del cauce principal, índice medio de bifurcación de cauces.

*Parámetros de relieve de la cuenca y red de drenaje:* amplitud de relieve de la cuenca (m), relación de relieve de la cuenca (m/Km), pendiente media del cauce principal (m/Km).

*Otros parámetros:* tiempo de concentración (horas) e impermeabilidad de la cuenca.

### Resultados

Una vez calculadas las variables, se ha desarrollado un modelo de regresión múltiple, analizando las relaciones existentes entre dichas variables mediante el programa informático Statgraphics y el sistema de análisis estadístico SAS.

El método de regresión múltiple permite analizar la relación entre más de dos variables, una variable dependiente y un conjunto de variables independientes, y descartar relaciones debidas al azar, que pueden llevar a confusiones a la hora de interpretar los resultados (Etcheberria, 1999). En este estudio se ha tomado como variable dependiente el caudal máximo probable y como variables independientes los parámetros morfológicos de las cuencas y la precipitación máxima probable. La expresión que define la regresión múltiple es  $Y=a+b_1X_1+b_2X_2+...+b_nX_n$ , donde Y es la variable dependiente,  $X_1...X_n$  son las variables independientes, a es la constante de regresión y  $b_1...b_n$  son los coeficientes de regresión estimados

En primer lugar, se han seleccionado las variables independientes X que tienen que cumplir una serie de condiciones, por una parte que exista independencia estadística entre ellas, y que al mismo tiempo estén relacionadas con la variable dependiente Y, sin que esta relación sea debida al azar.

Para comprobar esta independencia se han utilizado dos métodos:

*La correlación de Pearson*, que permite descartar las variables independientes que presentan dependencia lineal entre ellas y comprobar cuáles de estas variables presentan más relación con el caudal (índices de correlación cercanos a 0.5)

*El test estadístico de valores residuales Durbin-Watson (DW)* que determina si hay una correlación significativa entre los valores residuales de las series de datos utilizados en la regresión múltiple. Si el resultado del test DW está por encima de 1.4, no hay una seria

autocorrelación de los residuos, luego las variables se pueden considerar independientes.

*Análisis de la varianza*, que permite comprobar la no existencia de dependencia debida al azar entre la variable dependiente y las variables independientes. Cuando el análisis de la varianza arroja valores del parámetro P\_Value menores que 0.05 indica que la relación entre las variables dependiente e independientes es alta y existe poca probabilidad de que sea debida al azar (SOG, 1995)

Mediante estos análisis se han seleccionado los parámetros que mejor explican el caudal desde el punto de vista estadístico (Tabla I) y que serán los utilizados como variables independientes en el modelo de regresión múltiple. Además se ha comprobado que existen diferencias en los resultados dependiendo del período de retorno considerado.

Los resultados del análisis de la varianza y los test de independencia ofrecen como parámetros más representativos frente al caudal la relación de relieve de la cuenca y la longitud del cauce principal, y para altos períodos de retorno también son representativos la impermeabilidad de la cuenca y la precipitación.

Partiendo de estos cuatro parámetros se ha obtenido un modelo de regresión (Tabla II) considerando primero todas las cuencas y analizando también por separado las cuencas del Tajo y el Guadiana. Este modelo de regresión podría utilizarse en la estimación de caudales máximos probables para diferentes períodos de retorno. Pero para ello se debe comprobar la capacidad predictiva del modelo y su grado de bondad, por lo que se llevó a cabo la validación del modelo utilizando los datos de las cuencas que no intervinieron en el análisis de regresión: Perales, Amarguillo, Henares y Jarama (Fig. 1).

Aplicando a continuación las funciones de regresión obtenidas anteriormente, se comprobó que los caudales resultantes eran similares a los caudales reales aforados cuando se utilizaba el modelo de regresión desarrollado para todas las cuencas en conjunto (Tabla II y Fig. 2) y cuando se aplica a pequeñas y medianas cuencas.

Por tanto, los resultados de la comprobación de estas funciones son muy buenos para los ríos de menor tamaño (Perales y Amarguillo), pero en cambio en los ríos grandes (Henares y Jarama) el modelo no da buenos resultados, lo que sería esperable ya que estas últimas son cuencas con una gran extensión y un funcionamiento mucho más complejo.

