

IV Reunión de Geomorfología  
Grandal d'Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J., Eds.  
1996, Sociedad Española de Geomorfología  
O Castro (A Coruña)

## APLICACIÓN DE MODELOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN UN RÍO PERMANENTE CON GRANULOMETRÍA DISPERSA

Batalla, R.J.<sup>1</sup> y Sala, M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida,  
25198 Lleida

<sup>2</sup> Departament de Geografia Física, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona

### RESUMEN

Este trabajo analiza el funcionamiento de diversos modelos de transporte de sedimento en un río permanente con lecho de arena y gravas (Arbúcies, Cordilleras Costero Catalanas). El grado de correlación entre las predicciones de los modelos y las tasas de transporte de sedimento obtenidas en el campo varía considerablemente. El mejor ajuste lo presentan las ecuaciones de ACKERS & WHITE (1973) y ENGELUND & HANSEN (1967), reflejo de su diseño original para ríos de granulometría dispersa y movimiento de dunas en el lecho respectivamente. Los modelos desarrollados por Brownlie (1981) y van Rijn (1984) muestran un funcionamiento más deficiente, a causa del desajuste entre los datos de campo y algunas condiciones de aplicación de los modelos. La discrepancia entre valores estimados y observados pone de relieve la complejidad de los procesos hidráulicos y sedimentológicos en ríos permanentes, relacionados tanto con la migración de formas durante caudales bajos como con la destrucción durante crecidas de sectores del lecho con acorazamiento de gravas.

**Palabras clave:** carga de sedimento fluvial, modelos de transporte, granulometría dispersa

### ABSTRACT

Bed-material load sampled under a wide range of hydraulic conditions in a perennial and poorly sorted sandy gravel-bed river (Arbúcies, Catalan Coastal Ranges), is used to test the performance of four well-know bed-material formulae. The degree of agreement between observed and predicted values varies greatly. The best agreement with measured values was obtained using the ACKERS and WHITE (1973) and ENGELUND & HANSEN (1967) models, a reflection of its original design for poorly sorted sediment and streambed formed into dunes. Contrastingly, the wide range of hydraulic conditions from which the data was obtained and the poor sorting of the bed sediment affected the performance of the van Rijn (1984) and Brownlie (1981) equations and, thus, deserves further study.

**Keywords:** bed-material discharge, sediment transport formulae, poorly-sorted

size distribution

## INTRODUCCIÓN

La carga total de sedimento en un canal fluvial es el resultado del movimiento de partículas individuales transportadas por el flujo de agua. El caudal es el factor primario que controla el arranque y transporte de material del lecho, el cual se realiza generalmente de forma episódica (CHURCH *et al.*, 1987). La tasa de transporte de material fluvial se define como la cantidad de sedimento originario del lecho del río que circula a través de una sección determinada, ya sea como carga de fondo, en suspensión, o de forma combinada. Son diversos los estudios de campo realizados con el objetivo de determinar la carga de sedimento fluvial (e.g. COLBY & HEMBREE 1955, MCPHERSON 1971, ANDREWS 1981, REID & LARONNE 1995). No obstante, mediciones simultáneas de los dos componentes de la carga sólida todavía no se llevan a cabo de manera habitual, ni tan sólo durante caudales bajos y flujo de agua constante, debido sobre todo a las dificultades técnicas que este proceso plantea. Para la obtención de datos de transporte de sedimento en el campo han sido desarrollados numerosos instrumentos de muestreo y medición, aunque ninguno de ellos incluye de manera completa el amplio rango de condiciones hidráulicas y cargas de material sólido que tienen lugar en condiciones naturales (HUBBELL, 1987).

