Evaluación de fórmulas de transporte de fondo en un río de gravas acorazado

• Raúl López* • Damià Vericat • Ramon J. Batalla •
Universidad de Lleida, Lleida, España
*Autor de correspondencia

Resumen

López, R., Vericat, D., & Batalla, R. J. (marzo-abril, 2015). Evaluación de fórmulas de transporte de fondo en un río de gravas acorazado. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *6*(2), 5-20.

El curso bajo del río Ebro (NE península Ibérica) presenta un cauce con lecho de gravas que discurre aguas abajo de un complejo de embalses. En dicho tramo, el lecho experimenta ciclos de rotura y restablecimiento de la capa superficial acorazada como consecuencia tanto de avenidas naturales como de crecidas de mantenimiento. En el citado contexto, el objetivo de la presente investigación fue doble. En primer lugar, la evaluación de la capacidad predictiva del transporte de fondo de tres fórmulas seleccionadas en condiciones de coraza rota o alterada. En segundo lugar, el análisis de la capacidad de dichas fórmulas para predecir el umbral de rotura o alteración de la coraza. Todo ello se fundamentó en la comparación entre predicciones y mediciones de carga de fondo en el tramo de estudio que abarcaron dos años hidrológicos. Conforme a los condicionantes del tramo de estudio, las fórmulas finalmente seleccionadas fueron las ecuaciones desarrolladas por Parker, Klingeman y McLean (1982) (P-K-M), Bathurst (2007) (B) y Recking (2010) (R). De acuerdo con los resultados, se recomiendan las fórmulas P-K-M y R para la predicción de la carga de fondo cuando se rompa o altere la coraza, y se desaconseja la fórmula B por su marcada tendencia a la infrapredicción. En cambio, para la predicción del umbral de rotura o alteración de la coraza se recomiendan las fórmulas B y R. Sin embargo, cabe advertir que en este caso ambas fórmulas tendieron a predecir umbrales bastante inferiores a los medidos.

Palabras clave: fórmulas de transporte de fondo, transporte de fondo, carga de fondo, transporte de sedimentos, río de gravas, lecho acorazado, río Ebro.

Abstract

López, R., Vericat, D., & Batalla, R. J. (March-April, 2015). Assessment of Bed Load Transport Formula for an Armoured Gravel-Bed River. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 6(2), 5-20.*

The lower Ebro River (NE Iberian peninsula) has a gravel bed which flows downstream from a reservoir complex. In this section of the river, the armoured surface of the bed undergoes cycles of breaking and reestablishment as a result of natural and control floods. The objective of the present work is two-fold. First, to evaluate the capacity of three formulas to predict bed load transport under conditions in which the armour is broken or disturbed. Second, to analyze the ability of the formulas to predict the breakage or disturbance threshold of the armour. This was all based on a comparison between predictions and measurements of the bed load transport in the study section for two hydrological years. Based on the characteristics of the study section, the formulas which were finally selected were the equations developed by Parker, Klingeman and McLean (1982) (P-K-M), Bathurst (2007) (B) and Recking (2010) (R). Given the results, the P-K-M and R formulas are recommended to predict bed load transport when there is breakage or disturbance of the amour, and not formula B because of its considerable tendency to underestimate. Formulas B and R are recommended to predict the breakage or disruption threshold of the armour. Nevertheless, it is worth cautioning that in this case both formulas tended to predict thresholds much lower than those measured.

***Keywords**: Bed load formulae, bed load transport, sediment transport, gravel bed-river, armoured bed, River Ebro.*

Recibido: 30/09/2013
Aceptado: 31/10/2014

Introducción y objetivos

La predicción del transporte de fondo adquiere particular relevancia en disciplinas diversas: ingeniería fluvial, geomorfología fluvial, ecología fluvial, gestión de embalses, ingeniería medioambiental, dispersión de contaminantes y predicción de desastres naturales (p. ej., Martín-Vide, 2013; Re, Kazimierski, & Menéndez, 2014). Las presas comportan una discontinuidad en la

transferencia de sedimento a través de la red de drenaje y modifican el régimen hidrológico de la corriente. Si aguas abajo de la presa la tensión de corte del flujo no supera el valor crítico de inicio del movimiento de las partículas de mayor tamaño del lecho, pero sí es suficiente para transportar los granos más finos, en la capa superficial el sedimento deviene más grueso y, en consecuencia, puede comenzar la formación de una coraza. El grado de acorazamiento del lecho condiciona la distribución granulométrica y la magnitud de la carga de fondo, por ejemplo, mediante la reducción del tamaño de partícula y de la cantidad del sedimento transportado (Parker & Sutherland, 1990). En general, la coraza resulta estable durante avenidas de magnitud inferior al caudal formativo, pero puede romperse o alterarse al paso de crecidas de mayor caudal. Sin embargo, la coraza también puede persistir incluso para caudales altos, siendo ello concomitante con el transporte de partículas de todos los tamaños presentes en la capa superficial acorazada (Wilcock & DeTemple, 2005). En ocasiones, la coraza se estabiliza (p. ej., condición crítica de acorazamiento; Chin, Melville, & Raudkivi, 1994) y deviene estática, impidiendo que la erosión progrese. A efectos del presente artículo, el término coraza alude a la capa superficial del lecho, de carácter semipermanente, formada en el curso bajo del río Ebro, tramo que discurre aguas abajo de un complejo de embalses.

En ríos con lecho acorazado, algunos autores han coincidido en distinguir diferentes fases del transporte de fondo en función de la movilidad o grado de alteración de la coraza (p. ej., Jackson & Beschta, 1982; Bathurst, 2007; Recking, 2010). En caso de que el umbral de rotura o alteración de la coraza no haya sido alcanzando, el transporte de fondo se califica como de fase 1, en la cual la carga de fondo se encuentra integrada por sedimento relativamente fino (proveniente de tramos aguas arriba o movilizado desde parches de sedimento fino presentes en el propio tramo) circulando sobre la coraza inmóvil e inalterada. Cuando el flujo provoca la rotura o alteración parcial de la coraza, se define la fase 2. En la fase 2 del transporte pueden participar partículas más gruesas constitutivas de la coraza y se inicia la incorporación de sedimento fino proveniente del material subyacente o subsuperficial a una tasa, que es función del grado de alteración de la coraza. Por último, una fase 3 puede ser concebida una vez que la capacidad del flujo logra movilizar todos los tamaños de sedimento presentes en el lecho (tanto de la capa superficial acorazada como del material subyacente). Es preciso advertir que no todos los investigadores distinguen entre las fases 2 y 3, sino que consideran un modelo más simple de dos fases. En tal modelo, la fase 1 se caracteriza por un flujo que transporta sedimento fino circulando sobre una coraza sin romper. Una vez que la coraza se ha roto, se inicia la fase 2, caracterizada por el transporte de partículas gruesas provenientes de la coraza, acompañadas del material fino incorporado desde la capa subyacente. En este sentido, la fase 3 ocurre con mucha menor frecuencia de modo estricto (es decir, movilización de todos los tamaños de sedimento presentes en lecho), en especial en ríos de montaña de alta pendiente y sedimento muy pobremente clasificado (con presencia de elementos extremadamente gruesos, con frecuencia de origen coluvial), en los que muy difícilmente el flujo es competente para transportar el sedimento de mayor tamaño.

La mayoría de las fórmulas de carga de fondo que de manera tradicional han sido usadas fueron parcialmente (y en no pocos casos totalmente) desarrolladas a partir de experimentos en canales de laboratorio en los que se utilizó sedimento de granulometría cuasi-uniforme y se daban condiciones de transporte en equilibrio (en las que la disponibilidad de sedimento no limitaba el caudal sólido) (p. ej., Meyer-Peter & Müller, 1948; Schoklitsch, 1950). Por lo tanto, en su desarrollo o formulación no se distinguió entre las diferentes capas o ámbitos granulométricos del material (superficial, subsuperficial o la combinación de ambas) que pueden ser relevantes en ríos de grava. En consecuencia, su aplicación a ríos de grava

con lecho acorazado plantea diversas incertidumbres (en cuanto al diámetro característico del sedimento más adecuado a sustituir en las fórmulas, así como en lo concerniente al umbral de rotura o alteración de la coraza, y a las diversas fases de transporte) y su rendimiento es potencialmente limitado. Por consiguiente, ha resultado necesario el desarrollo de fórmulas que tuviesen en cuenta de forma expresa el efecto del acorazamiento en la carga de fondo (p. ej., Parker, 1990; Bathurst, 2007; Recking, 2010), así como la evaluación o análisis de su capacidad predictiva a la hora de aplicarla a un río en concreto.

