

Modelación numérica bidimensional de la dinámica sedimentaria del río Ebro en Castejón

Ribé Forn, Martí^a, Bladé Castellet, Ernest^b, Dolz Ripollès, Josep^c

Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya) ^amarti.ribe@upc.edu, ^bernest.blade@upc.edu, ^cj.dolz@upc.edu.

Línea temática A | Dinámica fluvial de embalses, estuarios y humedales

RESUMEN

El objeto de este estudio consiste en la construcción y calibración de un modelo numérico para la simulación de la dinámica sedimentaria del tramo de río Ebro comprendido entre los puentes de la N-113 y de la autopista AP-15 en Castejón, para su posterior aplicación a otros tramos del mismo río.

Se ha analizado numéricamente mediante el modelo Iber la dinámica sedimentaria del tramo del río cuyas batimetrías se obtuvieron durante las campañas anterior y posterior a las importantes avenidas que tuvieron lugar entre enero y marzo de 2015.

Una vez incorporada la geometría del cauce al modelo, se han simulado los caudales circulantes en el período comprendido entre las dos batimetrías y la evolución del cauce así obtenida se ha comparado con la que muestra la diferencia entre ambas batimetrías, lo que ha permitido calibrar los parámetros del modelo.

Mediante el modelo calibrado se dispone ahora de una herramienta que permite reproducir la dinámica sedimentaria de un tramo del río Ebro. Esta herramienta puede resultar útil para poder describir el comportamiento de otros tramos del mismo río.

Palabras clave | calibración; dinámica sedimentaria; modelación numérica; Iber; avenida; transporte de fondo; hidrodinámica fluvial; Ebro.

INTRODUCCIÓN

Agua abajo de la incorporación del Aragón, el cauce del río Ebro presenta una intensa dinámica sedimentaria: deposita o erosiona en función de los caudales circulantes y de su procedencia (Ebro y/o Arga- Aragón). Ello tiene repercusión en los niveles alcanzados por el agua en situación de avenida, como ha puesto de manifiesto la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) al correlacionar, para un mismo episodio, los niveles máximos en las estaciones de aforos de Castejón, Zaragoza y otras intermedias.

Para analizar la problemática expuesta, se ha analizado numéricamente la dinámica sedimentaria mediante el modelo Iber del tramo de río comprendido entre los puentes de la N-113 y de la autopista AP-15 (unos 2,5 km) en el cual se han realizado dos batimetrías de precisión, una antes y una después de las avenidas acaecidas en enero-febrero-marzo de 2015, y se han calibrado los parámetros del modelo para ajustar el comportamiento real del río.

MATERIAL Y MÉTODOS

El modelo Iber

El estudio se ha realizado utilizando la herramienta de modelización bidimensional del flujo de agua en régimen variable Iber. Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos

medioambientales en hidráulica fluvial. La herramienta ha sido desarrollada conjuntamente entre el Instituto Flumen, el grupo GEAMA de la Universidade da Coruña y CIMNE con la colaboración del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Ministerio de Fomento y Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España).

El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la evaluación de zonas inundables, la simulación de rotura de presas, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios.

El modelo Iber consta actualmente de 4 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia, un módulo de calidad de aguas y un módulo de transporte de sedimentos. Iber resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas en dos dimensiones, o ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, sobre una malla de volúmenes finitos, que puede ser irregular y no estructurada, formada por triángulos, cuadriláteros o combinaciones de ambos.

Parámetros del modelo objeto de ajuste

Para el presente estudio, se han utilizado el módulo hidrodinámico y el módulo de transporte de sedimentos. A continuación, se describen brevemente los parámetros de éstos módulos que han servido para la posterior calibración del modelo.

- Ecuación de transporte de fondo

El caudal sólido de fondo se calcula a partir de formulaciones empíricas. La ecuación genérica (1) utilizada en el presente estudio es la siguiente:

$$q_{sb}^* = \alpha \cdot (t_{bs}^* - t_c^*)^{3/2} \quad (1)$$

Donde t_{bs}^* es la tensión de fondo adimensional calculada a partir de los resultados hidrodinámicos y α y t_c^* son los parámetros de calibración. El parámetro t_c^* representa una tensión crítica adimensional, por debajo de la cual no hay transporte de fondo. Esta ecuación, para $\alpha = 3.97$ y $t_c^* = 0.0495$ corresponde a la conocida ecuación de Mayer-Peter y Müller, con la corrección propuesta por Wong y Parker (2006).

- Condiciones de contorno

Se han introducido dos condiciones de contorno en el modelo que han sido objeto de calibración:

- Curva de gasto

Es la relación entre caudal y cota de agua en la salida del modelo. La explicación de este parámetro se presenta de forma detallada en el apartado 3.3. Curva de gasto extremo aguas abajo.

- Entrada de sedimento

Se ha considerado una condición de contorno de transporte de sedimento de fondo igual a la capacidad de arrastre. Este caso se ha identificado con la simbología x1, que indica que se ha considerado la capacidad de arrastre calculada por el programa Iber. Se han analizado casos con una entrada mayor de sedimento, multiplicando el valor calculado por x1,5, x2, x3 y x4.

- Manning

Se han considerado tres escenarios distintos para el coeficiente de Manning. Estos casos se resumen en la tabla 1 y la distribución en planta de dichos valores se muestra en la figura 1a para el caso M0 y en la figura 1b para los casos M1 y M2.

Tabla 1 | Valores del coeficiente de Manning.