## Discusión

Podemos concluir de este análisis de validación que el modelo de regresión re-

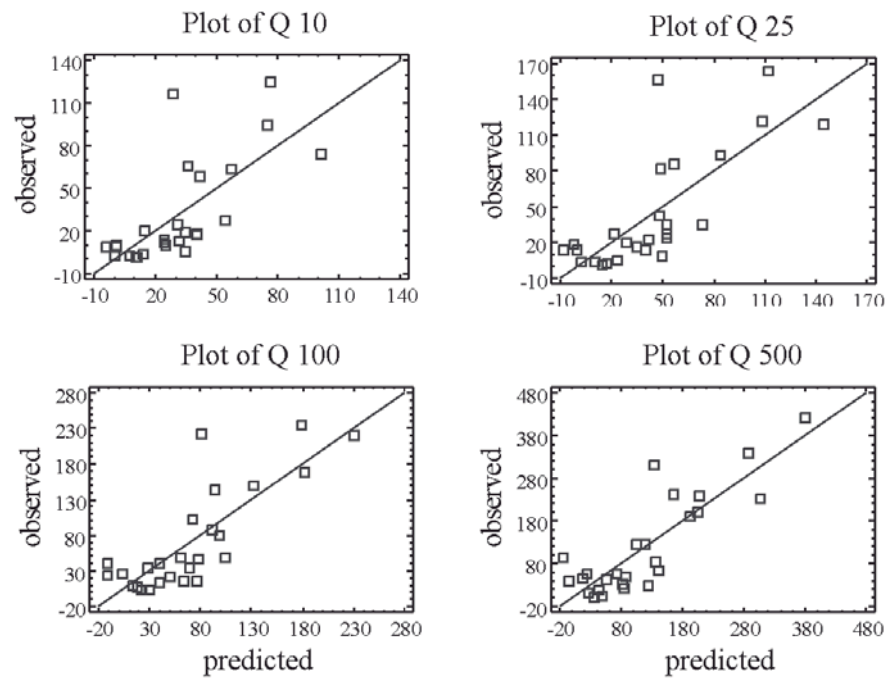


Fig. 2.- Resultados del modelo de regresión múltiple seleccionado en los que se observa un mejor ajuste del caudal (Q) para altos períodos de retorno.

Fig. 2.- Multiple regression selected results showing a better discharge (Q) adjustment for high return periods.

saltado en la tabla II es el que define mejor el funcionamiento de las cuencas estudiadas en cuanto a la generación de caudales máximos, tanto para cuencas del Tajo como para cuencas del Guadiana. En este modelo se incluye la relación de relieve, la longitud del cauce principal, la impermeabilidad y la precipitación y sería válido para cuencas de tamaño pequeño y mediano y con similares características a las descritas para las cuencas del centro peninsular.

Hay que considerar que, tanto el área como la amplitud de relieve de la cuenca y la pendiente del cauce, tienen también una buena relación con el caudal, pero son parámetros que ya se incluyen implícitamente en la relación de relieve de la cuenca, y además esta última explica el caudal con mayor peso en los modelos de regresión, como se puede comprobar en las funciones obtenidas, por lo que se considera más válida. Además estos otros parámetros, en especial el área de la cuenca, tienen buena relación con el caudal en las cuencas del Tajo pero no en las del Guadiana.

En conclusión, el análisis de regresión muestra una relación muy alta en todas las cuencas entre los caudales y los parámetros de relieve y la longitud del cauce principal. Para altos períodos de retorno la impermeabilidad de la cuenca y la precipitación tienen también una alta relación con el caudal. Pero la impermeabilidad es mucho más importante frente al caudal en las cuencas del Tajo, en cambio la precipita-

ción es más importante en las cuencas del Guadiana y más aún para altos períodos de retorno. En el Guadiana la relación de relieve aumenta también su relación con el caudal en altos períodos de retorno.

Además se observa un comportamiento diferente entre las pequeñas cuencas y las cuencas de mayor área. En las cuencas pequeñas los parámetros de relieve y pendiente del cauce y la permeabilidad tienen una relación mayor con el caudal que en las grandes cuencas. Por otra parte, en la validación de las funciones de regresión se ha comprobado que las cuencas de tamaño pequeño y mediano responden bien al modelo propuesto, mientras que no ocurre así con las grandes cuencas, lo que se explica como consecuencia de su mayor heterogeneidad y comportamiento más complejo.

## Conclusiones

Resumiendo, en todas las cuencas, tanto del Tajo como del Guadiana, se observan variaciones muy importantes de caudal entre cuencas de tamaño semejantes, en cambio las precipitaciones de estas cuencas son muy similares o varían en un rango muy estrecho, por lo tanto los parámetros físicos de las cuencas tienen una importancia muy grande en la generación de caudales, en especial los parámetros de relieve y la longitud del cauce en las cuencas del Tajo y los parámetros de relieve, forma y drenaje en las cuencas del Guadiana.