Los objetivos de esta investigación se inscribieron al curso bajo del río Ebro, en un tramo ubicado aguas abajo de un complejo de embalses, y cuyo lecho experimenta un proceso cíclico de rotura y restablecimiento de la coraza. En este sentido, un primer objetivo fue la evaluación de la capacidad para la predicción del transporte de fondo de una selección de fórmulas en condiciones de coraza rota o alterada (es decir, en las fases del transporte 2 o 3). Un segundo objetivo consistió en el análisis de la capacidad de las ecuaciones seleccionadas para predecir el umbral de rotura o alteración de la coraza. Dichos análisis se fundamentaron en el contraste entre las predicciones de las fórmulas y las mediciones de carga de fondo en el citado tramo de río.

Material, métodos y tratamiento de la base de datos

El tramo de estudio y las mediciones en campo

La escorrentía anual de la cuenca del río Ebro está muy condicionada por las regiones de montaña: el área de montaña representa solamente alrededor de 30% de la superficie total de la cuenca del río Ebro, pero genera cerca de 60% de la escorrentía media anual (López & Justribó, 2010). La cuenca del río Ebro drena 85 530 km^2 del noreste de la península Ibérica, desembocando en el mar Mediterráneo. La precipitación media anual de la cuenca es de entre 600 y 700 mm. El caudal medio registrado en la estación de aforo de la desembocadura es de 450 m^3·s^{-1}, lo que equivale a una aportación hídrica anual media de 14 300 hm^3. Casi 190 grandes presas regulan 67% (≈ 7 700 hm^3) de la escorrentía anual de la cuenca. El complejo de presas más grande de la cuenca se completó en 1969 en el curso bajo del río y está integrado por tres presas: Mequinenza, Riba-Roja y Flix. El conjunto cuenta con una capacidad de 1 750 hm^3 (equivalente al 13% de la aportación hídrica anual media de la cuenca) (Batalla, Gomez, & Kondolf, 2004) (figura 1).

La hidráulica del flujo y el transporte de sedimento fueron medidos de forma regular y continua durante las crecidas en la sección de muestreo de Móra d'Ebre (SMME) durante el periodo 2002-2004. Esta sección de registro se ubica 27 km aguas abajo de la presa de Flix y en ella el ancho del cauce es de 160 m (figura 1). A lo largo de este tramo de registro el río muestra un cauce único y de baja sinuosidad, siendo su pendiente longitudinal media de $8.5 \cdot 10^{-4}$ m·m^{-1}. En dicho tramo, el cauce del río puede concebirse como un canal de ensayos natural, válido para el estudio de los cambios en la superficie del lecho en función del transporte de fondo. La coraza que se ha desarrollado controla la movilidad del sedimento y la estabilidad del cauce, siendo el acorazamiento una expresión de la limitación de la disponibilidad del sedimento proveniente de los tramos aguas arriba y de la frecuencia de ocurrencia de los flujos competentes. En este apartado se presenta un breve resumen de la metodología de adquisición de datos con la que se caracterizó el sedimento del lecho del río y se midió el transporte de fondo en la SMME. Una descripción pormenorizada de dicha metodología puede consultarse en Vericat y Batalla (2006), Vericat, Batalla y Garcia (2006), y Vericat, Church y Batalla (2006).

Los años hidrológicos del periodo de estudio (2002-2003 y 2003-2004) pueden considerarse medianos en cuanto a caudal medio anual (415 m^3·s^{-1} en el primero año y 465 m^3·s^{-1} en el segundo). Varias crecidas acaecieron durante el

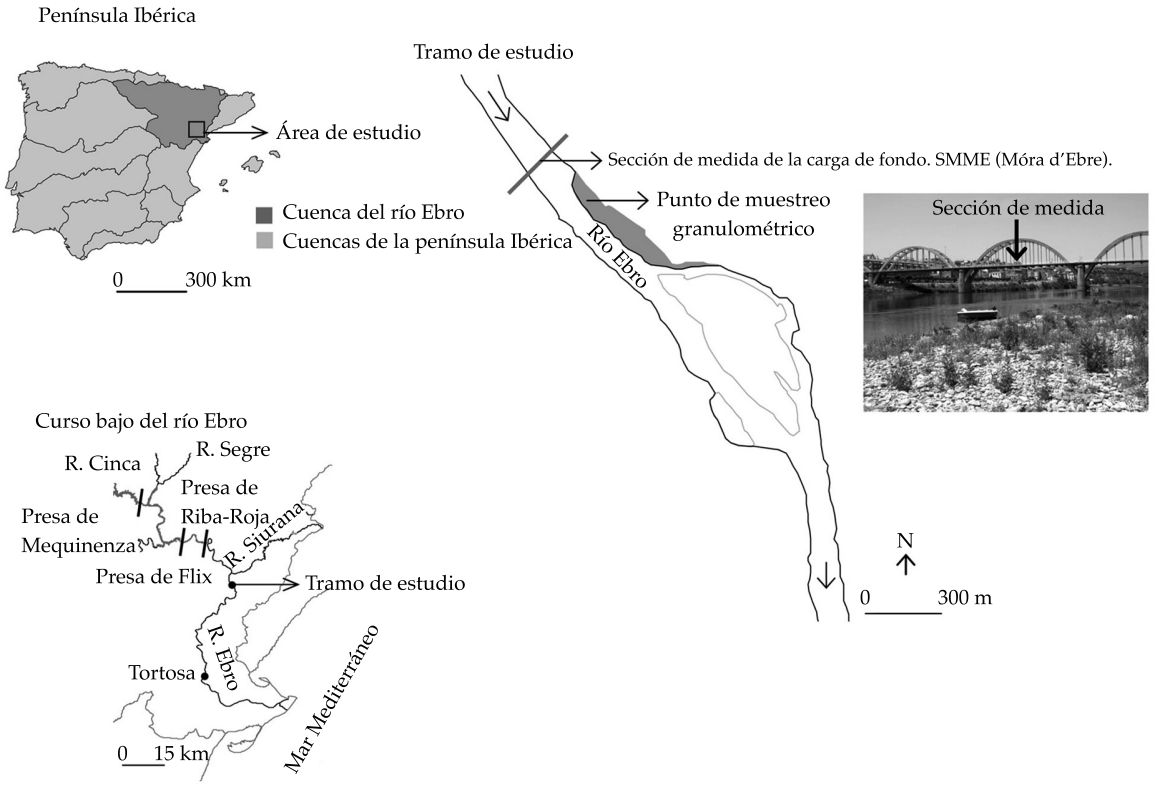

Figura 1. Localización de la zona de estudio en el curso bajo del río Ebro (NE península Ibérica).

periodo de estudio, midiéndose en la mayoría de ellas el transporte de fondo. Algunas fueron crecidas de mantenimiento (*flushing flows*) (Batalla & Vericat, 2009). El caudal máximo registrado durante el periodo de estudio alcanzó los 2 500 $m^3 \cdot s^{-1}$ (aconteció en febrero de 2003), correspondiéndole un periodo de retorno de ocho años, por lo que dicho episodio se consideró una avenida importante en el contexto de la distribución histórica de caudales punta de avenida.