M0		M1			M2		
Río	Bosque	Río	Bosque	Pradera	Río	Bosque	Pradera
0,025	0,12	0,025	0,12	0,05	0,025	0,12	0,1

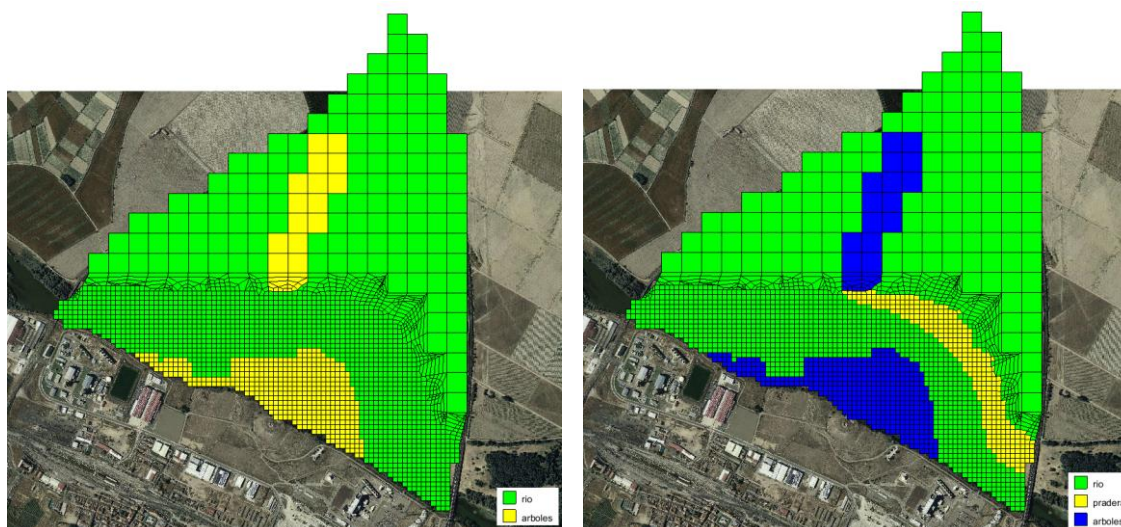


Figura 1 | Distribución en planta del valor del Manning (a) para el caso M0 y (b) para los casos M1 y M2.

- Diámetro del sedimento

Las observaciones del trabajo de campo han permitido establecer un tamaño medio de sedimento de 5 cm. Por ello, se han modelado la mayoría de los casos con este valor, a excepción de algún caso con distintos valores para observar su efecto. Se ha determinado que para un tamaño menor, de 2 cm, los resultados que se obtienen responden muy mal al comportamiento real, mientras que para pequeñas variaciones del tamaño la variación es poco significativa.

Se ha considerado el tamaño medio de 5 cm a pesar de que la zona de estudio presenta una gran heterogeneidad en el tipo y tamaño de sedimento. Existen zonas donde se encuentran principalmente arenas y otras con bolos de dimensiones considerables. El modelo numérico utilizado no contempla la posibilidad de considerar granulometrías con más de un tamaño de sedimento, lo que constituye una simplificación importante.

Trabajo de campo

- Batimetrías

En el tramo del río Ebro (unos 2,6 km) comprendido entre los puentes de la N-113 y de la autopista AP-15 se han realizado dos batimetrías para conocer la evolución del cauce en el período comprendido entre la realización de las mismas (Dolz, J. et al., 2015). En este período (enero-febrero-marzo de 2015) tuvo lugar una importante avenida en el río Ebro. De éste modo se ha podido conocer como estas avenidas han afectado a la morfología del cauce (Dolz, J. et al., 2015).

La figura 2 corresponde a la batimetría anterior a la avenida, y es la que ha sido usada como referencia para la modelización con el programa Iber.

La figura 3 es la batimetría posterior a la avenida. Esta ha servido para comparar ambas y obtener las zonas donde ha habido erosión (figura 4) y en las que ha habido sedimentación (figura 5).

Finalmente, la figura 6 muestra el gráfico de volumen acumulado de sedimento total, de erosión y de sedimentación, a lo largo del río.

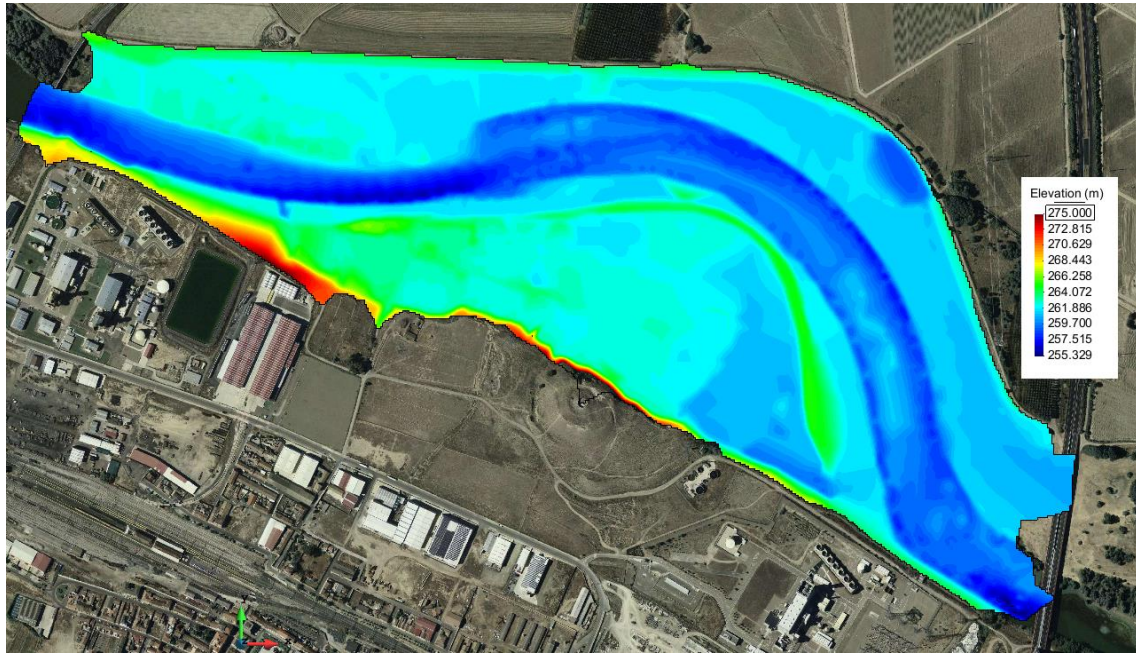


Figura 2 | Visualización de la batimetría anterior a la avenida con el programa Iber.