Con el fin de superar las dificultades que presenta el control directo de la carga total de sedimento fluvial, se utilizan ecuaciones diseñadas para la predicción de caudales sólidos en un amplio espectro de calibres de sedimento y condiciones hidráulicas de flujo. La mayoría de los modelos han sido derivados de trabajos experimentales en canales de ensayos bajo condiciones de flujo uniformes, en lugar de observaciones de flujo y transporte en condiciones naturales (GOMEZ & CHURCH, 1989), y sobre la base de relaciones específicas entre variables hidráulicas del flujo de agua, condiciones sedimentológicas del lecho y tasas de transporte de material. Los trabajos de calibración realizados hasta el momento (e.g. WHITE *et al.* 1975, ANDREWS 1981, GOMEZ & CHURCH 1989) indican la necesidad de más estudios que analicen el ajuste de datos de campo de carga de sedimento con valores calculados utilizando ecuaciones de transporte fluvial. Todavía es poco conocida, por ejemplo, la fiabilidad de muchas de esas ecuaciones en ríos con una distribución granulométrica del material del lecho poco uniforme. Este trabajo analiza el funcionamiento de varios modelos de transporte de sedimento, comparando sus predicciones con los datos obtenidos bajo distintas situaciones hidráulicas en un río permanente con lecho de arena y gravas.

## ÁREA DE ESTUDIO

El sector fluvial objeto de estudio está situado en la Riera de Arbúcies, un curso de cuarto orden afluente del río Tordera y que drena la vertiente nororiental del macizo granítico del Montseny (Cordilleras Costero Catalanas). En la sección de control la cuenca tiene una superficie de 106 km<sup>2</sup>. La precipitación media anual es de 947 mm y el caudal medio es 1,1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Las crecidas de cauce lleno o *bankfull* (4 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) se producen con una frecuencia media

de seis veces por año. Del comportamiento hidrológico de la cuenca durante el periodo de estudio (figura 1) destaca la crecida iniciada el día 1 de Diciembre de 1991, que alcanzó un caudal máximo instantáneo de  $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (periodo de recurrencia de 2,5 años) a partir de una precipitación de 205 mm en 72 horas.

El lecho del río se compone principalmente de material arenoso y gravas finas, con un tamaño medio de 2,2 mm y un índice de dispersión de 7 (a partir de  $\sigma_g = [(d_{84}/d_{50}) + (d_{50}/d_{16})] / 2$ , donde  $\sigma_g$  es el índice de clasificación del material y  $d_{16}$  y  $d_{84}$  son percentiles correspondientes a las fracciones de sedimento de la distribución (0,4 y 22 mm, respectivamente). El lecho está parcialmente acorazado durante caudales bajos; el acorazamiento se rompe durante caudales de cauce lleno, liberando grandes cantidades de sedimento con el consiguiente incremento de las tasas de transporte y del calibre del material (BATALLA & SALA, 1995). La pendiente del lecho del río en el sector de estudio es 0,0095.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### DATOS DE CAMPO

Las mediciones de flujo y el control de la carga de sedimento se realizaron en la Riera de Arbúcies semanalmente y durante crecidas, aguas arriba de su confluencia con el río Tordera. Las muestras de caudal sólido se tomaron bajo un amplio rango de condiciones hidráulicas, cubriendo el 98% del total de caudales del río. Para el muestreo de la carga de fondo se utilizó un muestreador portátil Helley-Smith con abertura de 76 mm. Las setenta muestras de carga de fondo se obtuvieron de manera integrada en intervalos de un metro en la sección fluvial; el tiempo de muestreo oscilaba entre cinco y diez minutos. La eficiencia de captura del muestreador se asume del 100% para partículas entre 0,5 y 16 mm, independientemente de los cambios en las tasas de transporte, mientras que para calibres superiores la tasa de captura se sitúa por debajo del 70% (EMMETT, 1979). Durante el muestreo en caudales bajos el lecho estaba formado por dunas.

El control de la carga de sedimento en suspensión se realizó mediante un muestreador de integración en profundidad US DH48. Durante el periodo de estudio se obtuvieron doscientas treinta muestras de 0,5 litros cada una. Para ello se bajaba el muestreador de forma manual hasta aproximadamente 10 cm del lecho del río, intentando evitar el contacto con su superficie. La concentración de sedimento en suspensión se obtuvo después de filtrar la muestra a través de una membrana de celulosa con porosidad de  $0,45 \mu\text{m}$ . La tasa de unitaria de transporte de sedimento en suspensión se ha calculado como el producto de la concentración por el caudal dividido por la anchura de la sección fluvial.

