



VARIACIONES TEMPORALES Y ESPACIALES EN LA GRANULOMETRÍA DEL TRAMO BAJO DEL EBRO

Temporal and spatial variations of bed material in the lower Ebro River

Damià Vericat^(1,2), Celso Garcia⁽³⁾, Ramon J. Batalla^(1,2)

(1) *Departamento de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Universitat de Lleida. Avda. Alcalde Rovira Roure 177, E-25198 Lleida, España - E-mail: dvericat@macs.udl.es, rbatalla@macs.udl.es*

(2) *Centre Tecnològic Forestal de Catalunya*

Pujada del Seminari s/n. E-25280, Solsona, España

(3) *Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Ctra. Valdemossa, km. 7,5, E-07122 Palma de Mallorca, España - E-mail: celso.garcia@uib.es*

Resumen: Este trabajo analiza la variación espacial y temporal en la granulometría de los sedimentos del tramo bajo del Ebro. El muestreo granulométrico se realizó en 8 barras aguas abajo del embalse de Flix durante caudales bajos en los veranos de 2002, de 2003 y de 2004. Los resultados muestran que el material superficial es de mayor tamaño ($D_{50-s} = 34-43$ mm) y está mejor clasificado que el subsuperficial ($D_{50-ss} = 16-18$ mm). La granulometría varía sustancialmente a lo largo del período de estudio, fenómeno que se atribuye a la alta actividad sedimentaria del lecho del río y al papel de las crecidas en la movilización del material y su transporte aguas abajo. El río muestra diferentes grados de acorazamiento a lo largo del tramo, observándose los mayores valores aguas abajo de la presa de Flix y de la confluencia con el río Siurana. El grado de acorazamiento varía año tras año (2,3 en el 2002, 1,9 en el 2003 y 2,3 en el 2004) y lo hace en función de la magnitud de las crecidas. Los resultados indican que el acorazamiento es un proceso hidrosedimentario fundamental activo en sistemas fluviales regulados incluso décadas después del cierre de las presas.

Palabras clave: distribución granulométrica, río de gravas, coraza superficial, presas, río Ebro.

Abstract: This paper reports on the temporal and spatial variations of the riverbed grain-size distribution and armouring at-a-section and downstream in the strongly regulated lower Ebro River. Fieldwork was performed in 8 bars downstream from the Flix Dam between summer 2002 and summer 2004. River-bed grain-size distributions observed indicated that surface material was coarser ($D_{50-s} = 34-43$ mm) and better sorted than subsurface sediments ($D_{50-ss} = 16-18$ mm). The grain-size distribution varies considerably between years of sampling and sections. This fact can be primarily attributed to the high sedimentary activity within the Ebro riverchannel and to the role of floods remobilizing and transporting riverbed particles to downstream reaches. Armouring has been observed in several sections of the river, being the highest values located immediately downstream from the Flix Dam and the confluence with the Siurana River. The degree of armouring varies in time (mean values of 2.3 in 2002, 1.9 in 2003 and 2.3 in 2004) a phenomenon that can be directly related to the magnitude of the floods. Observations indicate that armouring is a fundamental hydrosedimentary processes in regulated rivers that remains active even decades after dams closure.

Key words: grain-size distribution, gravel-bed river, armour layer, bedload transport, dams, Ebro River.



Damià Vericat, Celso Garcia y Ramon J. Batalla (2006). Variaciones temporales y espaciales en la granulometría del tramo bajo del Ebro. *Rev. C. & G.*, 20 (1-2), 47-60.

1.-Introducción

La disponibilidad de sedimentos en cauces aluviales naturales puede ser considerada, a largo plazo, en casi-equilibrio con la capacidad de transporte del río (Schumm, 1977; Kondolf, 1994; Topping *et al.*, 2000). La regulación de los ríos a través de la construcción de presas altera el régimen fluvial y, consecuentemente, modifica el patrón de la disponibilidad de sedimentos aguas abajo. Petts (1980) definió tres factores principales que determinan la respuesta del lecho fluvial aguas abajo de los embalses: a) la frecuencia de caudales competentes para movilizar el material, b) la disponibilidad de sedimentos, y c) el grado de colonización de la vegetación de ribera. La interacción entre la regulación del caudal y la disponibilidad de sedimentos controla los cambios en el cauce, cuya magnitud varía a lo largo del tiempo (Sear, 1992; Brandt, 2000). Por ejemplo, aguas abajo del embalse de Danjiangkou, en el río Hanjiang, China, se han identificado dos tipos de alteraciones desde que el embalse fue construido (Xu, 1996). Durante los primeros siete años, la operatividad del embalse se centró en la regulación de avenidas y tan solo atrapó una pequeña parte de los sedimentos transportados. El lecho del río aguas abajo de la presa sufrió tasas de erosión bajas y el tamaño del material superficial del lecho aumentó poco. Posteriormente, se cambió de objetivo la presa y el almacenamiento de agua pasó a ser su propósito principal. El 95% de los sedimentos transportados desde aguas arriba quedó retenido en el embalse. Después de tres años, la tasa de erosión del lecho aumentó tres veces y progresivamente el tamaño del material superficial se fue incrementando (i.e., el valor medio de la distribución superficial aumentó de 0,5 a 50 mm).

La incisión del lecho del río es el principal proceso que ocurre cuando las presas liberan caudales con competencia para transportar sedimentos y aguas abajo la disponibilidad de material es mínima (Leopold *et al.*, 1964). La magnitud de la incisión depende de la interacción entre el caudal liberado por la presa y su capacidad para transportar sedimentos (Gomez, 1983; Kondolf, 1997). El acorazamiento del lecho de un río ha sido descrito como el principal proceso resultante cuando la competencia media del caudal es menor que la crítica para el transporte de las partículas de mayor

tamaño, pero suficiente para la movilización de las fracciones granulométricas finas superficiales (Parker y Klingeman, 1982; Parker y Sutherland, 1990; Gomez, 1994). Consecuentemente, el material superficial del lecho aumenta progresivamente de tamaño y se desarrolla una coraza en su superficie. De esta forma, el grado de acorazamiento estará controlado por la magnitud del caudal y por el material que compone el lecho, cuya interacción permitirá la formación de corazas móviles o estables. Diversos autores han identificado las condiciones más relevantes para el desarrollo de la coraza granulométrica superficial. Entre ellas cabe destacar la composición granulométrica previa al desarrollo del proceso y las características del caudal responsable de la formación (Gessler, 1965; Little y Mayer, 1976). De manera general, el acorazamiento se ha descrito como un proceso consecuencia de: a) *winnowing* (aguas abajo y en vertical) o transporte selectivo del material más fino (Gessler, 1971; Sutherland, 1987), b) la movilidad equitativa (Parker y Klingeman, 1982; Andrews y Parker 1987), y c) el transporte de partículas gruesas en forma de capas (Iseya y Ikeda, 1987; Whiting *et al.*, 1988; Dunkerley, 1990). El transporte selectivo del material fino aguas abajo se ha descrito como el principal proceso formador como respuesta a corto plazo a una escasa disponibilidad de sedimentos (Andrews y Parker, 1987; Dietrich *et al.*, 1989), un fenómeno que es especialmente activo y relevante aguas abajo de presas (e.g., Davies *et al.*, 1990). En el Río Colorado aguas abajo de la presa de Glen Canyon, Arizona, la reducción de la transferencia de sedimentos conjuntamente con la frecuencia y magnitud de las avenidas han sido las principales causas de dicho acorazamiento (Colby, 1964; Burkham, 1986; Topping *et al.*, 2000). Las superficies acorazadas presentan un mayor tamaño y están mejor clasificadas que el material subyacente, y su estabilidad está básicamente controlada por la magnitud de las crecidas. Son estables en todos los regímenes de caudales inferiores al formativo, y pueden ser alteradas solamente por crecidas de alta magnitud (Gomez, 1983). El acorazamiento reduce la disponibilidad de sedimentos y, en consecuencia, determina las tasas de transporte de carga de fondo y su granulometría. A medida que aumenta el grado de acorazamiento la capacidad de transporte disminuye (Sear, 1992), la disposición de las partículas en la superficie incrementa la tensión reque-

