Procesos de transporte de sedimentos en un cauce aluvial con modelación hidráulica bidimensional.

Nácher-Rodríguez, B.^a, Vallés-Morán, F.J.^a, Balaguer-Beser, A.^b, Lobera, G.^c, López-Tarazón, J.A.^{c,d,e}, Vericat, D.^{c,f}, Batalla, R.J.^{c,f,g}

^a Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. España. E-mail de contacto: <u>beanacro@cam.upv.es</u> ^b Departamento de Matemática Aplicada. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. España. ^c Fluvial Dynamics Research Group –RIUS, Universidad de Lleida, Lleida, Catalunya, España. ^d Institute of Earth and Environmental Science, University of Potsdam, Potsdam, Germany. ^e School of Natural Sciences and Psychology, Liverpool John Moores University, Liverpool, UK. ^f Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Solsona, Catalunya, España. ^g Institut Català de Recerca de l'Aigua, Girona, Catalunya, España.

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

RESUMEN

Los modelos hidráulicos bidimensionales constituyen una potente herramienta para el estudio hidrodinámico de ríos y sus llanuras de inundación. Cuando incorporan módulos de transporte de sedimentos, pueden emplearse para simular los procesos erosivos y de sedimentación que se dan en el cauce, y por tanto para modelar sus cambios morfológicos. En este trabajo, se emplea el modelo de libre distribución lber para analizar la evolución morfológica de un tramo de río, sometido a una importante modificación antrópica. Con este caso de estudio se evalúa el potencial de este tipo de modelos para representar cambios de sección y perfil longitudinal en ríos. Correctamente calibrados, son una herramienta útil para modelar los cambios morfológicos derivados de los escenarios de cambio global (cambio climático más cambios antrópicos en las cuencas) planteados hoy en día, que implican a su vez la modificación de la peligrosidad y riesgo de inundación de los terrenos adyacentes. **Palabras clave** | modelación hidráulica, transporte de sedimentos, carga de lecho, umbrales morfológicos.

INTRODUCCIÓN

Los ríos y sus cauces son sistemas complejos, que evolucionan en el tiempo y en el espacio, desde su inicio en las zonas de cabecera, hasta su desembocadura en mares y océanos. En el estudio de la hidrodinámica de ríos es necesario tener en cuenta, además de las ecuaciones que modelizan el comportamiento del flujo líquido, el hecho de que los contornos (lecho y márgenes) de los mismos no son fijos: están sujetos a procesos de erosión y deposición de sedimentos, lo que a la vez modifica su comportamiento hidráulico. De manera que, junto a las ecuaciones de flujo líquido, se deben también considerar las de flujo sólido. Los umbrales que tienen que ser superados para que se produzca una modificación importante de la morfología fluvial son los denominados umbrales geomórfológicos (Schumm, 1979).

La morfología y la composición sedimentológica del cauce cambian con el tiempo, ajustándose hacia nuevas configuraciones de equilibrio conforme varían las características del flujo líquido y sólido (Wilcock, 1998). En un cauce natural, estos cambios suceden generalmente durante eventos de crecidas, cuando cambian las condiciones de equilibrio. Como conclusión, los cauces fluviales no son estáticos, sino que evolucionan y migran a lo largo y ancho de las llanuras de inundación.

Los eventos de crecida llevan asociado un aumento de la peligrosidad en las zonas colindantes. En las zonas altas de las cuencas se genera la mayor parte de la escorrentía, junto con un arrastre significativo de sedimentos (producción de caudal sólido). Mientras que los asentamientos de población, las zonas de producción de alimentos y desarrollo industrial, se concentran en las llanuras de inundación y, en general, en las zonas bajas y planicies cercanas a los ríos, donde son más

frecuentes las inundaciones (mayor peligrosidad de inundación) y peores sus consecuencias (mayor riesgo). A medida que los ríos evolucionan morfológicamente, y en función de los distintos usos que ocupan sus llanuras de inundación, se ven modificadas a su vez la peligrosidad y el riesgo de inundación debido a eventos de alto periodo de retorno.