El material procedente del lavado de vertientes no se ha incluido en el cómputo de la tasa de transporte de material fluvial ya que su concentración en un momento o caudal determinado depende del suministro puntual al canal desde las vertientes y en menor medida de condiciones hidráulicas de flujo determinadas (ANDREWS, 1981); además, el peso específico de estos aportes en el balance de sedimento de la cuenca es reducido ( $0,75 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ) comparado con el material que proviene del lecho del río ( $16 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ). En este estudio se

considera solamente la carga de material procedente del canal fluvial.

### MODELOS SELECCIONADOS

Son diversos los trabajos que han examinado la discrepancia entre datos de transporte de sedimento fluvial obtenidos en el campo o en canales de ensayos y valores de carga de sedimento calculados a partir de ecuaciones (e.g. WHITE *et al.* 1975, ANDREWS 1981, GOMEZ & CHURCH 1989). En este estudio, los datos de campo obtenidos en la Riera de Arbúcies se comparan con cuatro ecuaciones de carga total de sedimento fluvial desarrolladas por ENGELUND & HANSEN (1967), ACKERS & WHITE (1973), BROWNLIE (1981), y VAN RIJN (1984). Las características de estos modelos se pueden encontrar en diferentes publicaciones (e.g. DYER, 1986); las principales se resumen a continuación:

a) Engelund & Hansen diseñaron una ecuación para la predicción de transporte de sedimento cuando el canal fluvial está formado por dunas; su aplicación incluye desde materiales con calibre arenoso hasta gravas gruesas, aunque no se recomienda su uso en lechos con una distribución granulométrica muy dispersa

b) Ackers & White desarrollaron una fórmula del tipo de 'fuerzas de tracción' para material desde 0,04 hasta 4,94 mm; se basa en la combinación adimensional de tres grupos de parámetros: calibre del material, movilidad y tasas de transporte. Sus posibilidades de aplicación se limitan a situaciones hidráulicas en las que el lecho está formado por dunas

c) la ecuación de Brownlie es un modelo de transporte de sedimento desarrollado sólo para material arenoso, con un calibre medio entre 0,063 y 2,0 mm y coeficientes de dispersión inferiores a 5

d) van Rijn desarrolló una fórmula de transporte que permite el cálculo de la carga de sedimento en suspensión y de fondo a partir de la altura de salto y la velocidad de las partículas y la concentración de carga fondo. Esta función fue desarrollada para partículas entre 0,2 y 2,0 mm

## RESULTADOS

### CARGA DE SEDIMENTO FLUVIAL

La tasa media de carga de fondo es de 38 gr m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> (peso sumergido), oscilando entre 1 gr m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> en caudales bajos hasta 280 gr m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> durante caudales de cauce lleno. La variabilidad temporal media de la carga de fondo durante crecidas cercanas al caudal de cauce lleno en intervalos de muestreo de diez minutos llega al 80%; la máxima variabilidad se obtuvo durante la

Caudal	Calado	Velocidad	Carga de fondo	Sedimento en suspensión	Transporte fluvial total <sup>1</sup>	Concentr. total
[m <sup>3</sup> /s]	[m]	[m/s]	[g/ms]	[gr/ms]	[gr/ms]	[gr/m <sup>3</sup> ]
0,58	0,19	0,55	2	3	5	43
3,90	0,48	0,77	349	354	703	1262
3,82	0,47	0,77	260	335	595	1090