Para el propósito de este estudio, se usó la distribución granulométrica del material del lecho (tanto del material superficial como del subyacente) obtenida en una barra expuesta cercana a la SMME. Dicha barra se encuentra a menos de 500 m aguas abajo de la SMME (distancia equivalente a tres veces el ancho medio del cauce) (figura 1). Es el depósito de grava accesible más cercano a la sección de medida y fue considerado plenamente representativo de la distribución granulométrica del sedimento activo del río. Por otra parte, el sedimento inactivo, el cual fue distinguido por la cubierta vegetal, fue evitado, dado que puede guardar poca relación con el régimen actual del río. El muestreo del material del lecho se llevó a cabo en dos ocasiones: a) en el verano de 2002, justo antes del comienzo del año hidrológico 2002-2003 (material del lecho I, MLI); y b) en el verano de 2003, justo antes del comienzo del año hidrológico 2003-2004 (material del lecho II, MLII). Por lo tanto, pudo establecerse una división cronológica de los datos en función del material del lecho (DML). En el cuadro 1 se muestra el valor de diversos percentiles granulométricos de ambas muestras o divisiones tanto para el material superficial como para el subyacente. La capa superficial más gruesa fue caracterizada mediante el método de conteo de partículas (Wolman, 1954; Rice & Church, 1996) en el caso de MLI. En el caso de MLII, se empleó

Cuadro 1. Percentiles granulométricos del material superficial y subyacente del lecho correspondientes al tramo bajo del río Ebro (500 m aguas abajo de la sección de muestreo de la carga de fondo).

Tamaño de partícula D_i (mm)	Material del lecho I (MLI)[a]		Material del lecho II (MLII)[b]	
	Subyacente	Superficial	Subyacente	Superficial
D_{35}	10	34	12	19
D_{40}	13	39	15	23
D_{50}	19	50	21	33
D_m	26	55	26	38
D_{84}	52	88	48	70

[a] MLI: las muestras se tomaron en 2002, al comienzo del año hidrológico 2002-2003.
[b] MLII: las muestras se tomaron en 2003, al comienzo del año hidrológico 2003-2004.

el método de área por peso (Kellerhals & Bray, 1971) debido a que se detectó una no despreciable proporción de partículas de tamaño inferior a 8 mm. El material subyacente fue muestreado siguiendo el método volumétrico, previa eliminación de la capa superficial (Church, McLean, & Wolcott, 1987).

El número de muestras de transporte de fondo utilizables para el propósito de este estudio resultó de 172 (123 del año 2002-2003 y 49 del año 2003-2004) (véase el cuadro 2). Aproximadamente 96% del intervalo del caudal circulado fue muestreado a efectos de transporte de fondo durante el periodo de estudio. La carga de fondo se midió empleando un muestreador Helley-Smith con boca de 152 mm operado desde una grúa.

El acorazamiento cíclico y la división y tratamiento de la base de datos

El análisis detallado de las características y dinámica del acorazamiento del río Ebro en el tramo de estudio se describió en Vericat *et al*. (2006a). El lecho del río, en el tramo de estudio, experimenta un proceso cíclico de incisión y acorazamiento relacionado con la magnitud del flujo. El análisis granulométrico de las muestras de carga de fondo, junto con observaciones de campo durante el periodo de estudio revelaron que: a) con posterioridad a la primera crecida de diciembre de 2002 la coraza persistía; b) las crecidas acontecidas en febrero y marzo de 2003 alteraron o rompieron la coraza; y c) la coraza puede considerarse ya restablecida durante las avenidas de noviembre y diciembre de 2003 (véase el cuadro 2). Con arreglo a dichas consideraciones se dividieron cronológicamente los datos, en función de las condiciones o estado de la coraza (DEC), constituyéndose tres conjuntos (cuadro 2): 1) coraza sin romper (CSR); 2) coraza rota o alterada (CR), y 3) coraza restablecida (CRe). Asimismo, y en consecuencia, se adoptó una hipótesis de asociación entre cada uno de los tres conjuntos y la fase de transporte de fondo.

Cuadro 2. Clasificación de las mediciones del transporte de fondo en función de la fecha de la crecida, de la división del material del lecho (DML), de la división del estado de la coraza (DEC) y de la fase de transporte de fondo.

Crecidas	*Nb*[a]	*Na*[b]	DML	DEC	Fase del transporte
Diciembre, 2002	40	9	MLI	CSR	Fase 1
Febrero-marzo, 2003	83	15	MLI	CR	Fase 2 o 3
Noviembre-diciembre, 2003	49	17	MLII	CRe	Fase 1

[a]Número total de mediciones del transporte de fondo correspondientes al periodo indicado.
[b]Número de datos del transporte de fondo resultantes de la agrupación de mediciones por clases de caudal líquido y correspondientes al periodo indicado.

Es decir, se consideró que en los conjuntos CSR y CRe, la fase de carga de fondo representativa era la 1, y que las fases 2 o 3 caracterizaban el transporte de fondo en el conjunto CR (cuadro 2). Además, nótese la relación resultante entre los conjuntos integrantes de las divisiones DEC y DML (cuadro 2).

En la figura 2a se ha representado la relación entre las mediciones de caudal líquido (Q) y de transporte de fondo (q_s, expresado en unidades de peso) para los tres conjuntos delimitados por la condición de acorazamiento (DEC). En el cuadro 2 se especifica el número de datos que integran cada uno de los tres conjuntos. La figura 2a desvela un elevado grado de dispersión de los datos; es decir, dado un valor de Q, se registra un amplio intervalo de variación en el valor de q_s (dicho intervalo puede alcanzar una amplitud de incluso varios órdenes de magnitud). El fenómeno de la alta fluctuación temporal de la carga de fondo ha sido ampliamente descrito, incluso en condiciones (medias) de flujo constante, como consecuencia de estocasticidad, migración de formas de fondo, clasificación granulométrica, histéresis o limitación de la disponibilidad de sedimento (p. ej., Recking, Liébault, Peteuil, & Jolimet, 2012). En la figura 2a, las curvas de regresión de los conjuntos CR y CSR discurren en extremos opuestos, representando diferentes condiciones de suministro del material sólido de fondo o fases del transporte. Dado un valor de caudal, una mayor carga de fondo se espera para condiciones CR que para CSR, pues la primera representaría la fase de transporte 1 y la segunda una fase 2 o 3. La curva de regresión de la condición CRe transcurre entre ambos extremos, representando una situación intermedia. Todas estas observaciones deberían considerarse con precaución, habida cuenta del bajo valor del coeficiente de determinación (R^2) de las curvas de regresión, en especial la correspondiente al conjunto CR. En este sentido, una de las técnicas que pueden utilizarse para suavizar el efecto de la fluctuación de la carga de fondo y la consiguiente dispersión de datos es la agrupación de dichos datos en clases de la variable independiente (en este caso, Q). En el presente estudio se agruparon los datos de los tres conjuntos en clases cuya amplitud de intervalo correspondía a 40 $m^3 \cdot s^{-1}$, asignando a cada clase un único valor calculado como el promedio aritmético de los datos incluidos en la clase. En el cuadro 2 se especifica el número de datos que constituyeron cada conjunto según la agrupación descrita. En la figura 2b se observa que la agrupación por clases conllevó

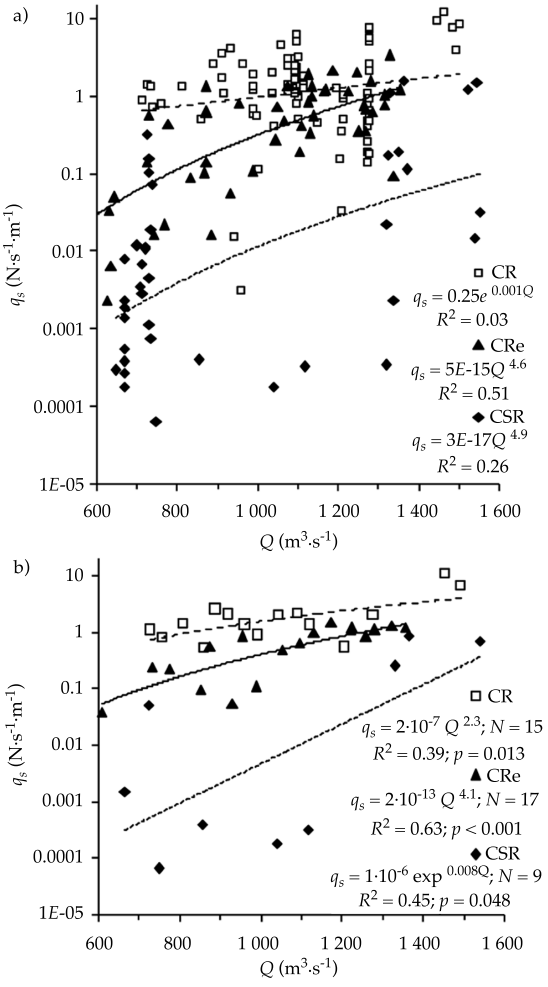

Figura 2. Relación entre las mediciones de caudal líquido (Q) y de transporte de fondo (q_s) para las distintas condiciones de acorazamiento: coraza rota (CR), coraza sin romper (CSR) y coraza restablecida (CRe). Figura 2a: base de datos completa; figura 2b: base de datos agrupada según clases de caudal líquido (Q).

una atenuación importante de la dispersión y, en consecuencia, el valor de R^2 de las curvas de regresión de los tres conjuntos se incrementó de manera notable (en especial el de CR). Puede apreciarse cómo la posición relativa de las tres curvas se mantiene respecto a la de la figura 2a.