Los países mediterráneos son muy sensibles al cambio global, considerando éste como la combinación del cambio climático (por ejemplo, incremento de eventos extremos de precipitación; Borga et al., 2010) y la acción antrópica directa (como, por ejemplo, los cambios en los usos del suelo; García-Ruiz et al., 1996). Es ampliamente reconocido que el cambio global se ve incrementado por la manipulación antrópica de la hidrología (un cambio en el uso del suelo modifica las condiciones de generación de escorrentía de una cuenca). Se predice que estos cambios tendrán como resultado grandes alteraciones del régimen de caudales de los ríos mediterráneos, ya que, si bien el volumen total de precipitaciones puede no variar mucho, sí lo hace su régimen, aumentando los periodos de sequías, y la torrencialidad de las lluvias cuando se producen, ocasionando eventos de extrema intensidad (Hirabayashi et al., 2008). Los grupos de expertos en cambio climático (IPCC, 2014; EEA, 2017) predicen escenarios futuros que combinan una creciente frecuencia y magnitud de crecidas e inundaciones, con sequías prolongadas en las cuencas mediterráneas. Los riesgos más graves se prevén en las cuencas que han sufrido cambios drásticos en los usos del suelo (urbanización, nuevas zonas agrícolas, deforestación, etc.).

Frente a estos escenarios, es necesario disponer de una herramienta capaz de predecir cuál será la respuesta de los ríos. Tanto a escala de cuenca (evaluando cómo afectan los cambios en los usos del suelo a la escorrentía generada por la cuenca), como a escala local o de tramo de río (evaluando qué cambios morfológicos se dan en los cauces, y cómo afectan dichos cambios a la peligrosidad y riesgo de inundación). Con este estudio se pretende evaluar el potencial de los modelos hidráulicos bidimensionales para representar la evolución morfológica en un tramo de río en particular. En este caso, se trata del río Ésera en su paso por la localidad de Perarrúa (Aragón). Este cauce ha sufrido cambios morfológicos importantes (derivados de una extracción masiva de sedimentos en el lecho, donde originalmente existía una barra de gravas), así como modificaciones geomorfológicas ocasionadas por el paso de grandes avenidas.

El objetivo de este trabajo es el de modelar hidráulicamente, durante un periodo de tiempo de aproximadamente tres años, el paso de las sucesivas avenidas que han circulado por el río Ésera. A partir de la topografía y batimetría disponible, se compararán los resultados obtenidos de las simulaciones con aquellos que realmente han tenido lugar en el río, centrándose en particular en la formación de una nueva barra de gravas. De esta manera, se evaluará la capacidad del modelo para representar cambios morfológicos a escala de tramo de río, y su posible empleo para predecir la evolución del mismo frente a escenarios futuros.

Como modelo hidráulico se ha escogido el modelo Iber (Bladé et al., 2014) un software hidráulico bidimensional, con módulo de transporte de sedimentos. De este modelo existen numerosas referencias recientes de aplicación a casos relacionados con el transporte de sedimentos en cauces aluviales (Corestein et. al, 2014; Arbat-Bofill et. al, 2014). Además, se trata de un software de libre distribución, con las ventajas que esto conlleva para la comunidad investigadora.

MATERIAL Y MÉTODOS

Información histórica

El río Ésera tiene un cauce aluvial con un importante transporte de caudal sólido, ya sea como carga de lecho o en suspensión. En su recorrido, presenta numerosas barras marginales y longitudinales (exentas). En el tramo de estudio, como se observa en la Figura 1, el cauce se ensancha, existiendo históricamente una barra longitudinal de gravas en el centro del cauce, que fue eliminada en otoño de 2011, debido a una extracción masiva de áridos en el lecho. Éste, en este tramo, está compuesto principalmente por gravas y cantos de tamaño medio $d_{50} = 0.09$ m.



Figura 1 | Ortofoto del tramo de estudio (río Ésera en Perarrúa). A la izquierda (julio 2011) se observa la existencia de una barra longitudinal consolidada por abundante vegetación. A la derecha (diciembre 2011), dicha barra ha sido completamente eliminada.

Gracias a la información disponible del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), hoy en día digitalizada y disponible tanto para su descarga como para su visualización a través del visor web (<u>http://www.ign.es/web/comparador_pnoa</u>), es posible realizar un seguimiento de la evolución de esta barra de gravas a lo largo del tiempo. Para este tramo, se dispone de información en los siguientes instantes temporales:

- Vuelo Americano Serie A (1945 y 1946)
- Vuelo Americano Serie B (1956)
- Vuelo interministerial (entre 1973 y 1986)
- Vuelo Nacional (entre 1980 y 1986)
- Ortofotografías georreferenciadas del PNOA en los años 2006, 2009, 2012 y 2015 (la más actual)

A esta información se ha de sumar las ortofotografías georreferenciadas tomadas en campo durante las campañas de toma de datos, realizadas entre 2011 y 2014. Las fechas concretas se recogen en la Tabla 1.