2,20	0,34	0,67	37	90	127	346
1,17	0,22	0,59	13	20	33	141
1,58	0,27	0,63	53	45	98	308
1,17	0,22	0,59	15	20	35	150
1,58	0,27	0,63	19	45	64	202
1,20	0,22	0,59	5	20	25	107
1,06	0,21	0,56	3	15	18	86
1,05	0,26	0,70	12	15	27	127
1,05	0,26	0,70	3	15	18	84
1,43	0,33	0,72	8	34	41	145
1,05	0,26	0,70	8	15	23	110
0,87	0,22	0,69	4	10	14	72
0,66	0,20	0,60	2	5	6	43
0,57	0,18	0,58	1	3	5	36
1,06	0,26	0,71	7	15	22	106
0,67	0,21	0,58	8	5	13	88
1,88	0,39	0,74	21	70	91	242
1,28	0,31	0,69	9	26	35	135
1,19	0,32	0,62	34	21	55	230
0,69	0,34	0,37	36	5	42	272
1,67	0,51	0,50	96	52	148	443
1,26	0,46	0,46	32	24	57	224
0,82	0,20	0,82	48	9	57	311
0,48	0,31	0,31	11	2	13	109
0,41	0,25	0,41	9	2	11	106
0,46	0,31	0,30	13	2	15	129
0,53	0,29	0,41	25	3	27	231
0,41	0,23	0,45	2	2	4	36
0,46	0,20	0,58	10	2	12	106
0,89	0,35	0,57	29	11	40	202
0,63	0,31	0,51	15	4	19	136
0,48	0,30	0,40	26	2	28	237
0,46	0,22	0,52	1	2	3	29
0,48	0,26	0,46	13	2	16	129
3,72	0,47	0,95	53	312	365	687
1,58	0,36	0,80	16	44	61	191
2,85	0,62 <sup>2</sup>	0,66	16	179	195	411

<sup>1</sup> Tasas de transporte de sedimento en peso sumergido

<sup>2</sup> Debido a dificultades técnicas, el caudal se aforó aguas arriba de la sección de control habitual

Tabla 1. Transporte de sedimento fluvial y variables hidráulicas asociadas en la cuenca de Arbúcies (1991-1992)

junio de 1992 y fue superior al 500% (desde  $10 \text{ gr m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  a  $64 \text{ gr m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ), también en un intervalo de diez minutos. El tamaño medio de la carga de fondo es de 2 mm para caudales bajos hasta el nivel de cauce lleno; durante crecidas *bankfull* el calibre medio muestreado llega a los 40 mm (BATALLA & SALA, 1995). La concentración media de sedimento en suspensión es de  $191 \text{ mg l}^{-1}$  con un coeficiente de variación de 155%. La concentración varía entre  $1 \text{ mg l}^{-1}$  en caudales bajos hasta  $2670 \text{ mg l}^{-1}$  durante crecidas. La relación entre caudal y concentración de sedimento en suspensión ( $Q_s = 0,0004 Q^{1,63}$ , donde  $Q_s$  es la concentración de sedimento y  $Q$  el caudal) presenta una correlación estadística elevada ( $r^2 = 0,70$ ), (BATALLA & SALA, 1994). Los valores obtenidos a partir de esta relación se sumaron, una vez corregida la desviación estadística producida durante su transformación logarítmica (FERGUSON, 1986), a las tasas de carga de fondo para obtener la carga total de sedimento fluvial (Tabla 1).

#### AJUSTE ENTRE TASAS DE TRANSPORTE OBSERVADAS Y TASAS CALCULADAS

La comparación entre valores de transporte observados en el campo y los calculados mediante las cuatro fórmulas seleccionadas se muestra en la figura 2. El porcentaje de valores de carga sólida total calculados que se sitúa en un rango de 0,5 a 2 veces los valores observados en el campo es para cada uno de los modelos: Ackers & White 68%, Engelund & Hansen 65%, Brownlie 38%, y van Rijn 25%.

Las predicciones obtenidas a partir de las ecuaciones de Ackers & White y de Engelund & Hansen muestran un ajuste excelente con los valores observados en el campo, sobre todo para tasas de transporte de sedimento entre  $10$  y  $100 \text{ gr m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (con un 86% de los valores estimados situados entre 0,5 y 2 veces los valores observados); el grado de ajuste es similar al obtenido por WHITE *et al.* (1975) y ANDREWS (1981). La bondad de las predicciones a partir de Engelund & Hansen parece no estar influida por la clasificación del material del lecho de Arbúcies. Es importante señalar que esta ecuación fue desarrollada para el cálculo con formas migratorias en canales aluviales y, quizá, el cumplimiento pleno de esta condición contrarresta parcialmente el efecto de la dispersión del material en el cauce. Ambas ecuaciones pierden fiabilidad en fases de mayor transporte durante caudales de cauce lleno asociadas, presumiblemente, a la destrucción del acorazamiento del lecho y al consiguiente cambio de magnitud en las tasas de transporte de material.