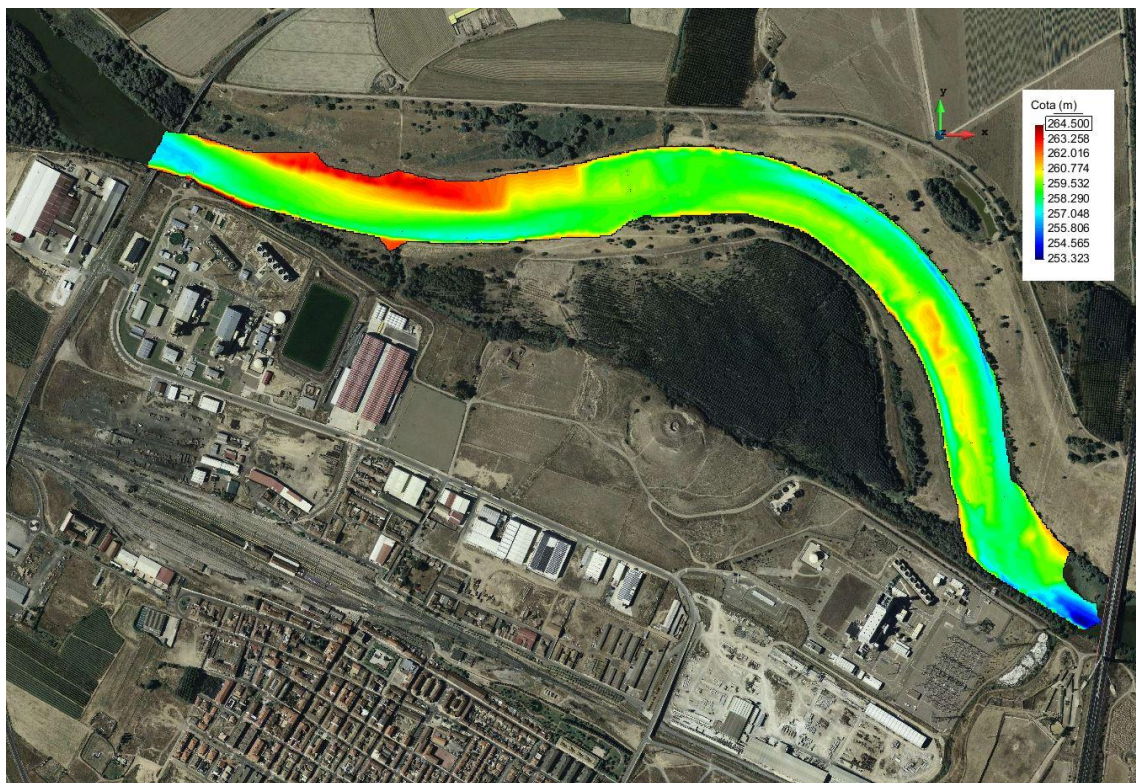


Figura 3 | Visualización de la batimetría posterior a la avenida con el programa Iber.

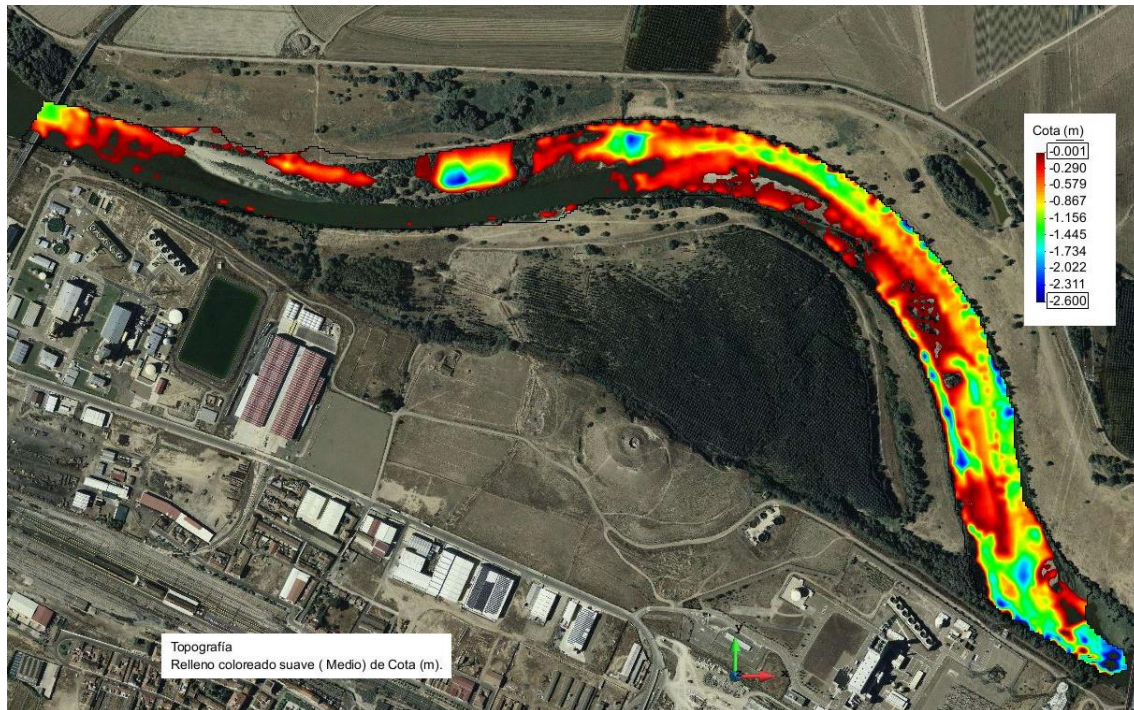


Figura 4 | Mapa de erosión (diferencia negativa entre batimetrías).