En la Figura 2 se presentan algunas de estas ortofotos, clasificándolas de la siguiente manera: en la línea superior, se presentan aquellas imágenes en las que se observa una barra única en el centro del cauce. La más reciente de ellas es la correspondiente a la situación pre-extracción (PNOA 2009), sobre la que se han representado, en líneas negras y rojas, la localización de esta barra en dos instantes temporales anteriores (1980-interministerial y PNOA 2006, respectivamente), así como las márgenes del cauce y la posición de algunas barras marginales. En la línea inferior, se presentan ortofotos en las que no se aprecia la existencia de una barra única, sino que ésta se encuentra dividida por un pequeño cauce o canal central. La fotografía más reciente representa la situación de la barra actualmente (PNOA 2015), y sobre ella se representan en negro y rojo los contornos correspondientes a otros dos instantes pasados en los que la barra era también múltiple: 1946 (Serie A) y 2014 (fin del proyecto), respectivamente.

Llama la atención el hecho de que la barra fuera originalmente múltiple (1946), posteriormente se unificara en la barra central cuya topografía se recogió en los inicios del proyecto (2011), y posteriormente, la barra que se ha formado desde ese instante hasta la actualidad sea claramente una barra múltiple. Si este hecho se debe al régimen de caudales que ha circulado por el tramo (forma en la que los eventos de crecida han ido sucediéndose), la simulación hidráulica debería arrojar como resultado la barra múltiple que se observa en 2015.



Figura 2 | Comparación de ortofotografías históricas.

Datos de campo

Para la realización del presente trabajo se dispone de toda la información recopilada en el marco del proyecto Consolider Ingenio 2010 CSD2009-00065 SCARCE. En este proyecto, se llevó a cabo durante tres años un extensivo trabajo de campo, con el objetivo de disponer de datos en diferentes instantes temporales, bien para su posterior análisis directo, bien para poder calibrar y validar los resultados de las futuras simulaciones numéricas.

En concreto, para el caso de estudio correspondiente al tramo del río Ésera a su paso por la localidad de Perarrúa, se dispone de datos relativos a topografía y batimetría, distribución granulométrica de los sedimentos en el área de estudio, capas de hábitats o usos del suelo, caudales y puntos de calibración (puntos de coordenadas x,y,z de la intersección de la lámina libre con la margen para diversos casos de caudales conocidos), transporte de sedimentos en suspensión y por carga de lecho. En la Tabla 1 se resumen los datos disponibles y las fechas en las que se realizaron las campañas. La información "completa" incluye topografía y batimetría con una precisión de 0.5 m x 0.5 m, fotografía aérea, clasificación de imagen por clases (tipo de sedimento, clase de vegetación, etc.), curvas granulométricas de sedimentos, caudales líquidos circulantes y concentraciones del sedimento en suspensión, y puntos de calibración.

Tabla 1 | Campañas de campo realizadas y datos disponibles en cada instante temporal

	Fecha	Descripción	Información disponible
t0	21-29 julio 2011	Inicio del proyecto. Situación original pre-extracción	Completa
t1	02-07 diciembre 2011	Inmediatamente después de la extracción de gravas	Completa
t2	07-08 agosto 2012	Situación intermedia	Topografía y batimetría (secciones transversales en la zona de interés) Caudales circulantes
t3	10 octubre 2014	Fin del proyecto	Completa

Modelo hidráulico

Las simulaciones hidráulicas, tanto en lecho fijo como en lecho móvil, se han realizado con el software de modelación hidráulica bidimensional Iber. El modelo Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en lámina libre y procesos de transporte en ríos y estuarios, desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE), en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua.

Este modelo consta de un módulo hidrodinámico que permite realizar simulaciones hidráulicas en dos dimensiones, resolviendo las ecuaciones de aguas someras (integración en profundidad de las ecuaciones de Navier-Stokes, asumiendo una distribución hidrostática de presiones), conocidas como ecuaciones de Saint-Venant, mediante el método de los volúmenes finitos con un esquema descentrado de alta resolución tipo Roe's Riemann. Este tipo de esquemas permite representar cambios de régimen y frentes de onda, sin problemas de convergencia, siempre que se cumpla la condición de estabilidad CFL (Courant-Friedrichs-Lewy).