Los modelos de Brownlie y van Rijn muestran, por el contrario, un funcionamiento general deficiente. Estas dos fórmulas tienden a predecir valores de transporte de sedimento más altos que los obtenidos en el campo; además, cuanto menor es la tasa de transporte de sedimento, más débil es la correlación entre tasas observadas y calculadas. Este hecho se puede explicar, presumiblemente, como la consecuencia de la falta de ajuste entre la distribución granulométrica del material del lecho del río y algunas de las condiciones recomendadas para la aplicación de estas fórmulas. La fórmula de Brownlie, por ejemplo, fue desarrollada para: a) material arenoso con un calibre medio inferior a 2 mm, b) un índice de dispersión ( $\sigma_g$ ) inferior a 5 y, c) una relación entre calado y tamaño medio del material inferior a 100. Las

primeras dos limitaciones de la ecuación no se ajustan al tipo de material del lecho de la Riera de Arbúcies, aunque éste no difiere demasiado de las condiciones originales de aplicación. El uso de la fórmula de Brownlie en este río está restringido, además, a un calado inferior a 0,20 m, ya que la relación entre éste y el calibre medio del material es superior a 100. A pesar de estas limitaciones, la fórmula de Brownlie funciona aceptablemente para la predicción de la carga total en caudales altos, con un ajuste entre valores observados y calculados del 65% para tasas superiores a  $100 \text{ gr m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Por otra parte, la limitación que van Rijn introduce para el cálculo del número de suspensión,  $\{0,01 < \omega / u_* < 1,0\}$  donde  $\omega$  es la velocidad de sedimentación de las partículas ( $\text{m}^*\text{s}^{-1}$ ) y  $u_*$  es la velocidad de corte del flujo ( $\text{m}^*\text{s}^{-1}$ ), tampoco se ajusta a las condiciones de la Riera de Arbúcies para calados inferiores a 0,23 m.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La aplicación de fórmulas para la predicción de transporte fluvial de sedimento se limita generalmente al rango de condiciones hidráulicas y características del sedimento para las cuales esas funciones fueron desarrolladas (ANDREWS, 1981). El amplio rango de condiciones hidráulicas bajo las cuales fueron obtenidos los datos en la Riera de Arbúcies y la dispersión granulométrica del material del lecho del río afectan negativamente el funcionamiento de los modelos de VAN RIJN (1984) y BROWNLIE (1981). Discrepancias similares entre condiciones de aplicación y datos de campo no muestran, sin embargo, ninguna influencia en el ajuste de los valores calculados mediante la ecuación de ENGELUND & HANSEN (1967). El modelo de ACKERS & WHITE (1973) muestra el mejor ajuste con los valores observados en el campo, reflejo de su diseño original para lechos con materiales de granulometría muy dispersa; no obstante, el grado de correlación disminuye y la desviación se incrementa para caudales bajos con tasas de carga sólida total inferior a  $10 \text{ gr m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Ésto podría ser debido a la influencia de las gravas en el retraso del inicio de movimiento de partículas más finas en sectores del río aguas arriba de la sección de control.