Selección de las fórmulas de transporte de fondo en lecho acorazado

El requisito fundamental para la elección de las fórmulas evaluadas fue que hubiesen sido desarrolladas ex profeso para la predicción del transporte de fondo en ríos de grava, teniendo en cuenta de forma explícita el efecto provocado por el acorazamiento del lecho. Dichas fórmulas debían, al menos, permitir el cálculo de la carga de fondo en la fase 2 o 3 del transporte, es decir, cuando el flujo fuera capaz de alterar o romper la coraza. Asimismo, se impuso como requisito que también incorporasen un método de cálculo del umbral de rotura o alteración de la coraza (es decir, de inicio de la fase 2 o 3). Sin embargo, no se consideró preciso que permitiesen la predicción del transporte de fondo en la fase 1, por no ser necesario para cumplir con los objetivos de la presente investigación. En consecuencia, las fórmulas seleccionadas se aplicaron sólo para la condición de coraza rota (CR), involucrando tanto al subconjunto completo (N = 83, véase el cuadro 2) como al subconjunto agrupado (N = 15, véanse los cuadros 2 y 3). Además, como requisito adicional, se obviaron de manera expresa aquellas fórmulas basadas en el cálculo de la carga de fondo por fracciones granulométricas (p. ej., Parker, 1990). En la práctica, la aplicación de este tipo de ecuaciones es difícil debido, por ejemplo, a la frecuente escasez de datos granulométricos completos, al mayor esfuerzo de cálculo o al mayor número de variables que requieren ser medidas en campo (Recking, 2010).

Dadas las restricciones expuestas, las fórmulas finalmente seleccionadas para su evaluación fueron las desarrolladas por Parker *et al*. (1982), Bathurst (2007) y Recking (2010) (referidas en lo sucesivo como P-K-M, B y R, respectivamente). En el cuadro 4 se muestran

Cuadro 3. Valor de las variables hidráulicas para el conjunto agrupado de datos (según clases de caudal líquido y para la condición de coraza rota, CR) (véase el cuadro 2).

Dato	Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	T (m)	y[a] (m)	q_{sm} ($N \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)
A1	727	144	3.43	1.09
A2	759	145	3.50	0.81
A3	810	146	3.62	1.37
A4	861	147	3.74	0.51
A5	888	147	3.80	2.57
A6	921	148	3.88	2.04
A7	962	149	3.97	1.33
A8	993	149	4.05	0.88
A9	1 044	150	4.17	1.99
A10	1 092	151	4.28	2.15
A11	1 121	152	4.35	1.34
A12	1 208	154	4.55	0.54
A13	1 278	155	4.71	2.00
A14	1 454	158	5.13	10.68
A15	1 493	159	5.22	6.66

[a] La sección de estudio puede considerarse hidráulicamente ancha (el valor del radio hidráulico tiende al del calado medio).
Q es el caudal líquido de la corriente; T, el ancho superficial del flujo; y, la profundidad del flujo, y q_{sm} es la carga de fondo unitaria medida.

Cuadro 4. Selección de fórmulas de transporte de fondo de aplicación a ríos con lecho de grava acorazado.

Referencia	Sigla	Variables requeridas[a]	N[b]	Ámbito empírico	Intervalo empírico o de aplicación
Parker *et al*. (1982)	P-K-M	S, g, ρ, ρ_s, y, D_{50s}	—	Río	$D_{50s} < 28$ mm
Bathurst (2007)	B	S, g, ρ, q, D_{84}, D_{50}, D_{50s}	≈ 600	Río	$12 < D_{50}$ (mm) < 146 $30 < D_{84}$ (mm) < 540 $1.52 < D_{50} / D_{50s} < 11$
Recking (2010)	R	S, g, ρ, ρ_s, R, D_{84}, D_{50}	≈ 7 600	Río y laboratorio	$0.02 < S(\%) < 8$ $0.9 < D_{84}$ (mm) < 558

[a]Variables requeridas para el cálculo de la carga de fondo en las fases de transporte 2 o 3.
[b]Número de datos involucrados en el desarrollo de la fórmula.
S es la pendiente longitudinal del cauce; g, la constante de aceleración de la gravedad; ρ y ρ_s, la densidad del agua y de las partículas de sedimento, respectivamente; y, profundidad media del flujo en la sección transversal del cauce; R, el radio hidráulico de la sección transversal del cauce; D_{84} y D_{50}, el tamaño de partícula de la capa superficial del lecho para el que 84 y el 50% de la muestra de sedimento es inferior, respectivamente, y D_{50s} es el tamaño de partícula del material subyacente o subsuperficial del lecho para el que 50% de la muestra de sedimento es inferior.

de forma sintética las variables requeridas y el intervalo experimental o de aplicación de las ecuaciones (nótese que en los tres casos, la base empírica incluye datos de ríos). Puede observarse que tanto el valor de pendiente media del cauce como del tamaño de las partículas de sedimento del tramo de estudio cumplen con los intervalos experimentales de las fórmulas evaluadas. La fórmula *R* permite determinar en cuál de las tres fases teóricas se produce el transporte de fondo (es decir, fase 1, 2 o 3) y predecir el correspondiente valor de caudal sólido. En cambio, la fórmula B sólo predice la carga de fondo en el caso de rotura o alteración de la coraza (sin distinguir de manera explícita entre las fases 2 y 3). Por último, la fórmula P-K-M predice el transporte de fondo solamente en caso de alteración de la coraza y suponiendo que todos los tamaños de partícula inician de manera simultánea su movimiento cuando acontece la condición crítica de alteración o rotura (concepción que guarda mayor relación con la definición de la fase 3 del transporte).

Evaluación estadística de la capacidad predictiva de las fórmulas

La capacidad predictiva de las fórmulas estudiadas se evaluó mediante la comparación de los valores medidos (q_{sm}) y predichos (q_{sp}) de carga de fondo unitaria (caudal de sedimento expresado en peso y por unidad de ancho, en $N \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$). Diversos índices estadísticos y métodos gráficos se emplearon para evaluar dicha capacidad. Los índices utilizados se fundamentan en la relación o razón de discrepancia (r), definida como el cociente entre el valor predicho y el medido ($r = q_{sp} / q_{sm}$). El intervalo de dicha razón es $(0, +\infty)$. En estudios de transporte de fondo en ríos de grava, r puede expandirse en un amplio intervalo de valores: frecuentemente de dos o más órdenes de magnitud (p. ej., Duan, Chen, & Scott, 2006; Recking, 2010). Por consiguiente, las comparaciones estadísticas entre valores predichos y medidos requieren incluir transformaciones logarítmicas e índices que resulten menos sensibles a los valores extremos.