rida para su movilización y se reduce la erosión (e.g., Hammad, 1972; Xu, 1996). Además, el acorazamiento ha sido estudiado como un proceso que genera alteraciones ecológicas. Por ejemplo, Milhous (1982) demostró que el acorazamiento de las principales zonas de freza en el río Sacramento, California, fue la causa de la reducción en un 60% de la población de peces. De manera general, el acorazamiento aparece en zonas próximas a las presas y disminuye aguas abajo (e.g., Fassnacht *et al.*, 2003). Dicho proceso migra aguas abajo a medida que la disponibilidad de sedimentos se ve limitada y la frecuencia de caudales competentes aumenta (Williams y Wolman, 1984).

El tramo bajo del río Ebro aguas abajo del complejo de embalses Mequinenza, Riba-roja y Flix, uno de los más grandes de la Península Ibérica, ha experimentado alteraciones hidrológicas, morfológicas, y ecológicas importantes. Éstas incluyen: a) reducción de la magnitud de las avenidas (Batalla *et al.*, 2004), b) déficit de sedimentos e incisión del lecho (Vericat y Batalla, 2004, 2005) y, c) proliferación de vegetación acuática (Palau *et al.*, 2004). La disponibilidad de sedimentos aguas abajo de la

presa de Flix es también inexistente debido a que el principal tributario, el río Siurana está regulado por tres embalses y sufre importantes extracciones de áridos desde los años 80. En este contexto, el cauce del tramo bajo del río Ebro proporciona un canal experimental natural para analizar los ajustes morfológicos, granulométricos y de transporte de sedimentos en ríos de gravas de grandes sistemas fluviales regulados. En concreto, este artículo describe las variaciones espaciales y temporales de la distribución granulométrica del lecho del río y del acorazamiento durante el periodo hidrológico 2002-2004.

2. Área de estudio

2.1. La cuenca del Ebro

El río Ebro drena un área de aproximadamente 85.530 km² del nordeste de la Península Ibérica (Figura 1). La precipitación anual varía considerablemente en la cuenca, con valores superiores a

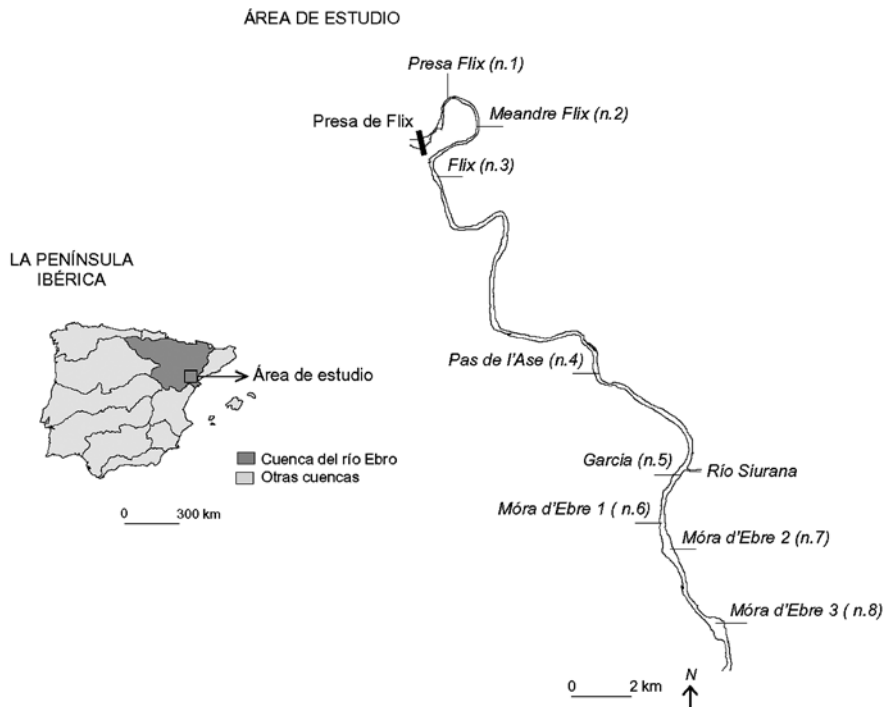


Figura 1. Localización de la área de estudio en el tramo bajo del río Ebro.
Figure 1. Location of the study reach in the lower Ebro Basin (NE Iberian Peninsula).

2.000 mm en los Pirineos e inferiores a 300 mm en el centro de la Depresión. La aportación media anual en Tortosa es de 14.300 hm³ (1913-2004), lo que supone un caudal medio anual de 450 m³/s. El caudal máximo estimado en Tortosa es de 12.000 m³/s en 1907 (Novoa, 1984). Alrededor de 190 embalses regulan cerca del 60% de la aportación media anual de la cuenca. La mayoría de las presas, con una capacidad total de 5.200 hm³, fueron construidas entre 1950 y 1975 (Batalla *et al.*, 2004). El caudal máximo registrado en Tortosa en el período post-embalses ha sido de 3.300 m³/s en 1982. La sedimentación media anual en los embalses se estima aproximadamente en 15 hm³ (0,2% de su capacidad) (Sanz *et al.*, 1999; Batalla, 2003).

2.2. El tramo bajo del río Ebro

En este estudio se considera como tramo bajo del río Ebro el sector delimitado por los municipios de Flix y Móra d'Ebre, un tramo de río de 28 km aguas abajo de las presas de Mequinenza (capacidad de 1.534 hm³, en operación desde 1966), Ribarroja (207 hm³, 1969) y Flix (11 hm³, 1948) (Figura 1). La magnitud de las crecidas frecuentes en el tramo bajo del río Ebro este tramo (Q_2 - Q_{25} , donde Q_i es el caudal para un período de retorno de i años) se ha reducido un 25% (Batalla *et al.*, 2004). La carga total anual de sedimentos en Mora d'Ebre es de 0.4x10⁶ toneladas (60% en suspensión y 40% como carga de fondo) (Vericat y Batalla, 2006), lo que representa entre un 2% y un 3% de la que el río transportaba en su desembocadura a principios del siglo XX (Nelson, 1990). La reducción del suministro de sedimentos ha sido la causa de cambios progresivos en la morfología y la ecología del río (e.g., Sanz *et al.*, 1999; Vericat y Batalla, 2006; Palau *et al.*, 2004), y se ha identificado como la principal razón del retroceso del delta que se observa desde los años 70.