De manera similar, WHITE *et al.* (1975) analizaron ocho ecuaciones de transporte de sedimento ampliamente utilizadas. En sólo tres de esas ecuaciones (ROTTNER 1959, ENGELUND & HANSEN 1967, y ACKERS & WHITE 1973) más del 50% de las predicciones se situaban en el rango de 0,5 a 2 veces los valores de transporte de sedimento en el campo. ANDREWS (1981) examinó también distintas ecuaciones de transporte de sedimento; el porcentaje de valores de carga sólida calculados que se situaban en un rango comprendido entre 0,5 y 2 veces los valores observados en el campo era del 79% para Engelund & Hansen, 60% para YANG (1973), 71% para SHEN & HUNG (1972), y 66% para Ackers & White. GOMEZ & CHURCH (1989) comprobaron asimismo el funcionamiento de doce ecuaciones de transporte de sedimento desarrollados para uso en ríos de gravas. Estos autores concluyeron que ninguna de las fórmulas analizadas era capaz de predecir de una manera global y generalizada las tasas de transporte en este tipo de ríos. A pesar de ello, su estudio pone de manifiesto que para la estimación de ordenes de magnitud de transporte de fondo sobre la base de información hidráulica limitada, algunas

de los modelos analizados presentan un funcionamiento aceptable, especialmente los que utilizan como parámetro hidráulico básico la energía del flujo (*stream power*). Estos estudios sugieren que el uso de modelos de transporte de sedimento que ofrezcan estimaciones aceptables de las tasas reales es preferible a las mediciones en el campo, teniendo en cuenta la incertidumbre de los datos obtenidos junto con el gasto de tiempo y dinero de estas últimas. En este sentido los datos sobre flujo de sedimento obtenidos en la Riera de Arbúcies muestran que algunas fórmulas son capaces de predecir el transporte total de material fluvial en ríos permanentes y granulometría dispersa de manera razonable; el porcentaje de valores calculados que se sitúa en un rango de 0,5 a 2 veces los datos observados de campo alcanza el 65% para algunas de las ecuaciones analizadas. La discrepancia entre valores estimados y observados refleja la complejidad hidráulica y sedimentológica de lechos en ríos permanentes con granulometría dispersa, y podría estar relacionado tanto con las variaciones en el transporte de sedimento asociadas al movimiento de dunas en el canal en caudales bajos (GOMEZ *et al.*, 1989) como con procesos de destrucción de áreas del lecho con acorazamiento de gravas durante caudales de crecida *bankfull* (GOMEZ & CHURCH, 1989).

La mayoría de los modelos disponibles consideran el transporte de sedimento como un proceso constante y unidimensional, sobretodo porque fueron desarrollados a partir de experimentos en canales de ensayos bajo condiciones hidráulicas constantes y con sedimento uniforme. La variabilidad espacial y temporal del transporte de sedimento es, por el contrario, una característica de los procesos de transporte fluviales, ya que el transporte en equilibrio raramente se produce en ríos naturales. Para mejorar el funcionamiento de los modelos existentes es necesario profundizar en el estudio de las causas que controlan la variabilidad de la carga de sedimento a la luz de los procesos que intervienen en su control, especialmente aportación y disponibilidad de material, morfología y sedimentología del cauce, y condiciones hidráulicas del flujo, a partir de datos de campo obtenidos con una alta resolución temporal y espacial y bajo condiciones hidráulicas cambiantes. Para ello sería interesante, por ejemplo, que prototipos ya disponibles para el control continuo de la transferencia de sedimento en canales fluviales sean perfeccionados con el objetivo de ampliar sus posibilidades de aplicación; esta necesidad es incluso más urgente en el caso de ríos permanentes de arenas y gravas, en los que el espectro de tasas y modos de transporte ocurre de manera muy amplia casi bajo cualquier condición hidráulica de flujo.

#### AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo se realizó durante una estancia que el primer autor realizó en la Universidad de British Columbia, como becario FPI del Ministerio de Educación y Ciencia. Agradecemos los comentarios de Michael Church y Marwan Hassan al primer borrador de este texto y el apoyo técnico de Peter Ergenzinger en la realización del trabajo de campo. Los datos hidrológicos fueron suministrados por la Junta d'Aigües, Generalitat de Catalunya.