Iber incorpora varios módulos adicionales para la modelación de la turbulencia, estructuras internas, simulaciones de roturas de presas, delimitaciones de zonas de distinta peligrosidad de inundación, modelos de calidad de aguas y, lo que es de especial importancia en este caso, modelos de transporte de sedimentos por carga de fondo y en suspensión. La modelación del transporte de sedimentos se lleva a cabo acoplando la ecuación de Exner con el sistema de ecuaciones que resuelven la hidrodinámica del flujo líquido. Además, cuenta con diversas fórmulas de capacidad de transporte (tanto para carga de fondo como para transporte en suspensión), incorporando tanto las más conocidas como otras definidas ad-hoc por el propio usuario. Por tanto, puede ser empleado para simular el transporte de sedimentos y la evolución del lecho en ríos y estuarios.

Generación del modelo

A continuación, se detallan las características particulares del modelo generado para el análisis del tramo de río objeto de estudio. Éstas se refieren a la malla de cálculo, parámetros hidráulicos, condiciones de contorno de flujo líquido y flujo sólido, y de simulación.

La malla de cálculo se ha generado a partir de la información topográfica y batimétrica disponible, de elevada precisión, ya que se dispone de una densidad de al menos un punto por m^2 . El tipo de malla adoptado es un RTIN (Red de triángulos rectángulos irregulares), que Iber es capaz de generar automáticamente a partir de una serie de variables. Una de estas variables es la tolerancia (o error permitido) entre la malla de cálculo y el terreno original. En este caso, y con el objetivo de aprovechar al máximo la calidad de los datos topográficos, la tolerancia ha sido de 0.05 m. El lado mínimo de las celdas es de 1 m, coincidiendo con la resolución de los datos de campo. El resultado ha sido una malla de 300.000 elementos, bastante densa si se tiene en cuenta la reducida longitud del tramo de estudio (1 km de cauce). En el apartado de discusión se trata con más detalle la necesidad de recurrir a una malla de estas características.

Los coeficientes de rugosidad de Manning de la zona de estudio (parámetro fundamental para representar la resistencia al flujo en el cálculo hidrodinámico) se han obtenido a partir de la información granulométrica disponible para el material de lecho y márgenes, además de las distintas coberturas de vegetación, zonas urbanizadas, caminos, etc., delimitados mediante la fotografía aérea. Estos coeficientes se han sometido a un proceso de calibración en el que se han hecho intervenir tanto caudales bajos como caudales altos, ya que se disponía de información relativa a la posición de la lámina libre para diferentes tipos de caudales (puntos de calibración).

Respecto al flujo líquido, las condiciones de contorno establecidas son las siguientes: aguas arriba, la condición de contorno de entrada son los distintos hidrogramas del flujo a simular, registrados por la estación de aforo del Ésera en Graus. Aguas abajo, se ha establecido una condición de contorno de calado crítico. Este valor está motivado por el desconocimiento,

por una parte, de los niveles en la sección extrema de aguas abajo del modelo para cada caudal. Por otra, el flujo cambia de régimen a lo largo del tramo simulado, y la sección de salida está suficientemente alejada del tramo de interés (zona donde está localizada la barra), por lo que esta condición no influye en los resultados allí obtenidos. En cuanto a las condiciones iniciales, todas las simulaciones se han iniciado en seco (calado cero para todas las celdas), ya que Iber es capaz de proporcionar una solución estable con un inicio de este tipo. No obstante, se ha establecido un periodo de calentamiento para el inicio del transporte de sedimentos, de manera que primero se alcance una situación estacionaria del flujo líquido, y posteriormente comience a intervenir el módulo de transporte.

Respecto al flujo sólido, en este trabajo únicamente se ha tenido en cuenta el transporte de material como carga de lecho. Para su modelización, se ha empleado la conocida ecuación de capacidad de transporte de Meyer-Peter y Müller (1948), con la corrección de Wong y Parker (2006) (1). Iber únicamente permite transportar material de un diámetro como carga de lecho, por lo que se ha selecciona el diámetro medio, 0.09 m.

$$q^* = 3.97(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \tag{1}$$

donde q^* el caudal sólido de carga de lecho adimensional, τ^* es la tensión adimensional ejercida por el flujo (o parámetro de Shields) y τ_c^* es la tensión crítica adimensional del material del lecho.