A continuación se exponen los índices estadísticos que se emplearon para evaluar el ajuste entre predicciones y medidas de la carga de fondo. En primer lugar, se calculó el porcentaje de datos cuyo valor de r (q_{sp} / q_{sm}) no superase una proporción de 2 ($0.5 < r < 2$), 5 ($0.2 < r < 5$) y 10 ($0.1 < r < 10$). Asimismo, se empleó la media aritmética de r (mr):

$$mr = (1 / N) \sum_{i=1}^{N} r_i \qquad (1)$$

siendo r_i el i-ésimo valor de r y N el número de datos. Dicho índice varía en el intervalo $(0, +\infty)$, indicando menor discrepancia cuanto más cer-

cano sea su valor a 1. También se usó la media aritmética del logaritmo de r (*mlr*):

$$mlr = (1/N)\sum_{i=1}^{N} \log r_i \qquad (2)$$

denotando r_i el i-ésimo valor de r y N el número de datos. Dicho índice varía en el intervalo $(-\infty, +\infty)$, indicando menor discrepancia cuanto más cercano sea su valor a 0. Asimismo, se usó una modificación de la media geométrica de r (*gr*) (Habersack & Laronne, 2002):

$$gr = (r_1 r_2 \cdots r_i \cdots r_N)^{1/N} \qquad (3)$$

donde se tomó el valor inverso de r_i si $r_i < 1$, para asegurar que $gr \geq 1$. El índice así definido varía en el intervalo $(1, +\infty)$, indicando menor discrepancia cuanto más cercano sea su valor a 1. Además, se utilizó una variación ponderada del índice *gr* (*gpr*) (Habersack & Laronne, 2002):

$$gpr = (rp_1 rp_2 \cdots rp_i \cdots rp_N)^{1/N} \qquad (4)$$

denotando *rp* un valor de r ponderado por la potencia del caudal sólido de fondo medido ($rp = r^{q_{sm}}$) y donde se tomó el valor inverso de rp_i si $rp_i < 1$, para asegurar que $gpr \geq 1$. El índice, así definido, varía en el intervalo $(1, +\infty)$, indicando menor discrepancia cuanto más cercano sea su valor a 1.

Además de los índices estadísticos expuestos, también se emplearon representaciones gráficas de la divergencia entre valores predichos y medidos, que favorecieron una interpretación visual del rendimiento de las fórmulas. Se representó en coordenadas logarítmicas el valor predicho (q_{sp}), en función del valor medido (q_{sm}) para cada uno de los datos de carga de fondo (diagrama de dispersión). Asimismo, se analizó la distribución de la razón de discrepancia (r) mediante un diagrama de cajas representado en escala logarítmica.

La clasificación de las fórmulas evaluadas en función de su rendimiento puede variar dependiendo de las propiedades estadísticas del índice tomado como criterio clasificador. Investigaciones previas (p. ej., Barry, Buffington, & King, 2007) hallaron que dada la frecuencia con la que los índices utilizados cometen errores de sesgo, no existe un índice perfecto para la evaluación estadística del rendimiento de las ecuaciones. Por consiguiente, lo más recomendable es el uso de una adecuada combinación de varios índices, práctica que se siguió en este trabajo. En cualquier caso, para una correcta interpretación de los resultados es necesario tener presente las principales limitaciones de los índices utilizados. Por ejemplo, el índice *mr* es más sensible a valores de r mayores que 1 (p. ej., un valor de $r = 10$ pesa mucho más en el cálculo de *mr* que un valor de 0.1, pese a que de hecho ambos representan una desviación de un orden de magnitud respecto al eje de simetría $r = 1$). Por el contrario, en el índice *mlr*, los errores de igual magnitud pesan lo mismo, con independencia de cuál sea su posición relativa con respecto al eje de simetría $\log r = 0$ (p. ej., $r = 10$ y $r = 0.1$). Sin embargo, una de sus mayores desventajas es que los valores de $\log r$ de igual magnitud y signo contrario se compensan mutuamente y dan lugar a $mlr = 0$. Por lo tanto, es más sensible a desviaciones pequeñas, pero sin simetría (p. ej., si $r_1 = 1.5$ y $r_2 = 2$, entonces $mlr = 0.24$), que a grandes desviaciones que guarden simetría (p. ej., si $r_1 = 0.01$ y $r_2 = 100$, entonces $mlr = 0$). Por último, el índice *gpr*, por su propia definición, es más sensible al error cometido en la predicción de los valores más altos de la carga de fondo medida (q_{sm}).

Resultados y discusión

En los cuadros 5 y 6 se muestran los valores de los índices estadísticos para las tres fórmulas evaluadas para la condición de coraza rota (CR), involucrando al subconjunto completo ($N = 83$, véase el cuadro 2) y al subconjunto agrupado ($N = 15$, véase el cuadro 2), respectivamente. En la figura 3 se representó para cada dato la relación entre el transporte de fondo medido y predicho (según las tres fórmulas evaluadas) para la condición de CR y los subconjuntos completo (figura 3a) y agrupado (figura 3b), respectivamente. Asimismo, en la figura 4,

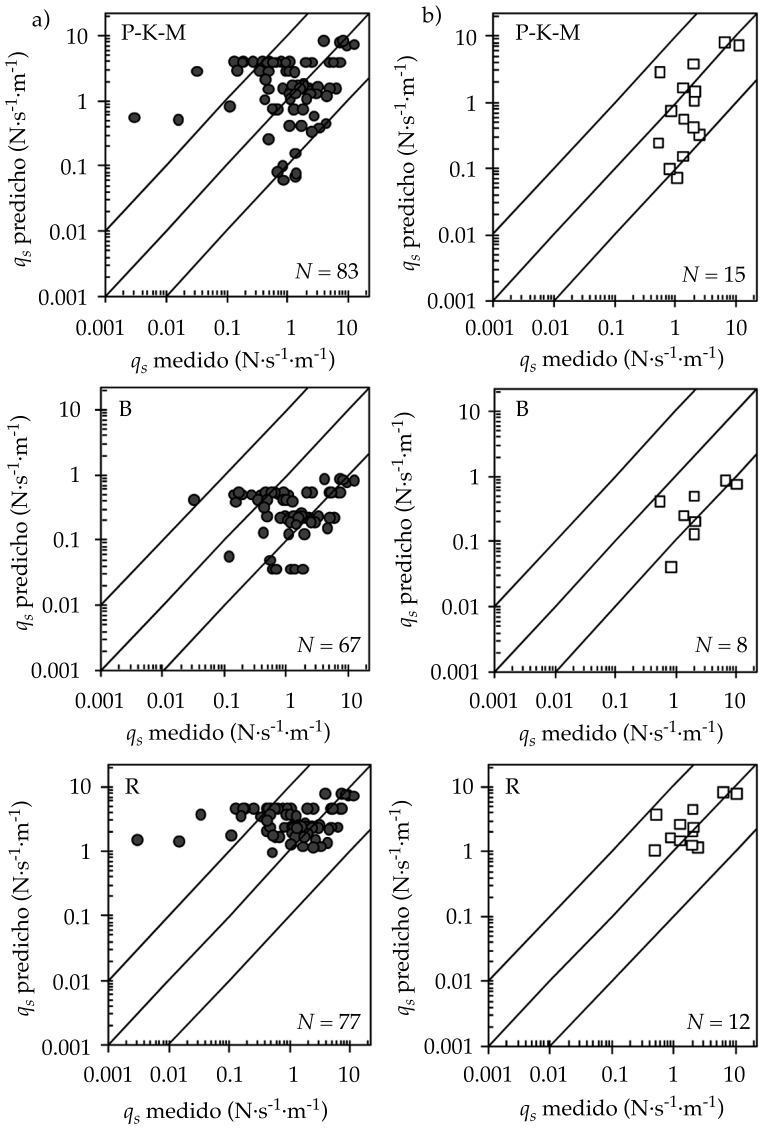

Figura 3. Representación del transporte de fondo predicho por las fórmulas evaluadas en función del transporte de fondo medido. Figura 3a: base de datos completa; figura 3b: base de datos agrupada según clases de caudal líquido (Q). Únicamente se han representado los datos para los que se predijo, transporte de fondo en fase 2 o 3. Las líneas paralelas a la línea de ajuste perfecto ($r = 1$) corresponden a $r = 0.1$ y $r = 10$.

para cada fórmula y subconjunto de datos de la condición CR (es decir, subconjunto completo y agrupado), se representaron los diagramas de cajas correspondientes a la distribución de la relación de discrepancia (r).