#### BIBLIOGRAFÍA

- ACKERS, P. & WHITE, W.R. (1973). Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 99, 2041-2060.
- ANDREWS, E.D. (1981). Measurement and computation of bed material discharge in a shallow sand- bed stream, Muddy Creek, Wyoming. *Water Resources Research*, 17, 131-141.
- BATALLA, R. & SALA, M. (1994). Temporal variability of the suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river. *International Symposium on Variability in Stream Erosion and Sediment Transport*, IAHS Publ. 224, 299-305, Canberra.
- BATALLA, R. & SALA, M. (1995). Effective discharge for bedload transport in a subhumid Mediterranean sandy-gravel bed river (Arbúcies, NE Spain). En: Hickin, E.J. (Ed.): *River Geomorphology*. John Wiley & Sons, 93-103, Chichester.
- BRONWLLIE, W.R. (1981). Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels. *Report KH-R-43A*, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena.
- COLBY, B.R. & HEMBREE, C.H. (1955). Computations of total sediment discharge; Niobrara River near Cody, Nebraska. *U.S. Geological Survey Water Supply Paper*, 1357, 187 p.
- CHURCH, M.A., MCLEAN, D.G. & WOLCOTT, J. F. (1987). River-bed gravels: Sampling and analysis. En: Thorne, C.R., Bathurst, J.C. & Hey, R.D. (Eds.): *Sediment transport in gravel bed rivers*, 269-325.
- DYER, K. (1986): *Coastal and estuarine sediment dynamics*. Chichester, John Wiley & Sons, 356 p.
- EMMETT, W.W. (1979). A field calibration of the sediment trapping characteristics of the Helley- Smith bedload sampler. *US Geological Survey Open File Report*, 79-411.
- ENGELUND, F. & HANSEN, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. *Teknisk Vorlag, Technical University of Copenhagen*, 63 p.
- FERGUSON, R.I. (1986). River loads underestimated by rating curves. *Water Resources Research*, 22, 1, 74-76.
- GOMEZ, B. & CHURCH, M. (1989). An assessment of bedload sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Research*, 25, 6, 1161-1186.
- GOMEZ, B., NAFF, R.L. & HUBBELL, D.W. (1989). Temporal variations in bedload transport rates associated with the migration of bedforms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14, 135-156.
- HUBBELL, D.W. (1987). Bedload sampling and analysis. En: Thorne, C.R., Bathurst, J.C. & Hey, R.D. (Eds.): *Sediment transport in gravel-bed rivers*. John Wiley & Sons, 89-120, Chichester.
- MCPHERSON, H.J. (1971). Dissolved, suspended and bedload movement patterns in Two O'clock Creek, Rocky Mountains, Canada, Summer, 1969. *Journal of Hydrology*, 12, 221-233.
- REID, I. & LARONNE, J.B. (1995): Bedload sediment transport in an ephemeral stream and comparison with seasonal and perennial counterparts. *Water Resources Research*, 31, 773-781.
- ROTTNER, J. (1959). A formula for bedload transportation. *Houille Blanche* 4, 301-304.
- SHEN, H.W. & HUNG, C.S. (1972). An engineering approach to total bed-material load by regression analysis. En: Shen, H.W. (Ed.): *Sedimentation (Einstein Symposium)*, 14-17.
- VAN RIJN, L.C. (1984). Sediment transport, Part I: Bedload transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 10, 1431-1456.
- VAN RIJN, L.C. (1984). Sediment transport, Part II: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 11, 1613-1641.
- WHITE, W.R., MILLI, W.R. & CRABBE, A.D. (1975). Sediment transport theories: a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 59, 2, 265-292.
- YANG, C.T. (1973). Incipient motion and sediment transport. *Journal of Hydraulic*

*Engineering*, 99, 10, 1670-1704.

### **Pies de figura**

Figura 1. Precipitación y escorrentía superficial diaria en la cuenca de Arbúcies durante el periodo de estudio (Octubre 1991 - Diciembre 1992)

Figura 2. Ajuste entre las tasas de transporte de sedimento observadas en la Riera de Arbúcies (O), y las estimadas (E) utilizando las ecuaciones de: i) Ackers & White (1973), ii) Engelund & Hansen (1967), iii) Brownlie (1981), y iv) van Rijn (1984)