CUENCAS	Periodo retorno	Funciones de regresión múltiple
Todas las subcuencas	10	<b>Q 10 = 38,9935 + 1,95866*<i>Rr</i> + 0,501798*<i>Lc</i> + 3,39184*<i>Ip</i> - 1,32862*<i>Pb</i> 10</b>
	25	<b>Q 25 = 54,443 + 2,82288*<i>Rr</i> + 0,769445*<i>Lc</i> + 5,73674*<i>Ip</i> - 1,608*<i>Pb</i> 25</b>
	100	<b>Q 100 = -49,9146 + 4,69135*<i>Rr</i> + 1,29214*<i>Lc</i> + 10,2852*<i>Ip</i> - 1,61961*<i>Pb</i> 100</b>
	500	<b>Q 500 = -6,16521 + 8,02586*<i>Rr</i> + 2,05046*<i>Lc</i> + 19,7049*<i>Ip</i> - 1,23223*<i>Pb</i> 500</b>
Subcuencas Tajo	10	Q 10 = -22,9281 + 0,427215* <i>Rr</i> + 0,681472* <i>Lc</i> + 35,9646* <i>Ip</i> - 0,310101* <i>Pb</i> 10
	25	Q 25 = -26,5918 + 0,953484* <i>Rr</i> + 0,991898* <i>Lc</i> + 44,5662* <i>Ip</i> - 0,486371* <i>Pb</i> 25
	100	Q 100 = -42,3703 + 2,42635* <i>Rr</i> + 1,59228* <i>Lc</i> + 55,4832* <i>Ip</i> - 0,64056* <i>Pb</i> 100
	500	Q 500 = -81,4276 + 5,73445* <i>Rr</i> + 2,57157* <i>Lc</i> + 62,3864* <i>Ip</i> - 0,713819* <i>Pb</i> 500
Subcuencas Guadiana	10	Q 10 = -81,175 - 1,88017* <i>Rr</i> + 0,296854* <i>Lc</i> + 4,90701* <i>Ip</i> + 1,40384* <i>Pb</i> 10
	25	Q 25 = -183,24 - 4,11392* <i>Rr</i> + 0,339892* <i>Lc</i> + 8,92599* <i>Ip</i> + 2,76444* <i>Pb</i> 25
	100	Q 100 = -42,3966 + 3,47668* <i>Rr</i> + 0,757158* <i>Lc</i> + 6,71266* <i>Ip</i> - 0,113849* <i>Pb</i> 100
	500	Q 500 = -60,552 + 10,7675* <i>Rr</i> + 1,29732* <i>Lc</i> + 10,0404* <i>Ip</i> - 0,415629* <i>Pb</i> 500

**Tabla II.- Resultados del análisis de regresión múltiple, donde Q es el caudal máximo, Pb la precipitación máxima para los diferentes períodos de retorno (10, 25, 100 y 500 años), Rr la relación de relieve, Lc la longitud del cauce principal y Ip la impermeabilidad de la cuenca. En negrita aparece el modelo seleccionado.**

*Table II.- Results of the regression analysis, where Q represent maximum discharge, Pb maximum rainfall for different return periods (10,25,100 and 500 years), Rr relief relationship, Lc main stream length and Ip the basin imperviousity .Selected model is represented in bold.*

El análisis de regresión muestra una relación buena para el conjunto de todas las cuencas entre los caudales y la relación de relieve, la impermeabilidad y la longitud del cauce principal. Esta relación es mejor para altos períodos de retorno. Pero la impermeabilidad es mucho más relevante frente al caudal en las cuencas del Tajo, mientras que la precipitación es más importante en las cuencas del Guadiana, donde incluso llega a ser más representativa, en bajos períodos de retorno, que la relación de relieve.

Por último, en la validación de las funciones de regresión se ha comprobado que las cuencas de tamaño pequeño y mediano, tanto del Tajo como del Guadiana, responden bien al modelo propuesto, no ocurre así con las grandes cuencas, debido a su mayor heterogeneidad y comportamiento más complejo. El modelo de regresión confirma la importancia de la variación del relieve y las características del cauce frente a la generación de caudales, así como la influencia de las características litológicas y la precipitación, sobre todo para altos períodos de recurrencia.