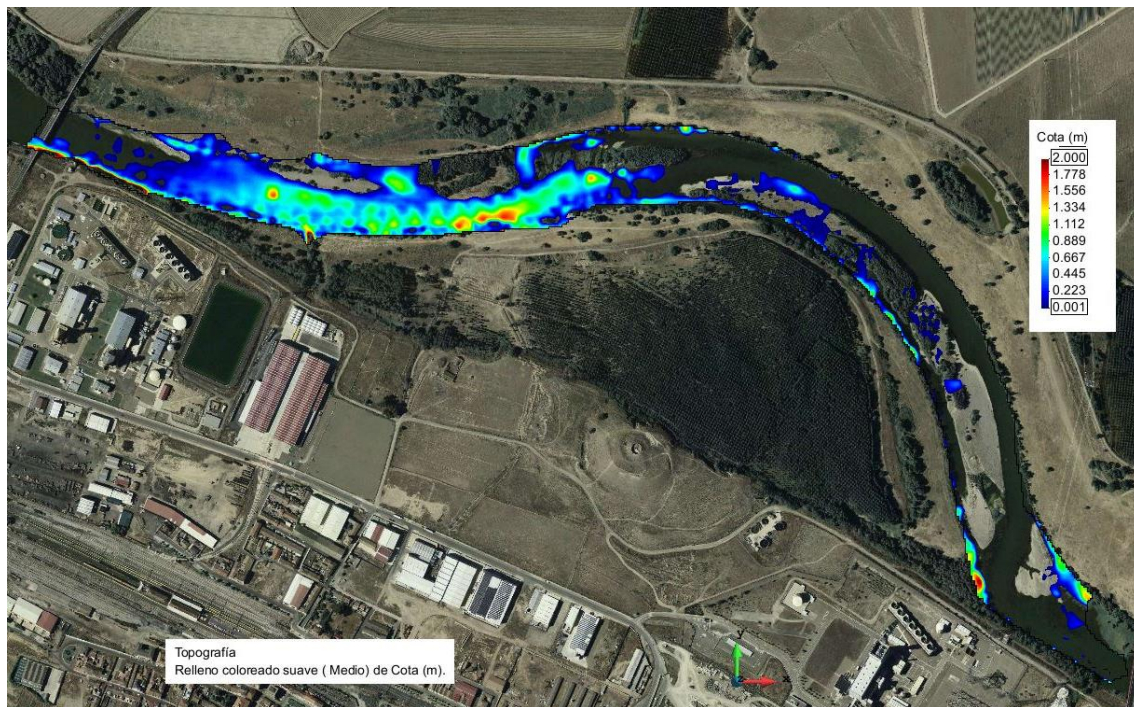


Figura 5 | Mapa de sedimentación (diferencia positiva entre batimetrías).

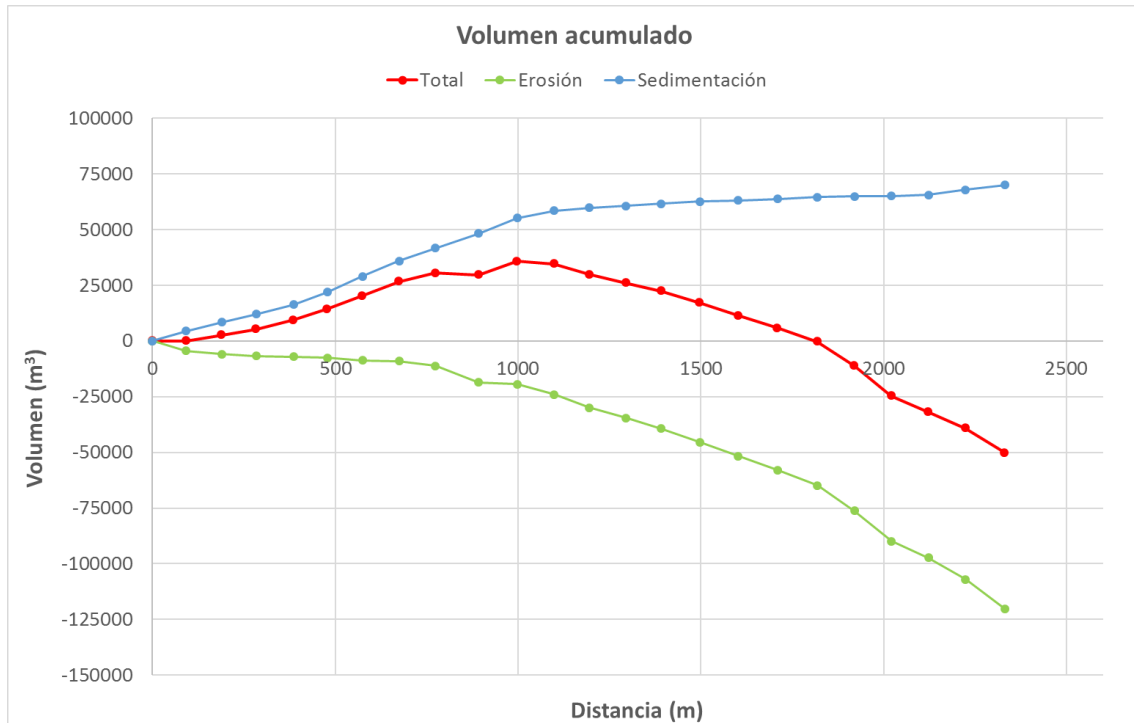


Figura 6 | Gráfico de volumen acumulado de sedimento a lo largo del río.

- Hidrograma extremo aguas arriba

El hidrograma de avenida para el período enero-febrero-marzo de 2015 se ha obtenido a partir de los datos de la estación de aforo de Castejón de Ebro. En la figura 7 se muestra dicho hidrograma, que ha sido utilizado como dato de entrada al modelo Iber.