3. Métodos

Las muestras granulométricas del lecho se obtuvieron en casi todas las barras emergidas durante caudales bajos a lo largo del tramo de estudio (Figura 1). Se examinaron un total de 8 barras y las muestras se tomaron en posiciones sedimen-

tológicas equivalentes (e.g., Rice y Church, 1998), en este caso el extremo de más aguas arriba en cada barra. Las barras no se movieron ni cambiaron de dimensión durante el período de muestreo. De esta forma, se descarta cualquier influencia de desviaciones asociadas a procesos locales en el muestreo (e.g., *downstreambar fining*). Las barras son sobretudo centrales y se encuentran recubiertas por escasa vegetación. Estas, características que indican tanto la importante cantidad importante de sedimentos almacenados en el sistema como que el lecho es relativamente activo, y que el muestreo es representativo del régimen de caudales actual. El muestreo de sedimentos para granulometrías se realizó en los veranos de 2002, 2003 y 2004. Entre las fechas de muestreo ocurrieron diversas crecidas con caudales máximos entre 1.400 m³/s y 2.500 m³/s (Q_2 y Q_8 , respectivamente). La crecida de mayor magnitud ocurrió en febrero de 2003.

El muestreo de sedimentos tuvo como objetivo la caracterización del material superficial y subsuperficial por separado. Esto fue posible en todos los puntos de muestreo excepto en la sección n.2 localizada 2,7 kilómetros aguas abajo de la presa de Flix (Figura 1), donde se tomó una muestra compuesta ya que no había diferencias entre la capa superficial y el material subyacente. El material superficial se caracterizó mediante el método de los transectos lineales (Wolman, 1954; Rice y Church, 1996). Este método permitió la clasificación del eje b (anchura) de un mínimo de 100 partículas pasándolas a través de una plantilla dividida en intervalos $1/2 \phi$ (e.g., Lisle y Madej, 1992). En total se midieron 3.800 partículas. Simultáneamente, el material superficial también se muestreó mediante el método de área por peso (e.g., Lane y Carlson, 1953; Gomez, 1979). Este método permite una determinación exacta del porcentaje de material inferior a (8 mm-) que no se considera en el método de los transectos lineales. El material superficial se separó de los sedimentos subyacentes mediante pintura en spray (e.g., Lane y Carlson, 1953). Church *et al.* (1987) describieron que la pintura no identifica exactamente las partículas superficiales ya que al aplicarla sobre la superficie puede llegar también a partículas subyacentes. Para minimizar esta fuente de error se utilizó pintura de secado rápido y se pintó desde una distancia suficiente para prevenir el exceso de pintura y reducir su infil-

tración. El área muestreada varió entre 1 y 3 m², y se calculó mediante la fórmula de Fripp y Diplas (1993):

$$S = 400 \times (D_{\max-s})^2$$

donde S es el área a muestrear (m²) y D_{max-s} es el eje b (m) de la partícula más gruesa expuesta en superficie. Se tamizaron 1.625 kg de material (equivalente a 30 m² de superficie del lecho) durante las campañas de campo de 2002, 2003 y 2004.

El material subsuperficial se muestreó mediante el método volumétrico con previa extracción de la capa superficial. La partícula más grande de la subsuperficie (D_{max-ss}) no excedió del 1% del peso total de la muestra (Church *et al.*, 1987). Esta técnica también fue la utilizada para caracterizar la sección n.2. Se tamizaron 1.390 kg de material durante las tres campañas de campo.

Las muestras recogidas mediante el método área por peso y volumétrico fueron tamizadas en

intervalos 1/2 phi y pesadas directamente en el campo. Las muestras que contenían material húmedo se llevaban al laboratorio y se secaban antes de tamizar y pesar. Las muestras de área por peso fueron convertidas a valores equivalentes de las volumétricas (Kellerhals y Bray, 1971). Para no generar una desviación excesiva de las fracciones extremas de las distribuciones granulométricas se utilizó un factor de conversión de -0,5 (Gomez, 1983; Anastasi, 1984; Diplas y Sutherland, 1988; Diplas, 1989). Cuando el porcentaje de las partículas más finas (i.e., < 8 mm) en las muestras de área por peso era superior al 5%, se elaboraron distribuciones granulométricas superficiales combinadas (Fripp y Diplas, 1993; Rice y Haschenburger, 2004). De esta manera no se subestimó el peso de las partículas más finas de 8 mm en la distribución como podía haber sucedido si solamente se hubiese utilizado el método de los transectos lineales.

Tabla 1 Características del material del lecho del tramo bajo del Ebro, aguas abajo de la presa de Flix, en las secciones de muestreo en verano de 2002.

Table 1. Bed-material characteristics in the monitoring sections of the lower Ebro River downstream from the Flix Dam in summer 2002.

Sección de muestreo ¹	2002									
	Material superficial					Material subsuperficial				
	L ² (km)	D _{50-s} ⁴ (mm)	D _{max-s} ⁶ (mm)	σ ⁷	σ _{F&W} ⁸	Mf ⁹ (%)	D _{50-ss} ¹¹ (mm)	σ _{F&W} ⁸	σ ⁷	A _c ¹²
Presa Flix (n.1)	0,8	70,5	195	1,6	0,7	2	24,5	2,8	8,6	2,9
Meandre Flix (n.2)	2,7	5	5	5	5	-	12,9	1,3	2,2	5
Flix (n.3)	5,6	20,9	150	1,6	0,7	<1	20,1	0,9	1,9	1,0
Pas Ase (n.4)	18,3	8,7	45	4,9	2,1	22 ¹⁰	7,5	2,0	4,4	1,2
García (n.5)	22,9	41,9	128	2,9	1,8	3	15,3	2,4	5,9	2,7
Móra d'Ebre 1 (n.6)	25,2	48,1	150	2,4	1,2	<5	11,0	2,6	6,8	4,4
Móra d'Ebre 2 (n.7)	26,5	19,7	111	1,7	0,7	3	14,2	1,0	2,0	1,4
Móra d'Ebre 3 (n.8)	27,8	49,6	181	2,0	1,0	<1	19,2	1,9	3,8	2,6
	media ³	37	137	2,4	1,2	-	16	1,9	4,4	2,3
	desviación estándar	±22	±50	±1,2	±0,6	-	±6	±0,7	±2,5	±1,2

¹ La posición de las secciones de muestreo se muestra en la figura 1.

² Distancia desde la presa de Flix (km).

³ Media aritmética (mm).

⁴ Mediana de la distribución granulométrica superficial (mm).

⁵ La caracterización granulométrica se realizó sin separar el material superficial del subsuperficial (ver texto para detalles). Los valores de la distribución combinada se presentan en la columna 'Material subsuperficial', pero no se han tenido en cuenta en el cálculo de la media y de la desviación estándar.

⁶ Partícula más gruesa expuesta en superficie (mm).

⁷ Desviación típica de las distribuciones calculada como (D₈₄/D₁₆)^{0,5}

⁸ Índice de dispersión de Folk y Ward (1957) (σ_{F&W}).

⁹ Porcentaje de material más fino de 8 mm.

¹⁰ Las distribuciones superficiales se han elaborado mediante la combinación de las muestras obtenidas por el método de los transectos lineales y el método área por peso.

¹¹ Mediana de la distribución subsuperficial (mm).

¹² Índice de acorazamiento calculado como el cociente entre D_{50-s} y D_{50-ss}.