En primer lugar se analizó la capacidad de las fórmulas para la predicción del umbral de rotura o alteración de la coraza. Para ello se atendió al valor de los índices *dc* y *ndc* consignados en los cuadros 5 y 6. El índice *dc* se definió como el porcentaje de datos del subconjunto CR (condición de coraza rota), para los que la fórmula predijo rotura de la coraza o fases de transporte 2 o 3. En los cuadros 5 y 6 puede comprobarse que la fórmula P-K-M es la que mejor rendimiento mostró, con un 100% en ambos subconjuntos (completo y agrupado). La fórmula R también alcanzó porcentajes

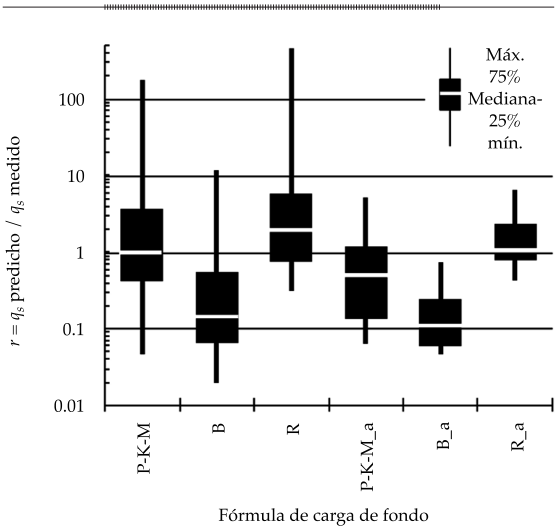

Figura 4. Diagramas de cajas de la distribución de la razón de discrepancia entre el valor predicho y medido de carga de fondo (r). El distintivo (_a) indica que la fórmula se ha aplicado al conjunto de datos agrupado por clases de Q.

elevados, entre 80 y 93%, dependiendo del subconjunto. Por último, el resultado de la fórmula B fue más sensible a la agrupación de datos, ya que su porcentaje descendió de 81 a 53%. En un sentido complementario, el índice *ndc* se definió como el porcentaje de datos de la suma de los subconjuntos CSR y CRe para los que la fórmula no predijo rotura de la coraza o predijo fase de transporte 1. En este caso, el rendimiento de las fórmulas resultó muy inferior al analizado antes. En efecto, las fórmulas B y R, que mostraron resultados similares, no superaron 30% en el mejor de los casos, mientras que la fórmula P-K-M apenas superó 1%. Por consiguiente, en términos generales, en el tramo de estudio, las fórmulas evaluadas predijeron un umbral de rotura o alteración de la coraza que se encontró por debajo del observado. Es decir, predijeron el inicio de la fase de transporte 2 o 3 antes de que ésta se produjera realmente. En función de los resultados expuestos y a efectos prácticos del tramo estudiado, lo más recomendable sería emplear de forma conjunta las fórmulas B y R (evitando, en cualquier caso, el uso de la fórmula P-K-M) para predecir el umbral de rotura o alteración de la coraza, y el inicio de la fase de transporte de fondo 2, aunque teniendo en cuenta que muy probablemente dicho umbral resulte demasiado bajo.

En segundo lugar se analizó la capacidad de las fórmulas evaluadas para predecir la magnitud de la carga de fondo de los datos que integran el conjunto CR tanto para el subconjunto completo como para el agrupado. Es importante señalar respecto a los estadísticos consignados en los cuadros 5 y 6, que su valor se obtuvo involucrando sólo a aquellos datos para los que las fórmulas predijeron rotura o alteración de la coraza, es decir, para el por-

Cuadro 5. Capacidad predictiva de las fórmulas evaluadas respecto a la condición de coraza rota (CR) y subconjunto completo (83 datos). Los valores en negrita y subrayados corresponden a los primeros y segundos mejor clasificados, respectivamente, de acuerdo con cada índice estadístico.

Fórmula	*dc*[a] (%)	*ndc*[b] (%)	*r* (0.5-2)[c] (%)	*r* (0.2-5)[d] (%)	*r* (0.1-10)[e] (%)	*mr*[f] (-)	*mlr* (-)	*gr* (-)	*gpr* (-)
P-K-M	**100**	1.2	43	70	87	6.27	**0.083**	3.4	5.3
B	81	**30**	16	39	64	**0.62**	-0.685	6.1	170
R	93	27	**47**	**77**	**87**	12.45	0.388	**3.2**	**3.2**

[a] Porcentaje de datos correspondientes a la condición de coraza rota (CR), para los que la fórmula predice transporte en fase 2 o 3.
[b] Porcentaje de datos correspondientes a las condiciones de coraza sin romper (CSR) y coraza restablecida (CRe), para los que la fórmula predice transporte en fase 1.
[c] $0.5 < r < 2$, porcentaje de datos cuyo cociente entre el transporte de fondo predicho y el medido (r) no supera un factor de 2.
[d] $0.2 < r < 5$, porcentaje de datos cuyo cociente entre el transporte de fondo predicho y el medido (r) no supera un factor de 5.
[e] $0.1 < r < 10$, porcentaje de datos cuyo cociente entre el transporte de fondo predicho y el medido (r) no supera un factor de 10.
[f] A efectos de comparación y clasificación de la capacidad predictiva de las fórmulas, los valores de *mr* en el intervalo (0, 1) fueron considerados de acuerdo con su recíproco ($1/mr$).

Cuadro 6. Capacidad predictiva de las fórmulas evaluadas respecto a la condición de coraza rota (CR) y subconjunto agrupado (15 datos). Los valores en negrita y subrayados corresponden a los primeros y segundos mejor clasificados, respectivamente, de acuerdo con cada índice estadístico.

Fórmula	*dc*[a] (%)	*ndc*[b] (%)	*r* (0.5-2)[c] (%)	*r* (0.2-5)[d] (%)	*r* (0.1-10)[e] (%)	*mr*[f] (-)	*mlr* (-)	*gr* (-)	*gpr* (-)
P-K-M	**100**	0	47	67	93	**0.90**	-0.33	3.1	6.6
B	53	**19**	13	25	50	0.20	-0.88	7.6	1 842
R	80	15	**75**	**92**	**100**	1.73	**0.12**	**1.7**	**2.9**

[a] Porcentaje de datos correspondientes a la condición de coraza rota (CR), para los que la fórmula predice transporte en fase 2 o 3.
[b] Porcentaje de datos correspondientes a las condiciones de coraza sin romper (CSR) o coraza restablecida (CRe), para los que la fórmula predice transporte en fase 1.
[c] $0.5 < r < 2$, porcentaje de datos cuyo cociente entre el transporte de fondo predicho y el medido (r) no supera un factor de 2.
[d] $0.2 < r < 5$, porcentaje de datos cuyo cociente entre el transporte de fondo predicho y el medido (r) no supera un factor de 5.
[e] $0.1 < r < 10$, porcentaje de datos cuyo cociente entre el transporte de fondo predicho y el medido (r) no supera un factor de 10.
[f] A efectos de comparación y clasificación de la capacidad predictiva de las fórmulas, los valores de *mr* en el intervalo (0, 1) fueron considerados de acuerdo con su recíproco ($1/mr$).

centaje de datos especificado en el estadístico *dc*. Lo anterior también se aplicó a la hora de representar los gráficos de las figuras 3 y 4. Ello debe tenerse presente a la hora de valorar la comparación de la capacidad predictiva de las tres fórmulas entre sí, ya que el conjunto de datos no resultó ser exactamente el mismo. Además, como ya se advirtió en el apartado de métodos, la clasificación del rendimiento de las fórmulas puede variar en función del estadístico tomado como referencia.

En términos generales, la capacidad predictiva de las fórmulas evaluadas fue relativamente baja. El valor medio para las tres (involucrando al conjunto CR, sin agrupar) del porcentaje de datos con una desviación de la carga de fondo predicha respecto a la medida inferior a un factor de 2 ($0.5 < r < 2$), 5 ($0.2 < r < 5$) y 10 ($0.1 < r < 10$) fue de 35, 62 y 79%, respectivamente. Aunque tal grado de divergencia pueda parecer elevado es del mismo orden y frecuentemente menor que el hallado en investigaciones previas sobre el rendimiento de fórmulas de carga de fondo en ríos de grava. Por ejemplo, a modo de muestra de publicaciones precedentes, el valor promedio correspondiente a desviaciones inferiores a un factor de 2, 5 y 10 fue de 19, 44 y 75%, respectivamente, en el estudio de Martin (2003); de 11, 25 y 47%, respectivamente, en el trabajo de Martin y Ham (2005), y de 13, 27 y 34% en la investigación de Recking (2010). Además, debe tenerse en cuenta que las mediciones de la carga de fondo, en el tramo de estudio, fueron cuasi-instantáneas (es decir, de corta duración respecto a la duración total del episodio de avenida) y se ha encontrado que cuanto mayor es la duración del periodo de medida mayor es el rendimiento de las fórmulas evaluadas (Recking *et al*., 2012).