Todo el material granular del lecho es movilizable, pero existen zonas donde aflora superficial o subsuperficialmente la roca madre que no son erosionables, y que así se han definido en el modelo. Sobre estas zonas se puede depositar material, pero no puede erosionarse por debajo de la cota a la que se encuentra la roca.

En cuanto a las condiciones de contorno, para la carga de lecho es necesario indicar una condición de contorno de entrada, que representa el caudal sólido que ingresa al tramo de estudio desde aguas arriba. Este dato no es conocido, ya que medir el trasporte como carga de lecho en ríos es complicado, y casi imposible si se trata de una situación en avenida. Por tanto, se han llevado a cabo, por el momento, simulaciones con dos condiciones extremas: la primera de ellas, condición de aguas claras, implica que no existe transporte de caudal sólido como carga de lecho desde aguas arriba; la segunda, capacidad de arrastre, permite que ingrese en el modelo todo el caudal sólido que sería capaz de transportar el flujo, según las condiciones hidráulicas que se dan a la entrada del modelo. Evidentemente, esta última condición es un límite superior, ya que el material realmente transportado también depende de la disponibilidad real en el cauce (espesor de la capa de gravas).

Filtrado de la serie hidrológica

Como ya se ha indicado, para la realización del estudio, se dispone de la serie de caudales circulantes durante todo el periodo de ejecución del proyecto. Los datos pertenecen a la estación de aforo 9013, Ésera en Graus, situada aguas abajo de la zona de estudio y cercano a ésta, no existiendo ningún tributario importante entre ambas. Se dispone de datos cada 15 minutos. En la Figura 3 se presenta la serie completa, junto con los instantes temporales en los que se han llevado a cabo las tareas de toma de datos en campo.





6

El caudal medio circulante por el río Ésera en el periodo considerado es de 18 m^3/s . El estudio comienza tras la extracción de la barra de gravas, es decir, a partir de t1 (diciembre de 2011). Desde este instante hasta el final del estudio (t3, octubre de 2014), se observan varios eventos de crecida en el río, algunos de los cuales serán susceptibles de generar cambios morfológicos importantes en el cauce.

Determinar qué caudales constituyen realmente umbrales morfológicos para el tramo de estudio es fundamental, ya que la simulación de toda la serie hidrológica, desde t1 hasta t3 no es viable, desde el punto de vista de los tiempos computacionales. Por tanto, se lleva a cabo un filtrado de la serie, de manera que únicamente se simularan los eventos que superen un cierto umbral de caudal.

Tras el análisis y comparación de la información topográfica relativa a los instantes t1 y t2, se deduce directamente un valor mínimo de este umbral de caudal. Dado que no se producen modificaciones significativas del lecho en la zona de interés, tanto en sección transversal como en longitudinal, entre t1 y t2 (Figura 4), se puede concluir que ninguno de los caudales circulantes genera las condiciones hidráulicas necesarias para que se produzca un transporte importante de material como carga de lecho. Queda así definido el umbral #1 como 70 m³/s (el máximo caudal circulante en este periodo).

Sin embargo, todavía existen demasiados eventos entre t2 y t3 en los que el umbral #1 se ve superado, por lo que es necesario seguir analizando la serie. Entre t2 y t3, la modificación del lecho del cauce es muy evidente (Figura 4). De un lecho prácticamente plano, se ha evolucionado a la formación de una nueva barra, si bien en una localización ligeramente distinta, tal y como se ha comentado en epígrafes anteriores. Desgraciadamente, no se dispone de topografía intermedia entre estos dos instantes, por lo que estos cambios han podido producirse en cualquier momento de los dos años transcurridos.



Figura 4 | Comparación de perfiles para diferentes t (ordenadas: cotas en m; abscisas: distancias en m). Se incluyen también los perfiles correspondientes a la barra pre-extracción (t0). La localización de las ST se indica en la Figura 9.

Para que se produzcan cambios en el lecho, y en concreto, para que se produzca la erosión del material que posteriormente se depositará en forma de barra, es necesario que el flujo genere sobre los contornos del cauce (lecho y márgenes) una tensión suficiente, que ponga el movimiento las partículas del material granular. Para este tipo de materiales, y siguiendo la metodología propuesta por Shields, esta tensión tangencial ha de ser superior a la tensión crítica asociada al diámetro de las partículas. Esta tensión puede obtenerse a partir expresión (2), en la que se adoptado como valor de tensión crítica adimensional el propuesto por Meyer-Peter y Müller.

$$\tau_c = 0.047(\gamma_s - \gamma)d_{50}$$
 (2)

donde τ_c es la tensión crítica asociada a un material de diámetro medio d_{50} , con un peso específico γ_s , siendo $\gamma_s = g\rho_s$, con ρ_s (densidad del sedimento) aproximadamente constante e igual a 2650 kg/m³, y γ es el peso específico del agua.