4. Observaciones

4.1. Distribución granulométrica en 2002

4.1.1. Material superficial

El valor medio de las medianas del sedimento superficial (D_{50-s}) en las distintas secciones de con-

trol osciló entre 9 y 71 mm (Tabla 1). El D_{50-s} medio fue de 37 mm con un error estándar (ϵ) de ± 8 mm ($\epsilon = \sigma/\sqrt{N}$, donde σ es la desviación estándar y N el número de datos). El D_{50-s} máximo y mínimo se observó en las secciones n.1 y n.4, respectivamente (Figura 1). El material superficial es de mayor tamaño que el subyacente en todas las secciones, excepto en las secciones n.2 y n.4 donde la diferencia es poco importante. El material más fino

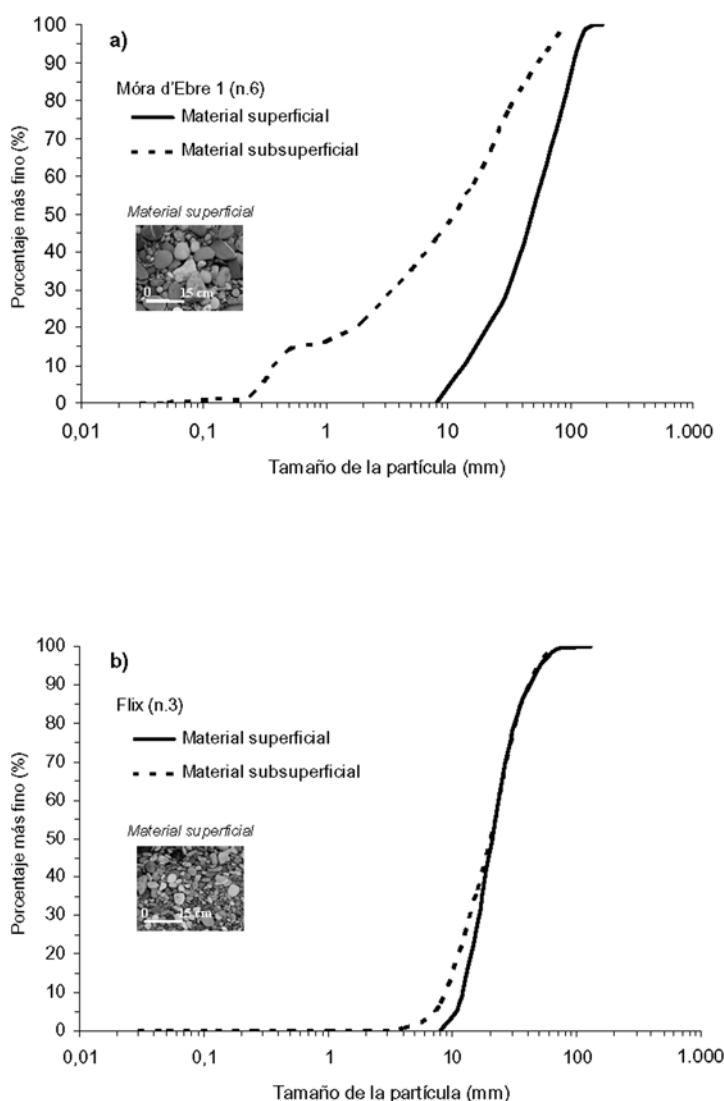


Figura 2 (a). Distribuciones granulométricas del lecho del río Ebro en las secciones de control n.6 (mayor índice de acorazamiento) y (b) n.3 (menor índice de acorazamiento) observadas en el verano de 2002 (Tabla 1).

Figure 2 (a). Surface and subsurface bed-material distributions of sections n.6 (highest armouring) and (b) n.3 (lowest armouring) observed in summer 2002 (Table 1).

Tabla 2 Características del material del lecho del tramo bajo del Ebro, aguas abajo de la presa de Flix, en las secciones de muestreo en verano de 2003 (ver superíndices en la Tabla 1).

Table 2. Bed-material characteristics in the monitoring sections of the lower Ebro River downstream from the Flix Dam in summer 2003 (see superscripts in Table 1).

Sección de muestreo	2003								
	Material superficial				Material subsuperficial				
	D_{50-s} (mm)	D_{max-s} (mm)	$\sigma_{F\&W}^7$	σ'	Mf (%)	D_{50-ss} (mm)	$\sigma_{F\&W}^7$	σ'	Ac^{11}
Presa Flix (n.1)	67,9	150	0,9	1,8	2	22,7	2,5	5,3	3,0
Meandre Flix (n.2)	⁵	⁵	⁵	⁵	-	12,5	2,2	2,2	⁵
Flix (n.3)	21,7	100	0,7	1,6	3	16,1	1,0	1,9	1,3
Pas Ase (n.4)	8,4	64	1,7	3,0	30 ¹⁰	8,3	2,1	4,9	1,0
García (n.5)	36,0	150	0,7	1,7	2	14,8	2,2	5,2	2,4
Móra d'Ebre 1 (n.6)	35,1	123	2,8	7,9	9 ¹⁰	14,5	2,5	6,5	2,4
Móra d'Ebre 2 (n.7)	34,0	155	1,7	2,6	9 ¹⁰	17,8	2,5	6,5	2,0
Móra d'Ebre 3 (n.8)	32,8	112	2,1	4,0	7 ¹⁰	21,9	1,9	3,5	1,5
media	34	122	1,5	3,2		16	2,1	4,5	1,9
desviación estándar	±18	±33	±0,8	±2,2		±5	±0,5	±1,8	±0,7

de 8 mm no presentó porcentajes representativos (i.e., < 5%), excepto en la barra n.4 (Tabla 1). Las partículas más gruesas expuestas en superficie (D_{max-s}) oscilaron entre 45 y 195 mm, con un promedio de 137 mm y un ϵ de ± 19 mm. La partícula de mayor tamaño se midió en la primera y en la última sección de control (n.1 y n.8, respectivamente) (Tabla 1). La clasificación de las distribuciones superficiales se calculó mediante el índice de dispersión ($\sigma_{F\&W}$) de Folk y Ward (1957). El $\sigma_{F\&W}$ osciló entre 0,7 y 2,1, valores que caracterizan las distribuciones moderadamente bien clasificadas y muy mal clasificadas, respectivamente (Tabla 1). El promedio de los coeficientes de dispersión fue de 1,2 (i.e., distribución mal clasificada). No se ha observado ninguna relación estadística entre el valor medio de las distribuciones y el índice de dispersión, lo que refleja la alta variabilidad de la granulometría superficial en el tramo de estudio.

4.1.2. Material subsuperficial

El valor de las medianas del sedimento subsuperficial (D_{50-ss}) osciló entre 8 y 25 mm (Tabla 1). El D_{50-ss} medio fue de 16 mm con un ϵ de ± 2 mm, cuatro veces menor que el error estimado para el material superficial. La ubicación de los D_{50-ss} máximos y mínimos fue la misma que la del material superficial (Tabla 1). Las distribuciones subsuperficiales presentaron valores de dispersión más elevados que las superficiales. El $\sigma_{F\&W}$ osciló entre

2,8 y 0,9, lo que indica distribuciones muy mal clasificadas y moderadamente clasificadas, respectivamente. El valor medio de $\sigma_{F\&W}$ fue 1,9 (Tabla 1). En general, la distribución del material subsuperficial está claramente más desplazada hacia las fracciones finas que el superficial. Tampoco se encontró ninguna relación estadística significativa entre D_{50-ss} y $\sigma_{F\&W}$.