En la figura 4 se representaron los diagramas de cajas de la distribución de la razón de discrepancia entre el valor de carga de fondo predicho por cada fórmula y el medido (r) tanto para el subconjunto completo como para el agrupado. Al comparar los diagramas correspondientes a los dos subconjuntos (completo y agrupado) para una misma fórmula, se comprobó cómo la eliminación de la fluctuación por clases (motivada por la agrupación de datos) produjo una acusada reducción de la dispersión en los valores de la razón de discrepancia (r) para las tres ecuaciones. Ello fue acompañado de una disminución del valor de la mediana de la distribución para las tres fórmulas, debido a que la reducción de la dispersión no fue simétrica sino que fue mucho más intensa para los valores de r mayores de 1.

En términos generales, en los cuadros 5 y 6 se observó que la fórmula B es la que mostró una menor capacidad predictiva tanto para el subconjunto completo (cuadro 5) como para subconjunto agrupado (cuadro 6). La única

excepción se dio para el índice *mr* y el subconjunto completo (cuadro 5). En dicho caso, la fórmula B resultó la mejor clasificada debido al sesgo del índice *mr* respecto a los valores de *r* muy superiores a 1, mucho más frecuentes en el caso de las fórmulas P-K-M y R (figura 4). La fórmula R fue la que mostró un mayor ajuste entre predicción y medición, salvo algunas pocas excepciones. Dos de las excepciones se dieron para el índice *mr* (cuadros 5 y 6) y fueron motivadas por la mayor sensibilidad de dicho estadístico con respecto a valores de *r* muy superiores a 1, como se ha expuesto más arriba. La otra excepción, que se dio para el subconjunto completo y conforme al valor del índice *mlr* (cuadro 5), se atribuyó a la baja sensibilidad de dicho estadístico cuando las desviaciones se disponen de forma simétrica (lo que se pone de manifiesto en la figura 3a, al comparar los diagramas de dispersión de las fórmulas R y P-K-M, la ecuación mejor clasificada en este caso). La fórmula P-K-M se clasificó mayoritariamente en segunda posición, si bien su valor en los estadísticos se aproximó mucho más a la fórmula R que a la B (figuras 3 y 4). Asimismo, las fórmulas P-K-M y R predijeron con mucho menor error los datos de mayor magnitud de carga de fondo medida y, por el contrario, para los valores más bajos de transporte de fondo registrado, el error de predicción fue en comparación mucho más elevado (figura 3).

Más allá del grado de ajuste concreto entre medición y predicción, es de interés conocer si una fórmula tiende a la sobrepredicción o la infrapredicción del transporte de fondo. En las figuras 3 y 4 se observó la acusada tendencia de la fórmula B a predecir valores de la carga de fondo inferiores a los medidos. Igualmente la fórmula P-K-M mostró tendencia a la infrapredicción, aunque en un grado mucho más moderado. Por último, la fórmula R tendió a sobrestimar las mediciones de carga de fondo, aunque con un sesgo también comparativamente leve. Las tendencias descritas lo son en términos generales, es decir, abarcando e integrando toda la amplitud del intervalo de carga de fondo medida. Sin embargo, resulta también de utilidad conocer si la tendencia varía en función de la magnitud de otras variables correlacionables con la carga de fondo, por ejemplo, el caudal líquido. Para ello, en la figura 5 se representaron, en función del caudal líquido medido (Q), los datos del conjunto de condición CR (subconjunto agrupado), su curva de regresión y las curvas de regresión correspondientes a las tres fórmulas evaluadas. La figura 5 develó claramente: la infrapredicción sistemática de la fórmula B para todo el rango de caudal, que para caudales inferiores a aproximadamente 1 100 m^3/s, la fórmula R es la que más se ajustó y que para caudales superiores a dicho valor se dio poca diferencia entre las predicciones de las fórmulas P-K-M y R.

Cabe advertir que en el desarrollo de la fórmula de Recking (2010) se involucraron 46 datos pertenecientes al subconjunto de condición CRe (cuadro 2), tomados de Vericat *et al*. (2006b). Sin embargo, dado que únicamente se utilizaron (junto a más de 3 000 datos) para verificar el rendimiento de la fórmula y no para su ajuste o calibración, ello no compromete la independencia de la base datos del presente estudio respecto a la fórmula R. Asimismo, im-

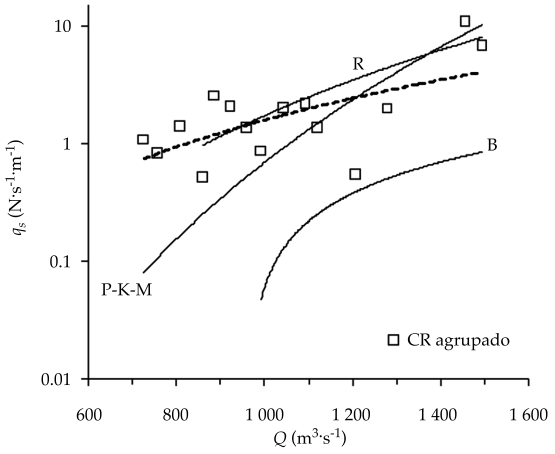

Figura 5. Relación entre las mediciones de caudal líquido (Q) y de transporte de fondo (q_s) para el conjunto coraza rota (CR) y su curva de regresión (en trazado discontinuo) representadas junto a las curvas de regresión de las fórmulas P-K-M, B y R para el mismo conjunto de datos.

porta destacar que los resultados de la presente investigación pueden ser sensibles al periodo de muestreo (dos años) y al hecho de que las mediciones de carga de fondo se limitaron a un único tramo de río. Un periodo de muestreo más prolongado hubiese podido revelar diferencias en la distribución de la carga de fondo medida, pudiendo a su vez originar cambios en el rendimiento de las fórmulas evaluadas. No obstante, algunas de las ventajas de los años concretos que se registraron radican en que éstos representan años hidrológicos medios, que permitieron observar de manera significativa, y poco habitual en ríos de esta magnitud, diferentes etapas del ciclo de acorazamiento del lecho, variando entre un lecho más estabilizado debido a la presencia de una coraza bien desarrollada y otro lecho más móvil a causa del efecto de la rotura o alteración de la coraza.

Conclusiones

La investigación se considera de aplicación práctica directa al tramo de estudio (p. ej., diseño de crecidas de mantenimiento o inyección de gravas), aunque la metodología e incluso los propios resultados podrían considerarse extrapolables a ríos de grava acorazados de características hidráulicas, sedimentarias y geomorfológicas similares.

En términos generales, las fórmulas evaluadas predijeron umbrales de rotura o alteración de la coraza que se encontraban por debajo de los observados; es decir, predijeron el inicio de la fase 2 o 3 antes de que ésta tuviese lugar. Sin embargo, se detectaron importantes diferencias entre las tres ecuaciones, lo que conlleva implicaciones prácticas. En efecto, dado su mejor resultado relativo, se recomienda aplicar las ecuaciones B y R como predictores del umbral de rotura de la coraza en el tramo de estudio y se desaconseja el uso de la ecuación P-K-M.

Para la predicción de la carga de fondo en las fases 2 o 3 del transporte, y después de calcular el umbral de rotura o alteración de la coraza de acuerdo con las recomendaciones anteriormente expuestas, se propone la aplicación de las fórmulas P-K-M y R. Ello, teniendo en cuenta que, en términos generales, la primera tendió a la infrapredicción y que la segunda mostró un sesgo hacia la sobrepredicción. Se desaconseja el uso de la fórmula B, dado que infrapredijo de manera acusada. En cualquier caso, debe tenerse presente que el rendimiento de las fórmulas hallado en este estudio se encontró dentro del orden de magnitud del rendimiento referido en investigaciones previas, e incluso fue mayor.