Además se ha visto que las altas precipitaciones y la impermeabilidad de la cuenca contribuyen en el aumento de caudales, pero sobre todo en altos períodos de retorno. El área, que es un factor determinante a la hora de estimar caudales en la mayoría de métodos existentes, se ha comprobado aquí que tiene una menor relación con el caudal que otros parámetros, como los ya mencionados. Esta menor relación se observa sobre todo en las cuencas del Guadiana. Podemos concluir, por tanto, que el caudal de avenida de una cuenca, a la vista de todos estos análisis, puede esti-

marse en base a tres parámetros fundamentalmente: el relieve de la cuenca (que incluye información sobre otros parámetros también importantes como la amplitud de relieve de la cuenca y la longitud y pendiente del cauce principal), la impermeabilidad de la cuenca y la precipitación máxima.

Este modelo de caracterización de las cuencas hidrográficas es útil para definir el comportamiento a escala regional de las cuencas. La metodología aplicada a los análisis de regresión podría aplicarse para estudios más detallados de cuencas de menor tamaño y con escasez de datos de caudal aforado. La simplicidad del modelo y la facilidad de obtención de los parámetros que intervienen en el cálculo, son fundamentales a la hora de abordar estudios regionales, que requieren el manejo de un gran volumen de datos y amplias extensiones de cuenca, además se ha comprobado que los resultados que se obtienen son aceptables para cuencas de tamaño pequeño y medio de la zona.

La formulación más usada actualmente en este sentido, presenta restricciones de utilización, ya sea porque se deben aplicar a pequeñas cuencas, ya sea porque necesitan datos de partida de difícil cálculo. La mayoría de los métodos de estimación de caudales parten de la base de una relación fundamental entre el área y el caudal. La metodología que aquí se propone no establece una relación directa del caudal con el área, sino con otros parámetros morfológicos más representativos como el relieve o la pendiente del cauce principal.

De lo anteriormente expuesto podemos concluir que los modelos de regresión de parámetros de cuenca no son válidos en ge-

neral para generalizarlos a otras cuencas, ni siquiera entre cuencas cercanas como el Tajo y el Guadiana ya que como hemos visto pueden presentar comportamientos muy distintos (Potenciano, 2004). Pero sí serían válidos para aplicarlos individualmente, centrándonos en las características propias de cada cuenca. Lo que se puede, por ejemplo, pretender con ello es marcar una sistemática de método de trabajo, que consistiría en obtener los parámetros morfológicos y los datos de precipitación en cada cuenca a estudiar, y en base a estos datos, estimar la ecuación de regresión que mejor se ajuste al funcionamiento de la cuenca, para a partir de ahí predecir valores futuros de caudal. Puesto que no en todos los cauces se dispone de datos de caudal aforado para utilizar en la ecuación de regresión, en estos casos sí podríamos obtener esta ecuación utilizando los datos de cuencas cercanas geográficamente, siempre que las características hidrológicas, climáticas y morfológicas sean similares.

#### Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado dentro del marco de los proyectos BTE 2003-04572 y CGL2004-033049 de la MCYT

#### Referencias

- Díez Herrero, A. (2002). *Riesgos Naturales*. (F.J. Ayala-Carcedo y J. Olcina Cantos, coord.) 1ª edición. Ariel Ciencia. Ed. Ariel. Barcelona, 1512 p.
- Escalante, C. y Reyes, L. (1998). *Ingeniería Hidráulica en México*, XIII. 23-43
- Etxeberria, J. (1999). *Cuadernos de Estadística*, 4. La Muralla S.A./Hespérides, S.L., 155 p.
- Ferrer, J. (1992). *Monografías*, M26. Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX, MO-PMT), Madrid.
- Potenciano, A. (2004). *Las inundaciones históricas en el centro-sur de la Península Ibérica. Condicionantes geomorfológicos y climáticos*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense Madrid, 273 p. (inédita)
- Schumm, S.A. (1977). En: *Applied Fluvial Geomorphology. Applied Geomorphology*. (J.R. Hailis, Ed.) Elsevier Scientific Publishing Company. 119-156
- SQG-Sistemas Quinta Generación (1995). *Statgraphics plus. Series Temporales*, Magnustics, 142 p.
- Témez Peláez, J. R. (1978). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Servicio de publicaciones MOPU. Dirección General de Carreteras. Madrid, 1978
- WMO (1989). *World Meteorological Organization Operational Hydrology Report*, nº 33.