4.1.3. Acorazamiento del material del lecho del río

Cuando el material del lecho de un río está expuesto a caudales sin competencia para movilizar todas las partículas que componen el lecho, el material de la superficie aumenta progresivamente de tamaño y se incrementa la diferencia respecto al material subyacente. Esta hipótesis se puede verificar mediante el coeficiente de acorazamiento (A_c), calculado como el cociente entre el D_{50-s} y el D_{50-ss} (e.g., Lisle y Madej, 1992). El coeficiente de acorazamiento presenta valores próximos a 1 en ríos con caudales competentes para movilizar todas las fracciones granulométricas y con disponibilidad de éstas. En cambio, en ríos donde los caudales no son competentes para transportar todas las partículas del lecho, ocurre una movilización selectiva de las más finas, y hay un desequilibrio entre el abastecimiento de sedimentos y la capacidad de transporte del flujo, el coeficiente se acerca a valores de 2 (e.g., Bunte y Abt, 2001).

El valor medio de A_c en todas las barras es de 2,3 con un $\epsilon \pm 0,5$ (Tabla 1). El A_c máximo presentó un valor de 4,4 y se estimó en la sección n.6 (Figura 2a). En esta sección, el porcentaje de material fino (< 8 mm) superficial y subsuperficial es inferior a 5% y superior al 50% respectivamente. Además de la sección n.6, en otras tres barras se obtuvieron A_c superiores a 2 (secciones n.1, n.5, y n.8), hecho que indica la importante limitación en la disponibilidad de sedimentos desde aguas arriba. Los coeficientes de acorazamiento más bajos se obtuvieron en las barras n.2, n.3 y n.4. En ellas, el A_c no excedió de 1,2 (Tabla 1, Figura 2b). La reducción del A_c aguas abajo es notable entre las secciones n.1 y n.4.

4.2. Distribución granulométrica en el verano de 2003

La dinámica del material del lecho durante las crecidas del invierno de 2002-2003 fue la responsable de la nueva distribución granulométrica observada durante la campaña de campo del verano de 2003.

4.2.1. Material superficial

El D_{50-s} osciló entre 8 y 68 mm, límites muy similares a los obtenidos en 2002. El valor medio de D_{50-s} fue 34 mm, con un ϵ de ± 7 mm. Ambos valores son similares a los obtenidos en el 2002. Los valores máximo y mínimo del D_{50-s} se obtuvieron en la sección de Presa Flix (n.1) y en la de Pas de l'Ase (n.4) respectivamente. Uno de los fenómenos más característicos observados en verano de 2003 fue el aumento sustancial de material fino en la superficie del lecho en algunas secciones en comparación con el año anterior (Tabla 2). Según el grado de cambio del D_{50-s} el área de estudio se puede dividir en dos tramos diferenciados. El primero de ellos abarca el tramo de río entre las secciones n.1 y n.4 (ambas incluidas), es decir los primeros 18 km de río aguas abajo de la presa de Flix (Figura 1). En este tramo el D_{50-s} no varió sustancialmente entre 2002 y 2003. El segundo tramo comprende el sector entre las secciones n.5 y n.8 (ambas incluidas). Se trata de un tramo de 10 km que se inicia en la confluencia del Ebro con el Siurana (Figura 1). La reducción del

tamaño del material superficial fue notable en las secciones n.5, n.6 y n.8. Estas habían sido secciones donde se habían observado elevados índices de acorazamiento en 2002 (Tabla 1 y Tabla 2). El valor del D_{max-s} osciló entre 155 y 64 mm, con una media de 122 mm y un ϵ de ± 13 mm. El tamaño de los D_{max-s} fue 15 mm inferior al estimado en 2002. El valor medio de $\sigma_{F\&W}$ fue de 1,5 (i.e., distribución mal clasificada) (Tabla 2). Los cambios más importantes en cuanto a clasificación ocurrieron en las barras n.5 y n.6, situadas aguas abajo de la confluencia con el Siurana.

4.2.2. Material subsuperficial

Los valores de D_{50-ss} oscilaron entre 8 y 23 mm. El valor medio fue de 17 mm, con un ϵ de ± 2 mm. Los valores máximo y mínimo se obtuvieron en las secciones n.1 y n.4 respectivamente (Tabla 2). Aguas abajo de la sección n.5 se observó un aumento del D_{50-ss} . De la misma manera que en 2002, las distribuciones granulométricas subsuperficiales estaban peor clasificadas (i.e., más dispersas) que las del material superficial. El índice $\sigma_{F\&W}$ osciló entre 2,5 y 1,0 con un valor medio de 2,1 (Tabla 2). Los valores de dispersión no cambiaron significativamente respecto a los calculados en 2002 (Tabla 1 y Tabla 2). El cambio más significativo se observó en la sección n.7 donde el índice de dispersión aumentó de 1,0 a 2,5.

4.2.3. Acorazamiento del material del lecho del río

El A_c experimentó una reducción notable en alguna de las secciones de control durante 2003 (Tabla 1 y Tabla 2). El valor medio de A_c en 2002 fue 2,3 mientras que en 2003 fue 1,9. El mayor cambio se observó en la sección n.6 (4,4 en 2002 a 2,4 en 2003). Esta reducción se debió a la disminución del D_{50-s} y al incremento del D_{50-ss} (Tabla 2). El valor máximo de acorazamiento ($A_c=3,0$) se estimó en la sección n.1 (Figura 3a), 0,8 km aguas abajo de la Presa de Flix, donde la granulometría y la estructura del lecho son muy estables. El valor mínimo de acorazamiento ($A_c=1,0$) se obtuvo en la sección n.4 (Figura 3b), en la que no se observaron cambios significativos respecto a la situación de 2002.

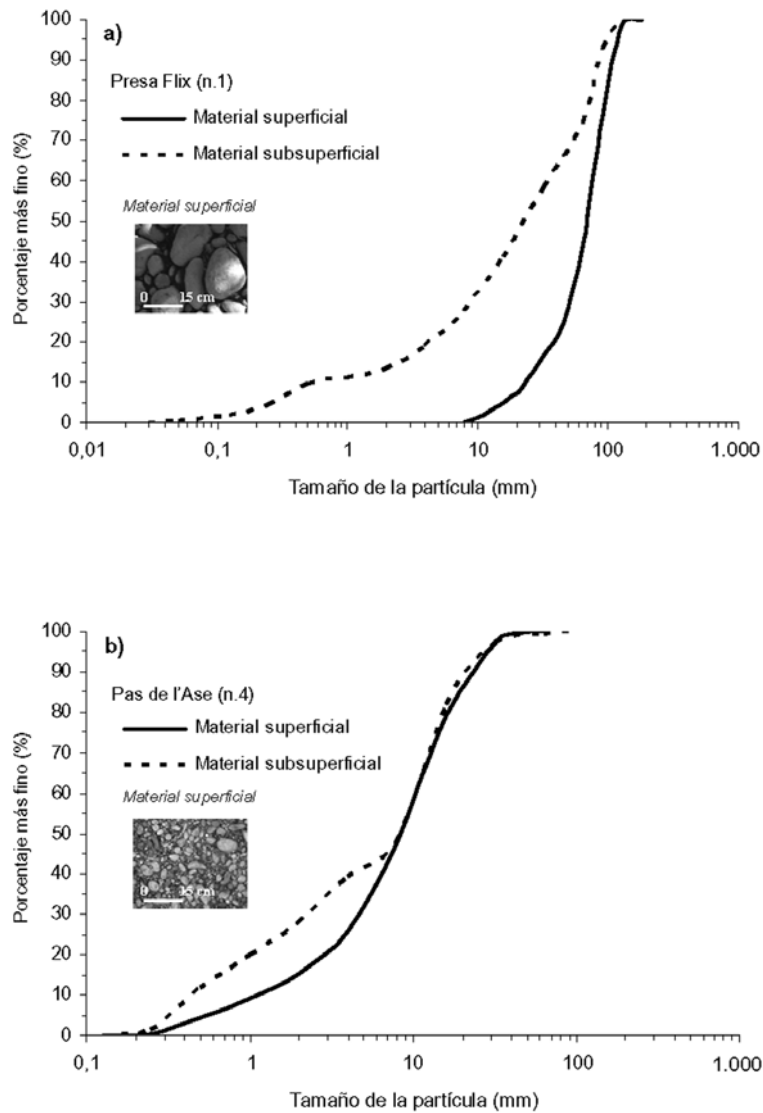


Figura 3 (a). Distribuciones granulométricas del lecho del río Ebro en las secciones de control n.1 (mayor índice de acorazamiento) y (b) n.4 (menor índice de acorazamiento) observadas en el verano de 2003 (Tabla 2).