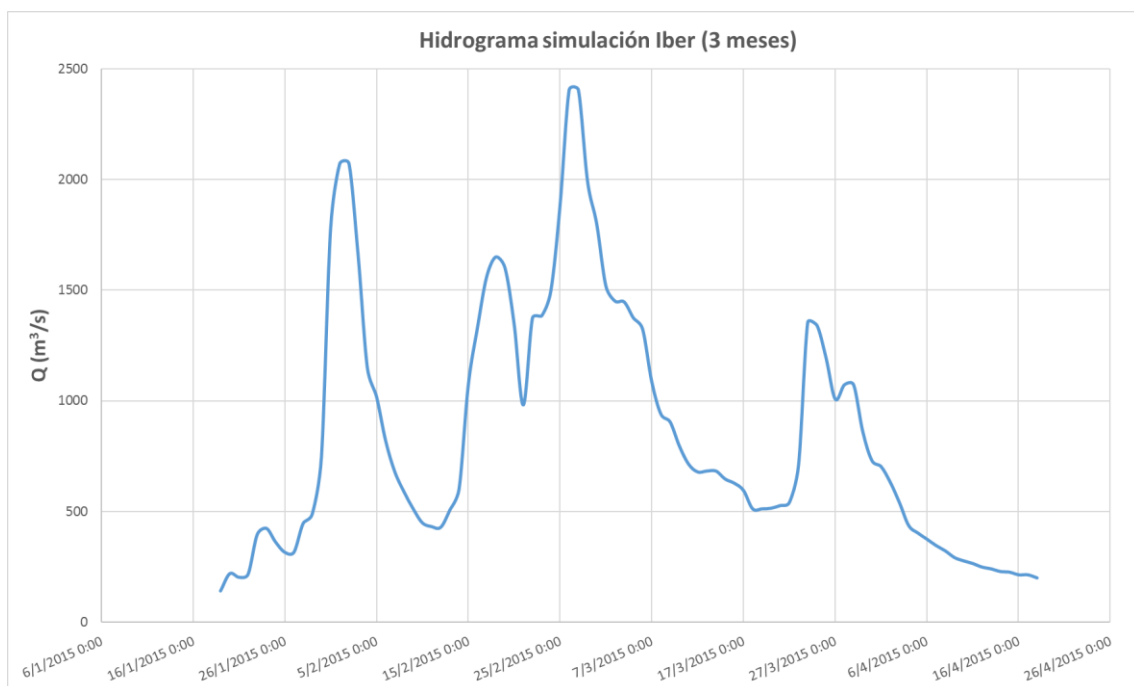


Figura 7 | Hidrograma en la estación de aforo de Castejón del período enero-febrero-marzo de 2015.

- Curva de gasto extremo aguas abajo

La obtención de la curva de gasto (relación del caudal con el calado) aguas abajo del modelo, en la zona próxima al puente de la autopista AP-15, se ha podido obtener gracias a los datos facilitados Iberdrola, que dispone de datos de niveles en la toma de la central próxima al puente.

Tras un tratamiento de los datos facilitados, se ha podido obtener una aproximación a la curva de gasto en esta zona. La figura 8 muestra la curva de gasto deducida entre los años 2009 y 2015. Dada su diferencia con los otros años, se han descartado los datos del período 2006-2009. Concretamente, durante los años 2006, 2007 y 2008 la estación de medida de Iberdrola prácticamente no obtuvo datos.

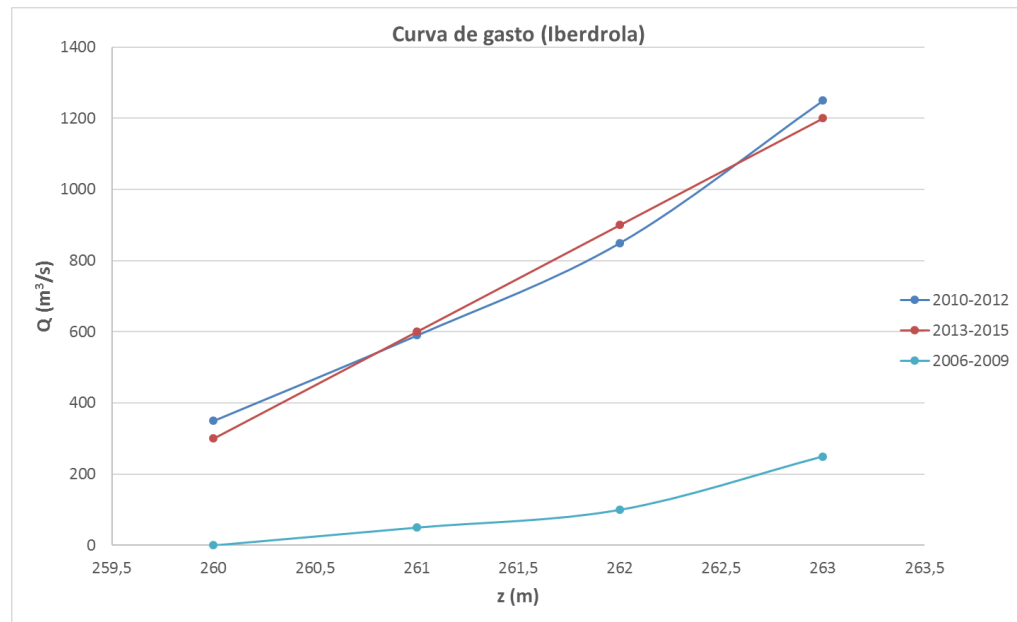


Figura 8 | Curva de gasto deducida de los datos de Iberdrola para el período comprendido entre los años 2006 y 2015.

De los datos anteriores se ha podido extraer la siguiente tabla 2 de relación caudal-cota de agua:

Tabla 2 | Valores de la curva de gasto.

Rating Curve	
z	Q
259	0
260	300
263	1300
266	2300

La curva de gasto también se ha tratado como una variable de ajuste, dada la dispersión de datos que han conducido a su obtención con el consiguiente error asociado, y a la falta de datos para caudales elevados. La tabla 3 muestra las distintas relaciones caudal-cota de agua utilizadas en la modelización.

Tabla 3 | Valores de las curvas de gasto ajustadas.