Para la obtención de las tensiones tangenciales generadas por diferentes caudales, se han llevado a cabo simulaciones con lecho fijo en Iber, obteniéndose las variables necesarias para la determinación de τ , y comparándose éstas (celda a celda), con la tensión crítica correspondiente a un material de $d_{50} = 0.09$ m. De esta manera, se obtuvieron mapas de zonas movilizadas para cada uno de los caudales, determinándose que a partir de un caudal de 100 m³/s, la extensión de la zona movilizada era considerable, en relación a la extensión total del modelo (más de un 10%) (Figura 5). Por tanto, el umbral #2 se establece en 100 m³/s. De esta manera, el número de eventos a simular se reduce a 6, pasándose de un total de 1043 días a unos 6-7 días a simular.



Figura 5 | Zonas movilizadas (en rojo) por un caudal de 70 m³/s (izda) y 100 m³/s (dcha).

En la Tabla 2 se recogen las características de los eventos simulados, en cuanto a duración total y caudal pico del hidrograma de avenida.

Tabla 2 | Eventos de crecida a simular tras el filtrado de la serie hidrológica

	Fecha	Caudal pico (m ³ /s)	Duración (h)
Evento 1	20-21 octubre 2012	234.5	46
Evento 2	19-20 enero 2013	153.6	15
Evento 3	18-21 junio 2013	477.2	67
Evento 4	21 julio 2013	109.8	5
Evento 5	4 octubre 2013	120.7	8
Evento 6	3 marzo 2014	139.5	14

Realización de simulaciones

Con el modelo ya calibrado (flujo líquido y lecho fijo) y una vez filtrada la serie hidrológica, se realizan las simulaciones de los 6 eventos seleccionados de manera consecutiva. Es decir, la primera simulación se realiza con la topografía de t2 como punto de partida, y el hidrograma del primer evento. Finalizada esta simulación, se lleva a cabo la del segundo evento, empleando en este caso como base topográfica el terreno deformado obtenido como resultado de la primera simulación (Figura 6). Estas simulaciones, evidentemente, son de lecho móvil, con las características indicadas en el epígrafe de "Generación del modelo".



Figura 6 | Esquema de realización de simulaciones.

V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

Dado que la condición de contorno de entrada para el caudal sólido es desconocida, para cada evento se ha simulado una condición de entrada de aguas claras, y una condición de capacidad de arrastre (ya definidas anteriormente).

Además, para poder evaluar la influencia de la resolución de la malla de cálculo en los resultados, se han llevado a cabo simulaciones tanto con una malla de tamaño mínimo 1 m, como con una de tamaño mínimo 2 m.

Por último, y a modo de comprobación de la metodología de filtrado de datos, también se realiza una simulación de lecho móvil con un caudal constante de 70 m³/s (umbral #1), con el objetivo de confirmar que este caudal no produce cambios significativos en el lecho. En este caso, se tienen en cuenta tanto los fenómenos erosivos como los de deposición.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos de cada una de las simulaciones realizadas son, fundamentalmente, los mapas de erosión y deposición generada por el paso de los diferentes hidrogramas, así como el terreno deformado (o modificado) tras cada evento. Estos mapas permiten evaluar cualitativamente el comportamiento del modelo. En la Figura 7 se presentan los mapas de erosión y deposición para dos caudales circulantes diferentes. En el caso del caudal de 70 m³/s (umbral #1) no se aprecia movilización significativa del lecho, como era esperable. Por el contrario, el máximo caudal del periodo simulado genera cambios en prácticamente toda la zona de estudio.



Figura 7 | Mapas de sedimentación (mostaza) y erosión (rojo) para diferentes caudales (umbral #1 - 70 m³/s y Q_{máx} - 477 m³/s).

De los diferentes eventos simulados, la mayor movilización se produce tras el evento 3, al que corresponde un caudal pico de 477 m³/s. Los resultados de la simulación a lo largo del paso de la avenida muestran la erosión de material aguas abajo del primer meandro, en el inicio del ensanchamiento, que se deposita aguas abajo (en la zona donde se encontraba la barra original) (Figura 8).