Figure 3 (a). Surface and subsurface bed-material distributions of sections n.1 (highest armouring) and (b) n.4 (lowest armouring) observed in summer 2003 (Table 2).

4.3. Distribución granulométrica en el verano de 2004

La dinámica del material del lecho durante las crecidas de baja magnitud registradas en el 2003-2004 fue la responsable de la nueva distribución granulométrica observada durante la campaña de campo del verano de 2004.

4.3.1. Material superficial

El D_{50-s} osciló entre 12 y 63 mm, límites de mayor tamaño a los obtenidos en el 2003. El valor medio de D_{50-s} fue 43 mm ($\epsilon = \pm 7$ mm), 9 mm mayor que el valor medio de 2003. Tan solo en la sección n.1 se observó una tendencia a la reducción del tamaño del D_{50-s} , aunque continuó siendo la

sección con el valor máximo. El valor mínimo se obtuvo en la sección n.4, la misma que en el 2003 (Tabla 3). El valor medio de $\sigma_{F\&W}$ fue de 1,0 (i.e., distribución moderadamente clasificada), substancialmente inferior (i.e., distribución mejor clasificada) al obtenido en el 2003, y con un rango entre 0,5 y 1,5. El valor máximo del índice de dispersión se obtuvo en la sección n.7, mientras que el mínimo se obtuvo en la n.5, sección ubicada en las proximidades de la confluencia del río Siurana (Tabla 3, Figura 1). De manera general, se observa una tendencia clara a la disminución del $\sigma_{F\&W}$ a lo largo del área de estudio. El cambio más importante ocurrió en la barra n.6, en la que el índice de dispersión cambió de 2,8 a 0,8 (i.e., de una distribución muy mal clasificada a una moderadamente clasificada). La reducción de los valores del $\sigma_{F\&W}$ en 2004 revela el pequeño rango de tamaños de las partículas superficiales, posiblemente como consecuencia de la diferencia entre transporte y disponibilidad de sedimentos, en la que algunas de las fracciones fueron transportadas sin reemplazo posterior.

4.3.2. Material subsuperficial

Los valores de D_{50-ss} obtenidos en el 2004 (Tabla 3) muestran cierta tendencia al incremento en comparación con los obtenidos en el 2003 (Tabla 2). En el 2004 oscilaron entre 11 y 29 mm. El valor medio fue de 18 mm, con un ϵ de $\pm 2,0$ mm. De la misma manera que en los años prece-

dentos (2002 y 2003), las distribuciones granulométricas subsuperficiales estaban peor clasificadas (i.e., más dispersas) que las del material superficial. Los valores de dispersión no cambiaron significativamente respecto a los calculados en el 2003. El índice $\sigma_{F\&W}$ osciló entre 2,5 y 1,6 con un valor medio de 1,9. El cambio más significativo se observó en la sección n.7 donde el índice de dispersión disminuyó (i.e., distribución mejor clasificada) de 2,5 a 1,6.

4.3.3. Acorazamiento del material del lecho del río

El acorazamiento aumentó de manera generalizada. El valor medio de A_c fue de 2,3 con un ϵ de $\pm 0,2$ (Tabla 3), es decir 0,4 puntos superior al valor medio calculado en verano de 2003 (Tabla 2). De manera excepcional, la sección n.1 experimentó una disminución del A_c debido a la reducción y al incremento del valor medio de la distribución superficial y la subsuperficial respectivamente.

El A_c máximo (i.e., 2,7) se calculó en el tramo comprendido por las secciones n.5 y n.8 (ambas incluidas) (Tabla 3, Figura 1). En comparación con 2003, el A_c en dicho tramo aumentó entre 0,3 y 1,1. El incremento máximo se observó en la sección n.8 (Figura 4a). El valor mínimo de acorazamiento se obtuvo en la sección n.4 (Figura 4b) al igual que en 2003. Las diferencias en el A_c reflejan las variaciones en la disponibilidad de sedimentos en cada una

Tabla 3 Características del material del lecho del tramo bajo del Ebro, aguas abajo de la presa de Flix, en las secciones de muestreo en verano de 2004 (ver superíndices en la Tabla 1).

Table 3. Bed-material characteristics in the monitoring sections of the lower Ebro River downstream from the Flix Dam in summer 2004 (see superscripts in Table 1).

Sección de muestreo	2004								
	Material superficial					Material subsuperficial			
	D_{50-s} (mm)	D_{max-s} (mm)	$\sigma_{F\&W}$	σ'	Mf (%)	D_{50-ss} (mm)	$\sigma_{F\&W}$	σ'	A_c
Presa Flix (n.1)	63,1	154	1,2	2,5	1	29,1	2,0	3,7	2,2
Meandre Flix (n.2)	⁵	⁵	⁵	⁵	⁵	17,2	1,7	2,8	⁵
Flix (n.3)	24,5	90	0,8	1,7	4	12,4	1,7	2,7	2,0
Pas Ase (n.4)	12,5	75	1,4	2,7	13 ¹⁰	10,7	1,5	3,0	1,2
García (n.5)	42,6	138	0,5	1,4	4	15,6	2,2	4,4	2,7
Móra d'Ebre 1 (n.6)	47,2	113	0,8	1,8	3	17,4	2,5	5,6	2,7
Móra d'Ebre 2 (n.7)	54,2	135	1,5	4,0	4	20,4	1,6	3,2	2,7
Móra d'Ebre 3 (n.8)	57,6	148	0,8	1,7	4	21,4	2,2	4,5	2,7
media	43	122	1,0	2,3	⁵	18	1,9	3,7	2,3
desviación estándar	± 18	± 30	$\pm 0,4$	$\pm 0,9$	⁵	± 6	$\pm 0,4$	$\pm 1,0$	$\pm 0,6$

de las secciones de control, determinadas, básicamente, por las características granulométricas de los tramos entre secciones. Tan solo en las secciones n.2 y n.4 la diferencia entre el D_{50-s} y el D_{50-ss} es menor a 2. Ambas secciones están ubicadas aguas abajo de secciones con presencia de coraza.

A partir de la observación de la distribución del índice de acorazamiento aguas abajo se pueden determinar dos tramos con un distinto comporta-

miento sedimentario (Tabla 3). El primero de los tramos está delimitado por las secciones n.1 y n.4. Corresponde a un tramo de río de 18 km en el que A_c disminuye aguas abajo. Dicho proceso también se observó durante el período 2002-2003 (Tabla 1 y Tabla 2). Aguas abajo de la confluencia con el río Siurana (secciones n.5 a n.8), el A_c aumenta y se mantiene prácticamente constante ($A_c = 2.7$) (Tabla 1).