Rating Curve

zQmod		zQmod2		zQmod3	
z	Q	z	Q	z	Q
259	0	259	0	259	0
260	1000	260	600	260	800
263	1900	263	1700	263	1800
266	2400	266	2400	266	2400

Calibración de los parámetros del modelo

- Casos de estudio

El comportamiento de cada parámetro y su efecto en el transporte de sedimentos ha sido analizado, como se ha explicado en apartados anteriores, mediante el modelo numérico Iber. Se han calculado un total de 35 casos distintos que han permitido calibrar cada parámetro hasta llegar a la solución óptima, es decir, aquella que tras la avenida produce un transporte de sedimentos más cercana a la observada mediante las dos batimetrías.

A modo de resumen de las 35 simulaciones llevadas a cabo, el parámetro α ha sido variado entre los valores 2 y 8, τ_c^* entre los valores 0,010 y 0,112 y la capacidad de arrastre entre $x1$ y $x4$.

- Resultado de la calibración

Después de analizar todos los casos simulados, se han podido fijar los parámetros del modelo. Se resumen en la tabla 4 dichos parámetros que corresponden al caso 31.

Tabla 4 | Resumen de los valores de los parámetros calibrados para el caso 31.

α	τ_c^*	Capacidad de arrastre	Curva de Gasto	Manning
4	0.026	$x1$	CC zQ mod3	M2

Se puede observar que el valor de α es muy parecido al propuesto para la ecuación de Mayer-Peter y Müller pro Wong y Parker, mientras que la tensión crítica es sustancialmente inferior. Sin embargo, este valor está en el rango de otras propuestas que utilizan una ecuación con una estructura similar recogidas en García (2008).

Las figuras que se presentan a continuación corresponden a los resultados obtenidos para el caso 31 con los parámetros de la tabla 4.

Las figuras 9 y 10 muestran el mapa de erosión y de sedimentación respectivamente.

La figura 11 corresponde al gráfico de volumen acumulado total de erosión y de sedimentación a lo largo del río. Esta figura se compara con la figura 6 (repetida en la imagen 12) que corresponde al mismo gráfico para la batimetría medida en campo.

Finalmente, en la figura 13 se muestra la diferencia entre las gráficas 12 (modelo numérico) y 13 (trabajo de campo).

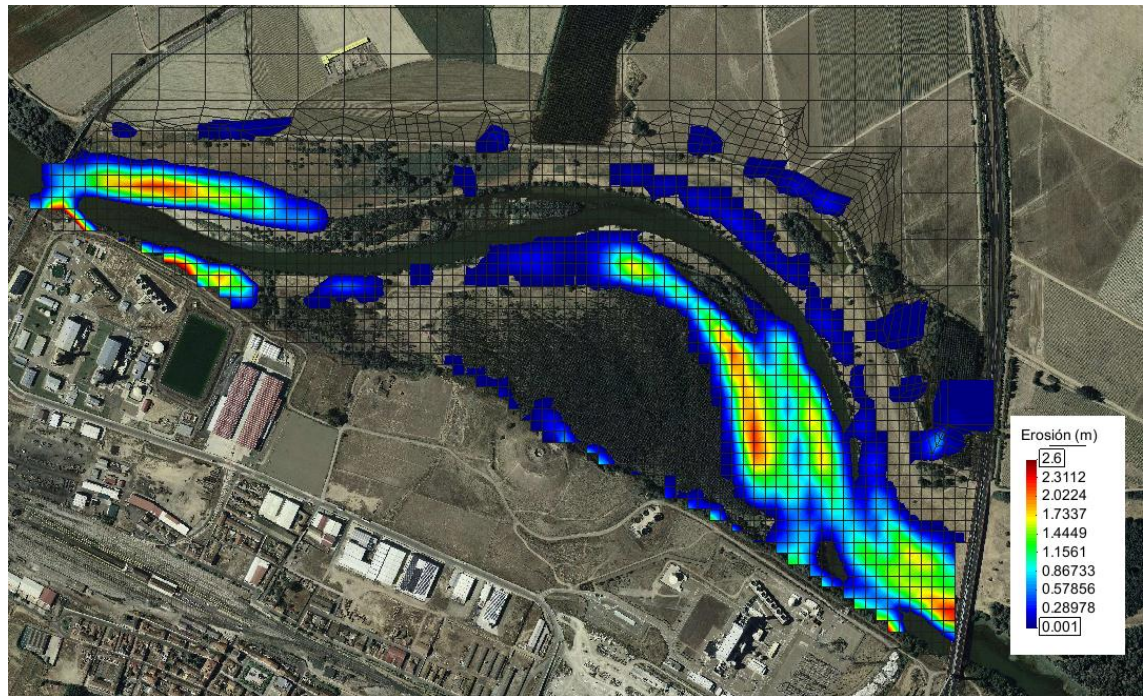


Figura 9 | Mapa de erosión del caso 31.