Agradecimientos

La presente investigación fue llevada a término en el marco de los proyectos REN2001-0840-C02-01/HID, CGL2005-06989-C02-02/HID, CGL2006-11679-C02-01/HID, CGL2009-09770 (subprograma BTE), SCARCE Consolider Ingenio 2010 CSD2009-00065 y CGL2012-36394, todos ellos concedidos por el Ministerio Ciencia y Tecnología de España. El segundo autor fue beneficiario de una beca Juan de la Cierva (JCI-2008-2910) y de una beca Ramón y Cajal (RYC-2010-06264), ambas otorgadas por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Los datos hidrológicos fueron suministrados por la Confederación Hidrográfica del Ebro. El Ayuntamiento de Móra d'Ebre facilitó apoyo logístico durante el trabajo de campo. Albert Rovira colaboró durante el trabajo de campo y de laboratorio. Se agradece a los árbitros anónimos su contribución para la mejora del artículo.

Referencias

Barry, J. J., Buffington, J. M., & King, J. G. (2007). Correction to a General Power Equation for Predicting Bed Load Transport Rates in Gravel Bed Rivers. *Water Resources Research*, *43*(8), W08702, http://dx.doi.org/10.1029/2007WR006103.

Batalla, R. J., Gomez, C. M., & Kondolf, G. M. (2004). Reservoir-Induced Hydrological Changes in the Ebro River Basin (Northeastern Spain). *J. Hydrol.*, *290*(1-2), 117-136, doi: 10.1016/j.jhydrol.2003.12.002.

Batalla, R. J., & Vericat, D. (2009). Hydrological and Sediment Transport Dynamics of Flushing Flows: Implications for Management in Large Mediterranean Rivers. *River Res. Appl.*, *25*(3), 297-314, doi: 10.1002/rra.1160.

Bathurst, J. C. (2007). Effect of Coarse Surface Layer on Bed-load Transport. *J. Hydraul. Eng.*, *133*(11), 1192-1205.

Chin, C. O., Melville, B. W., & Raudkivi, A. J. (1994). Streambed Armouring. *J. Hydraul. Eng.*, *120*(8), 899-918.

Church, M., McLean, D. G., & Wolcott, J. F. (1987). River Bed Gravels: Sampling and Analysis. In C. R. Thorne, J. C. Barthurst & R. D. Hey (Eds.), *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers* (pp. 43-88). Chichester, UK: John Wiley and Sons.

Duan, J. G., Chen, L., & Scott, S. (2006). Application of Surface-based Bed Load Transport Equations to a Desert Gravel-bed Stream. *J. Hydraul. Res.*, *44*(5), 624-630.

Habersack, H., & Laronne, J. B. (2002). Evaluation and Improvement of Bed Load Discharge Formulas Based on Helley-Smith Sampling in an Alpine Gravel Bed River. *J. Hydraul. Eng.*, *128*(5), 484-499.

Jackson, W. L., & Beschta, R. L. (1982). A Model of Two-Phase Bed-Load Transport in an Oregon Coast Range Stream. *Earth Surf. Proc. Land.*, 7(6), 517-527.

Kellerhals, R., & Bray, D. I. (1971). Sampling Procedures for Coarse Fluvial Sediments. *J. Hydraul. Div.*, *97*(8), 1165-1180.

López, R., & Justribó, C. (2010). The Hydrological Significance of Mountains: A Regional Case Study, the Ebro River Basin, Northeast Iberian Peninsula. *Hydrol. Sci. J.*, *55*(2), 223-233, doi:10.1080/02626660903546126.

Martin, Y. (2003). Evaluation of Bed Load Transport Formulae Using Field Evidence from the Vedder River, British Columbia. *Geomorphology*, *53*, 75-95.

Martin, Y., & Ham, D. (2005). Testing Bed Load Transport Formulae Using Morphologic Transport Estimates and Field Data: Lower Fraser River, British Columbia. *Earth Surf. Process. Land.*, *30*(10), 1265-1282.

Martín-Vide, J. P. (2013). Erosion, Sedimentation and Restoration of Rivers. Engineering and Research Examples. *Water Technology and Sciences*, *4*(5), 5-18.

Meyer-Peter, E., & Müller, R. (VI, 1948). Formulas for Bed-load Transport. In W. Fellenius (Presidencia), 2nd Meeting of the Int. Assoc. for Hydraulic Structures Res. IAHR, Stockholm, Sweden.

Parker, G. (1990). Surface-Based Bedload Transport Relation for Gravel Rivers. *J. Hydraul. Res.*, *28*(4), 417-436.

Parker, G., Klingeman, P. C., & McLean, D. G. (1982). Bedload and the Size Distribution of Paved Gravel-bed Streams. *J. Hydraul. Div.*, *108*(4), 544-571.

Parker, G., & Sutherland, A. J. (1990). Fluvial Armor. *J. Hydraul. Res.*, *28*(5), 529-544.

Re, M., Kazimierski, L. D., & Menéndez, A. N. (2014). Sedimentation in Navigation Channels Under the Context of Climate Change. *Water Technology and Sciences*, *5*(1), 5-21.

Recking, A. (2010). A Comparison between Flume and Field Bed Load Transport Data and Consequences for Surface Based Bed Load Transport Prediction. *Water Resources Research*, *46*(3), W03518, http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008007.

Recking, A., Liébault, F., Peteuil, C., & Jolimet, T. (2012). Testing Several Bed Load Transport Equations with Consideration of Time Scales. *Earth Surf. Proc. Land.*, *37*(7), 774-789, http://dx.doi.org/10.1002/esp.3213.

Rice, S., & Church, M. (1996). Sampling Surficial Fluvial Gravels: the Precision of Size Distribution Percentile Estimates. *J. Sediment. Res.*, *66*(3), 654-665.

Schoklitsch, A. (1950). *Handbuch des Wasserbaues*. New York: Springer.

Vericat, D., & Batalla, R. J. (2006). Sediment Transport in a Large Impounded River: the Lower Ebro, NE Iberian Peninsula. *Geomorphology*, *79*(1-2), 72-92, doi: 10.1016/j.geomorph.2005.09.017.

Vericat, D., Batalla, R. J., & Garcia, C. (2006a). Breakup and Reestablishment of the Armour Layer in a Highly Regulated Large Gravel-bed River: The Lower Ebro. *Geomorphology*, *76*(1-2), 122-136, doi: 10.1016/j.geomorph.2005.10.005.

Vericat, D., Church, M., & Batalla, R. J. (2006b). Bed Load Bias: Comparison of Measurements Obtained Using Two (76 and 152 mm) Helley-Smith Samplers in a Gravel-bed River. *Water Resources Research*, *42*(1), W01402, http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004025.

Wilcock, P. R., & DeTemple, B. T. (2005). Persistence of Armour Layers in Gravel-bed Streams. *Geophys. Res. Lett.*, *32*(8), L08402, doi:10.1029/2004GL021772.

Wolman, M. G. (1954). A Method of Sampling Coarse Bed Material. *Eos Trans. AGU.*, *35*(6), 951-956.

Dirección institucional de los autores

Dr. Raúl López

Grupo de Investigación de Dinámica Fluvial-RIUS
Departamento de Ingeniería Agroforestal
Universidad de Lleida
Av. Alcalde Rovira Roure, 191
E-25198 Lleida (Cataluña), España
Teléfono: +(34) 973 70 2820
Fax +(34) 973 70 2673
rlopez@eagrof.udl.cat

Dr. Damià Vericat

Grupo de Investigación de Dinámica Fluvial-RIUS
Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo
Universidad de Lleida
Av. Alcalde Rovira Roure, 191
E-25198 Lleida (Cataluña), España
Teléfono: +(34) 973 00 3735
Fax +(34) 973 70 2613
dvericat@macs.udl.cat

Centro Tecnológico Forestal de Cataluña
Pujada del Seminari s/n
E-25240 Solsona (Cataluña), España

Institute of Geography and Earth Sciences
Aberystwyth University
Ceredigion SY23 3DB, Wales, United Kingdom

Dr. Ramon J. Batalla

Grupo de Investigación de Dinámica Fluvial-RIUS
Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo
Universidad de Lleida
Av. Alcalde Rovira Roure, 191
E-25198 Lleida (Cataluña), España
Teléfono: +(34) 973 70 26 76
Fax +(34) 973 70 26 13
rbatalla@macs.udl.cat

Centro Tecnológico Forestal de Cataluña
Pujada del Seminari s/n
E-25240 Solsona (Cataluña), España

Instituto Catalán de Investigación del Agua
Parc Científic i Tecnològic de la Universitat de Girona,
Edificio H2O
Emili Grahit ,101
E-17003 Girona (Cataluña), España