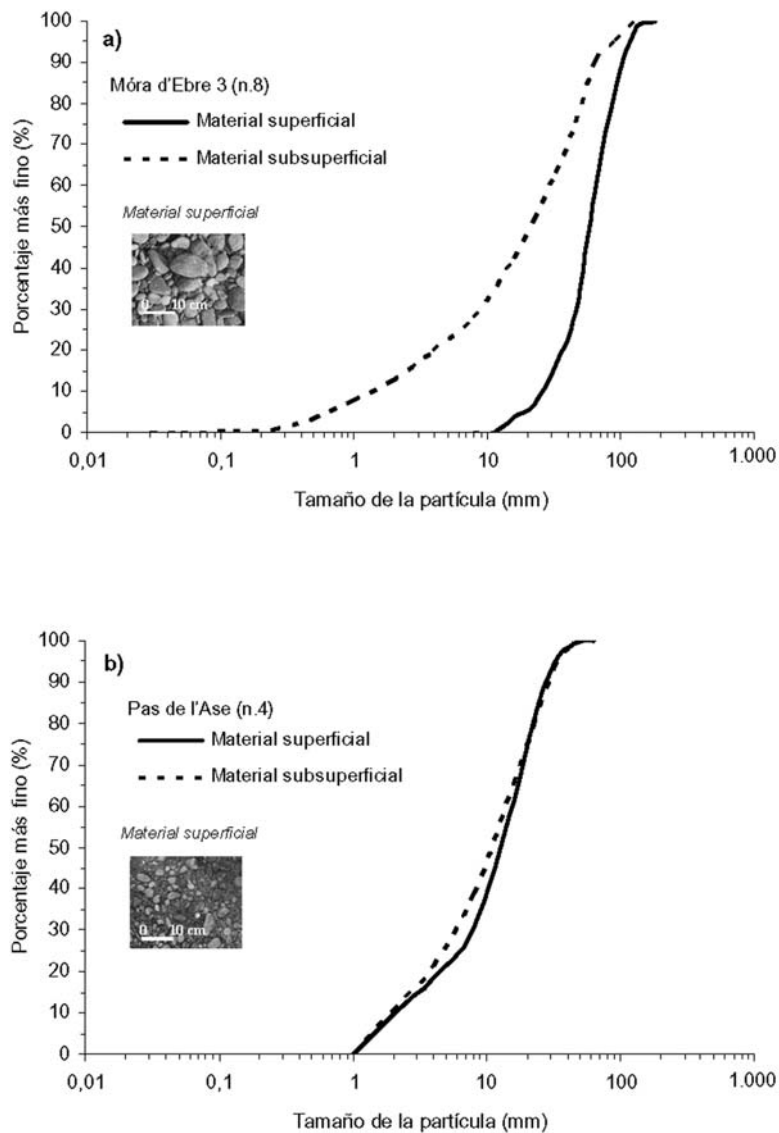


Figura 4 (a). Distribuciones granulométricas del lecho del río Ebro en las secciones de control n.8 (mayor índice de acorazamiento) y (b) n.4 (menor índice de acorazamiento) observadas en el verano de 2004 (Tabla 3).

Figure 4 (a). Surface and subsurface bed-material distributions of sections n.8 (highest armouring) and (b) n.4 (lowest armouring) observed in summer 2004 (Table 3).

5. Conclusiones

El trabajo muestra la evolución de las características granulométricas del lecho del tramo bajo del río Ebro durante el período 2002-2004. El análisis granulométrico del material del río Ebro demuestra cómo el acorazamiento es un proceso activo básico en sistemas fluviales regulados. Los resultados se han obtenido en casi todas las barras emergidas durante caudales bajos y se consideran representativos de la dinámica actual del lecho del río, si bien se desconoce en detalle las características granulométricas de otros tramos no analizados. Las principales conclusiones de la investigación del estudio son:

1. La granulometría de los sedimentos varía sustancialmente en el tiempo y el espacio, hecho que refleja tanto la acusada actividad sedimentaria en el lecho del río (i.e., el río dispone todavía de gran cantidad de sedimentos listos para ser transportados), como el papel determinante de las crecidas en su movilización y transporte aguas abajo.

2. Los sedimentos superficiales muestreados en las barras emergidas son más variables granulométricamente que los subsuperficiales los cuales, aunque con diferencias entre secciones, mantienen sus valores medios más estables en el tiempo.

3. El río muestra diferentes grados de acorazamiento a lo largo del tramo, observándose los mayores valores aguas abajo de la presa de Flix y de la confluencia con el río Siurana. El grado de acorazamiento varía año tras año y lo hace en función de la magnitud de las crecidas.

Agradecimientos

Esta investigación se realizó en el marco del proyecto REN2001-0840-C02-01/HID, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. El primer autor disfrutó de una beca del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Los datos hidrológicos fueron suministrados por la Confederación Hidrográfica del Ebro. El Ayuntamiento de Móra d'Ebre proporcionó ayuda logística. Albert Rovira colaboró en el trabajo de campo y de laboratorio. Michael Church realizó una primera revisión de la primera versión del trabajo. Los autores agradecen

las revisiones de la primera versión del artículo por parte de Jorge Guillén y de un segundo revisor anónimo.

Referencias

- Anastasi, G. (1984). Geschiebeanalysen im Felde unter Berücksichtigung von Grobkomponenten. [Field grain-size analyses with special attention to coarse material]. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, Nr. 70.
- Andrews, E.D. y Parker, G. (1987). Formation of a coarse surface layer as the response to gravel mobility. En: Thorne C. R., Barthurst J.C. y Hey R.D. (eds.): *Sediment transport in gravel-bed rivers*. John Wiley and Sons, Chichester, 269-300.
- Batalla, R.J. (2003). Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining. A review with examples from NE Spain. *Cuaternario y Geomorfología*, 17(3-4), 79-91.
- Batalla, R.J., Kondolf, G.M. y Gomez, C.M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin, NE Spain. *Journal of Hydrology*, 290, 117-136.
- Brandt, S.A. (2000). Prediction of downstream geomorphological changes after dam construction: a stream power approach. *International Journal of Water Resources Development*, 16(3), 343-367.
- Bunte, K. y Abt, S.R. (2001). *Sampling surface and subsurface. Particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring*. U.S. Department of Agriculture, Forest Services, Rocky Mountain Research Station.
- Burkham, D.E. (1986). Trends in selected hydraulic variables for the Colorado River at Lees Ferry and near Grand Canyon, Arizona -1922-1984. Report, 58 pp., Bur. of Recla., Glen Canyon Environ. Stud., Flagstaff, Arizona.
- Church, M., McLean, D.G. y Wolcott, J.F. (1987). River bed gravels: sampling and analysis. En: Thorne C. R., Barthurst J.C. y Hey R.D. (eds.): *Sediment transport in gravel-bed rivers*. John Wiley and Sons, Chichester, 43-88.
- Colby, B.R. (1964). Scour and fill in sand-bed streams. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 462-D, 32 pp.
- Davies, D.A., Berrisford, M.S. y Matthews, J.A. (1990). Boulder paved rivers: a case study of a fluvial periglacial landform. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 34, 213-231.
- Dietrich, W.E., Kirchner, J.W., Ikeda, H. y Iseya, F. (1989). Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Nature*, 340, 215-217.
- Diplas, P. (1989). Areal sampling techniques. En: Wang, S.S.Y. (ed.): *Sediment Transport Modeling*, American Society of Civil Engineers, New York, 380-385.