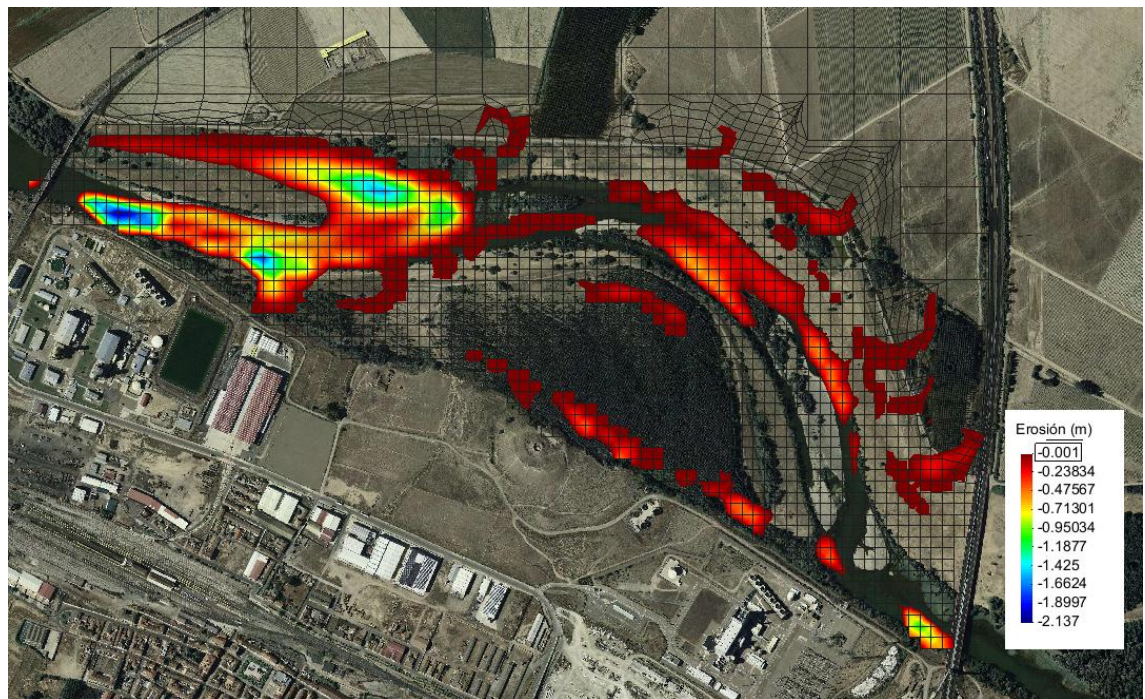


Figura 10 | Mapa de sedimentación del caso 31.

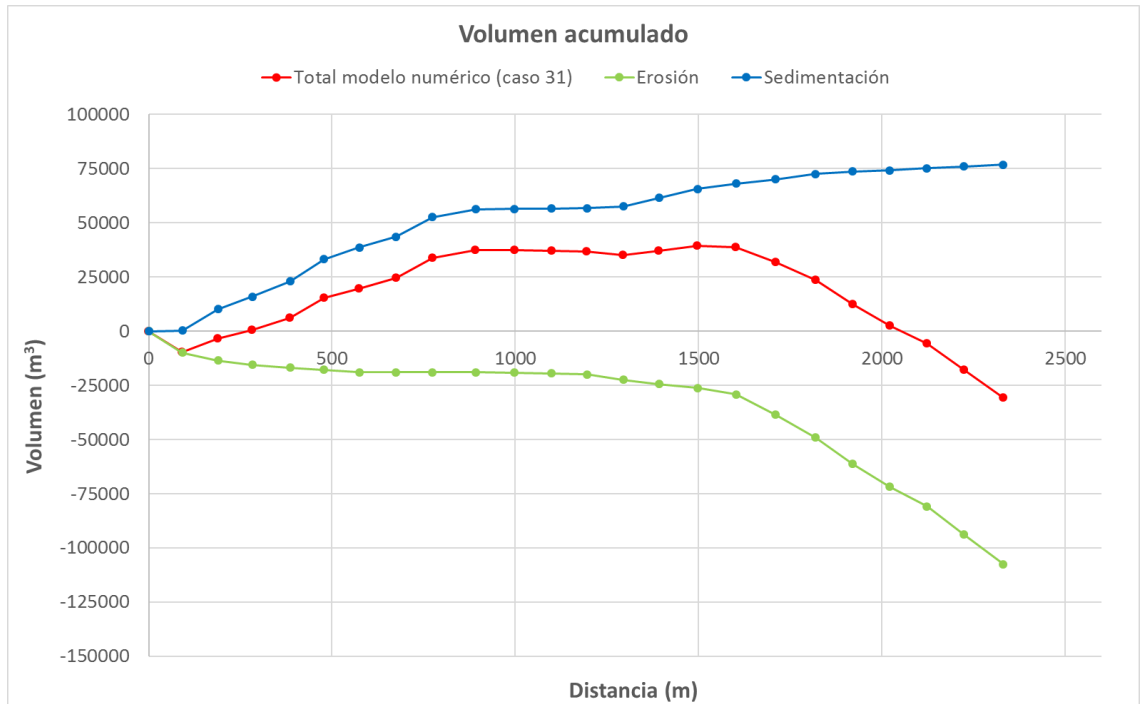


Figura 11 | Gráfico de volumen de sedimento acumulado a lo largo del río del caso 31.