- Diplas, P. y Sutherland, A. J. (1988). Sampling techniques for gravel sized sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(5), 484-501.
- Dunkerley, D.L. (1990). The development of armour in the Tambo River, Victoria, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 405-415.
- Fassnacht, H., McClure, E.M., Grant, G.E. y Klingeman, P.C. (2003). Downstream effects of the Pelton-Round Butte hydroelectric project on bedload transport, channel morphology, and channel-bed texture, lower Deschutes River, Oregon. *Water science and Application*, 7, 175-207.
- Folk, R.L. y Ward, C. (1957). Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1), 3-26.
- Fripp, J.B. y Diplas, P. (1993). Surface sampling in gravel streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(4), 473-490.
- Gessler, J. (1965). Der Geschiebetriebbeginn bei Mischungen untersucht an naturlichen Abpflaesterungsercheinungen in Kanaelen. *Rep. 69*, Mitt. Der Vers. Für Wasswrbau und Erdbau, Zurich.
- Gessler, J. (1971). Aggradation and degradation. En: Shen, H.W., (ed.): *River Mechanics*, Fort Collins, Volume I.
- Gómez, B. (1979). Bedload discharge in a small Devon stream. *Report of the Transactions of the Devonshire Association for the Advancement of Science*, 111, 31-48.
- Gómez, B. (1983). Temporal variations in bedload transport rates: the effect of progressive bed armouring. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, 41-54.
- Gómez, B. (1994). Effects of particle shape and mobility on stable armour development. *Water Resources Research*, 30(7), 2229-2239.
- Hammad, H.Y. (1972). River bed degradation. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division*, 98, 591-607.
- Iseya, F. y Ikeda, H. (1987). Pulsations in bedload transport rates induced by a longitudinal sediment sorting: a flume study using sand and gravel mixtures. *Geografiska Annaler*, 69A, C15-27.
- Kellerhals, R. y Bray, D. I. (1971). Sampling procedures for coarse fluvial sediments. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE97(HY8), 1165-1180.
- Kondolf, G.M. (1994). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*, 28, 225-243.
- Kondolf, G.M., 1997. Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21(4), 533-551.
- Lane, E.W. y Carlson, E.J. (1953). Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials. *Proceedings of the 5th Congress International Association for Hydraulic Research*, Delf, Netherlands.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. y Miller, J.P., 1964. *Fluvial processes in Geomorphology*, W.H. Freeman, San Francisco, 522p.
- Lisle, T.E. y Madej, M.A. (1992). Spatial variation in a channel with high sediment supply. En: Billi, P., Hey, R.D., Thorne, C.R., Tacconi, P., (eds.): *Dynamics of Gravel Bed Rivers*, John Wiley, New York, 277-291.
- Little, W.C. y Mayer, P.G. (1976). Stability of channel beds by armouring. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division*, 102(Hy11), 1647-1661.
- Milhous, R.T. (1982). Effect of sediment transport and flow regulation on the ecology of gravel bed rivers. En: Hey, R.D., Bathurst, J.C., Thorne, C.R., (eds.): *Gravel Bed Rivers*, John Wiley and Sons, Chichester, 819-842.
- Nelson, C.H. (1990). Post Messinian deposition rates and estimated river loads in the Ebro sedimentary system. En: Nelson C.H., Maldonado A. (eds.): *Marine Geology of the Ebro Continental Margin*, Marine Geology, 95, 395-418.
- Novoa, M. (1984). Precipitaciones y avenidas extraordinarias en Catalunya. *Proceedings of the Jornadas de Trabajo sobre Inestabilidad de laderas en el Pirineo*: Barcelona; 1-15.
- Palau, A., Batalla, R.J., Rosico, E., Meseguer, A. y Vericat, D. (2004). Management of water level and design of flushing floods for environmental river maintenance downstream of the Riba-Roja Reservoir (Lower Ebro River, NE Spain). *Proceedings of the International Conference HYDRO 2004: A New Era for Hydropower*. Porto, Portugal, 18-21 October 2004.
- Parker, G. y Klingeman, P.C. (1982). On why gravel bed streams are paved. *Water Resources Research*, 18, 1409-1423.
- Parker, G. y Sutherland, A.J. (1990). Fluvial armour. *Journal of Hydraulic Research*, 28, 529-544.
- Petts, G.E. (1980). Morphological changes of river channels consequent upon headwater impoundment. *J. Inst. Water Engrs Sci.*, 34(4), 374-382.
- Rice, S. y Church, M. (1996). Sampling surficial fluvial gravels: the precision of size distribution percentile estimates. *Journal of Sedimentary Research*, 66(3), 654-665.
- Rice, S. y Church, M. (1998). Grain size along two gravel-bed rivers: statistical variation, spatial pattern and sedimentary links. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 345-363.
- Rice, S.P. y Haschenburger, J.K. (2004). A hybrid method for size characterization of coarse subsurface fluvial sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 373-389.
- Sanz, M.E., Avendaño, C. y Cobo, R. (1999). Influencia de los embalses en el transporte de sedimentos hasta el río Ebro (España). *Proceedings of the Congress on Hydrological and geochemical processes in large-scale river basins*. HIBAM: Shahin, 1985
- Schumm, S.A. (1977). *The fluvial system*. John Wiley and Sons, New York.
- Sear, D.A. (1992). Impact of hydroelectric power releases on sediment transport processes in pool-riffle sequences. En: Billi, P., Hey, R.D., Thorne, C.R., Tacconi, P., (eds.):

- Dynamics of Gravel Bed Rivers, John Wiley, New York, 629-649.
- Sutherland, A.J. (1987). Static armour layer by selective erosion. En: Thorne C. R., Barthurst J.C. y Hey R.D. (eds.): *Sediment transport in gravel-bed rivers*. John Wiley and Sons, Chichester, 243-260.
- Topping, D.J., Rubin, D.M. y Vierra, L.E. (2000). Colorado River sediment transport I. Natural sediment supply limitation and the influence of Glen Canyon Dam. *Water Resources Research*, 36(2), 515-542.
- Vericat, D. y Batalla, R.J. (2004). Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. *Cuaternario y Geomorfología* 18(1-2), 37-50.
- Vericat, D. y Batalla, R.J. (2005). Sediment transport in a highly regulated fluvial system during two consecutive floods (Lower Ebro River, NE Spain). *Earth Surface Processes and Landforms* 30, 385-402.
- Vericat, D., Batalla, R.J. (2006). Sediment transport in a large impounded river: The lower Ebro, NE Iberian Peninsula. *Geomorphology*, doi:10.1016/j.geomorph.2005.09.017.
- Williams, G.P. y Wolman, M.G. (1984). *Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers*. US Geological Survey Professional Paper 1986.
- Whiting, P.J., Dietrich, W.E., Leopold, L.B., Drake, T.G. y Shreve, R.L. (1988). Bedload sheets in heterogeneous sediment. *Geology*, 16, 105-108.
- Wolman, M.G. (1954). A method of sampling coarse bed material. *American Geophysical Union Transactions*, 35, 951-956.
- Xu, J. (1996). Underlying gravel layers in a large sand bed river and their influence on downstream-dam channel adjustment. *Geomorphology*, 17, 351-359.