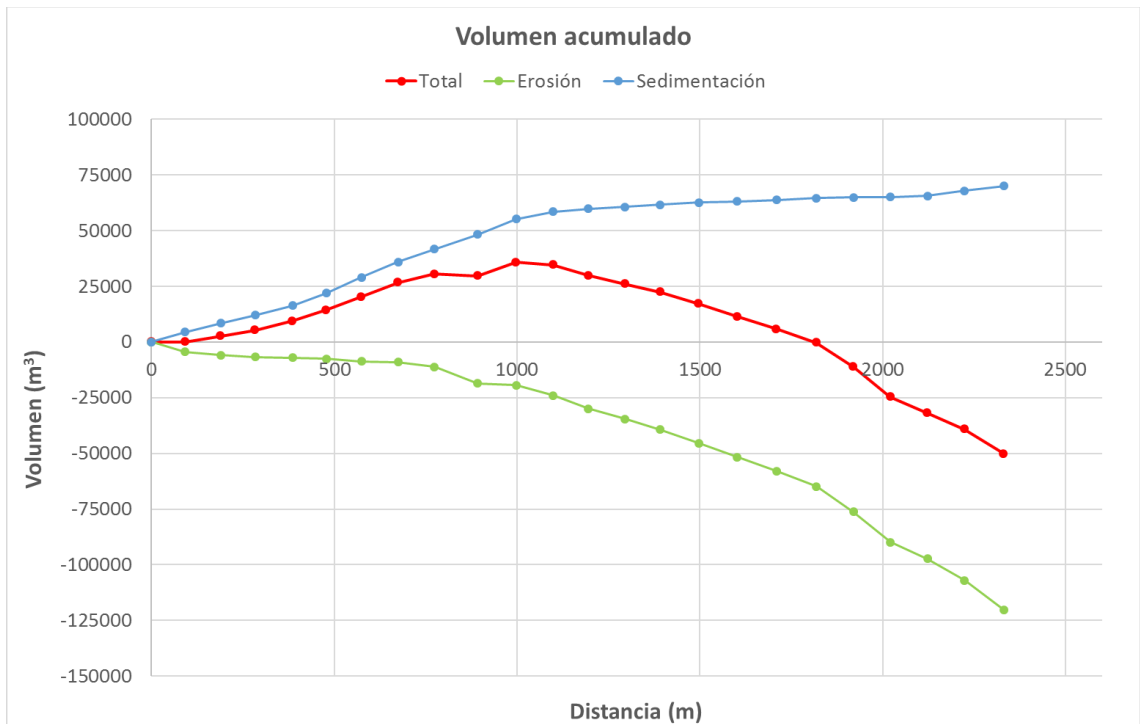


Figura 12 | Gráfico de volumen acumulado de sedimento a lo largo del río obtenido a partir de las batimetrías.

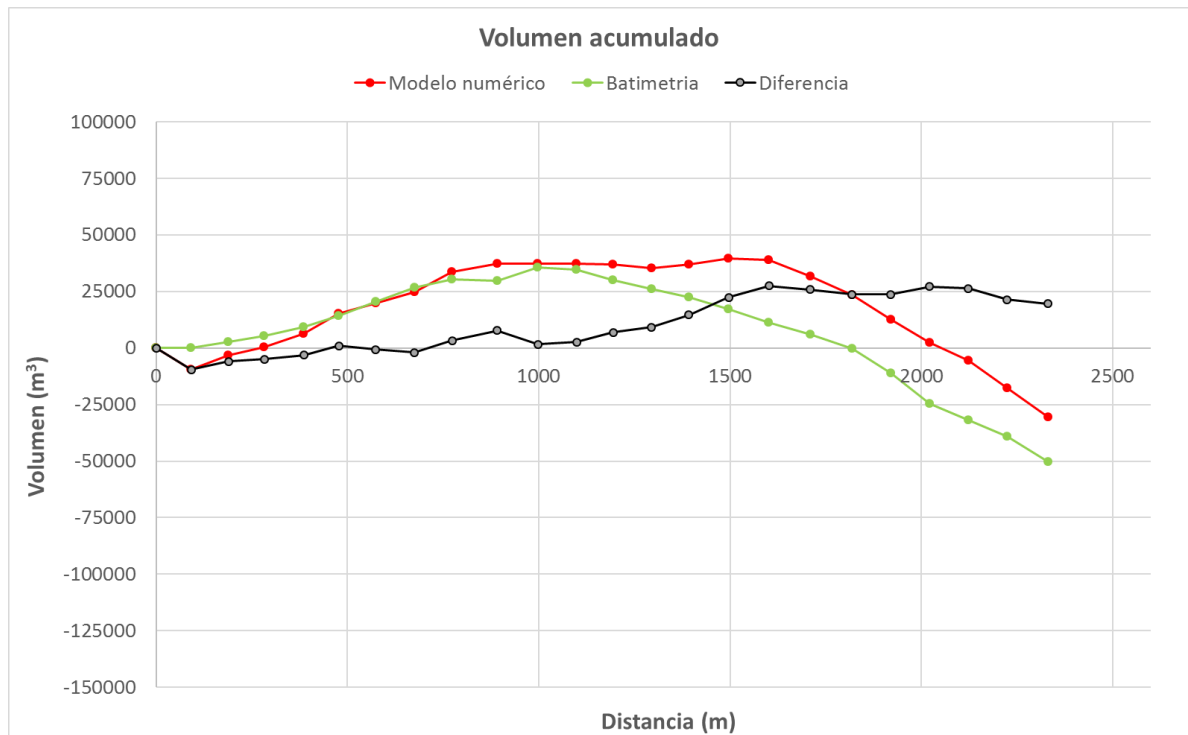


Figura 13 | Gráfico de volumen acumulado de sedimento a lo largo del río obtenido a partir de las batimetrías, a partir del modelo numérico y diferencia entre ellas.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se ha desarrollado y calibrado un modelo numérico bidimensional para el cálculo de transporte de sedimentos, erosión y sedimentación en un tramo de río Ebro próximo a Castejón de Ebro, en base a la herramienta Iber.

El proceso de calibración se ha realizado en base a dos batimetrías de la zona de estudio obtenidas durante la primavera de 2014 y la primavera de 2015, y los datos de las avenidas ocurridas en invierno de 2015.

CONCLUSIONES

Mediante el modelo calibrado se dispone ahora de una herramienta que permite reproducir la dinámica sedimentaria de un tramo del río Ebro. Esta herramienta puede resultar útil para poder describir el comportamiento de otros tramos del mismo río.

AGRADECIMIENTOS

Estudio realizado a petición de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

REFERENCIAS

Dolz, J. et al., 2015. *Estudio de la dinámica sedimentaria del río Ebro en el tramo Castejón-Zaragoza. Batimetría del tramo del río Ebro comprendido entre los puentes de la N-113 y de la autopista AP-15 (Castejón)*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Dolz, J. et al., 2015. *Estudio de la dinámica sedimentaria del río Ebro en el tramo Castejón-Zaragoza. Batimetría del tramo del río Ebro comprendido entre los puentes de la N-113 y de la autopista AP-15 (Castejón). Situación posterior a las avenidas de Enero-Febrero-Marzo de 2015*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

García, M (2008) "Sediment Transport and Morphodynamics" en *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*, ASCE

Ribé, M. et al., 2017. Modelación numérica bidimensional de la dinámica sedimentaria del río Ebro en Castejón. *Actas del II Workshop Iber*, Enero 19-20, Barcelona, España, 20-21.

Wong, M. and Parker, G. (2006). "Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database." *J. Hydraul. Eng.*, 132:11(1159), 1159-1168