Figura 8 | Mapas de erosión / deposición en diferentes instantes temporales del paso de la avenida del evento 3.

En la Figura 8 se observa como dos zonas de deposición se van generando en la zona donde se localizaba la barra, ya que el material se moviliza en dos direcciones (flechas rojas): en la dirección del flujo, cerca de la margen derecha, y en dirección sensiblemente transversal, hacia la margen izquierda. En el centro, la deposición de material es menor (línea a trazos), generándose un canal intermedio entre las zonas emergentes, tal y como se observa en la ortofografía de 2015.

Para la comparación del terreno obtenido mediante la simulación hidráulica de toda la serie hidrológica filtrada, con la topografía de campo del instante final del proyecto, t3, se realizan diferentes perfiles transversales (PT) y longitudinales (PL). La Figura 9 indica, sobre la ortofoto de la zona de estudio en t3, los perfiles seleccionados para hacer las comparaciones pertinentes. Se puede observar como los perfiles transversales recorren la longitud total ocupada por la barra, y los longitudinales se han trazado por el eje de la mima, teniéndose un PL1 (por el eje de la barra original) y PL2 (por el eje de la barra actual).

En las Figuras 10 y 11 se representan los perfiles longitudinales obtenidos tras la simulación de los eventos #1 (20-21 de octubre de 2012), #2 (19-20 de enero de 2013) y #3 (18-21 de junio de 2013). Junto a ellos, se ha representado también el terreno inicial (t2) y el final (t3). Estos resultados se presentan tanto para las simulaciones con una condición de contorno de aguas claras (líneas rojas) como para una condición de contorno de capacidad de arrastre (líneas verdes). Todos ellos se han obtenido de la malla más fina (1 m de lado mínimo).



Figura 9 | Localización de perfiles de comparación en la zona de estudio sobre la ortofoto en t3. En rojo, perfiles transversales. En verde, perfiles longitudinales. En negro, se representa el contorno de la barra original previa a la extracción de gravas (t0).



Figura 10 | Comparación de perfiles longitudinales obtenidos por el eje de la barra original. Se presentan resultados para diferentes CC de caudal sólido, con la malla más fina (1 m).

V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña



Figura 11 | Comparación de perfiles longitudinales obtenidos por el eje de la barra actual. Se presentan resultados para diferentes CC de caudal sólido, con la malla más fina (1 m).

En ambas Figuras puede observarse como los resultados obtenidos con las condiciones de contorno (CC) de aguas claras y capacidad de arrastre no son muy diferentes para los dos primeros eventos. Sin embargo, sí se observa en la Figura 10 cómo las simulaciones con CC de aguas claras dan como resultado la erosión del lecho a lo largo de la primera mitad del PL, cuando es de esperar que se produzca deposición al final del periodo. Para el evento 3, sólo se presentan perfiles con CC de capacidad de arrastre, ya que con una CC de aguas claras, el resultado distaba mucho del terreno esperado (t3). En cuanto al resultado tras el evento 3 con CC de capacidad de arrastre, se observa una deposición notable de material en la zona de la barra actual, aunque el modelo ha sobreestimado el espesor depositado. En este evento, se ha producido en la sección extrema de aguas arriba una movilización de material muy importante, con un cambio notable en la sección del río.

En las gráficas de la Figura 12 se presentan los resultados correspondientes a las simulaciones realizadas con la malla de 1 m y CC de capacidad de arrastre, en diferentes ST a lo largo de la barra.



Figura 12 | Resultados obtenidos para diferentes secciones transversales (malla 1 m y CC de capacidad de arrastre). (Ordenadas: cotas en m; abscisas: distancias en m)

El comportamiento es similar al observado con los perfiles longitudinales: los dos primeros eventos (con un caudal máximo de 235 m³/s) modifican el lecho, pero la deposición más importante se produce tras el tercer evento. Cualitativamente, el modelo está depositando material en la zona correcta de la sección transversal. Cuantitativamente, la altura o espesor de las barras formadas es superior al observado al final del periodo (t3).

Por último, se presentan también los resultados obtenidos para las simulaciones correspondientes a la malla más gruesa (2 m de lado mínimo), con una CC de capacidad de arrastre, tras la simulación de los 6 eventos seleccionados (se presentan los resultados a partir del evento 3). En la Figura 13, que representa el PL por el eje de la barra actual, se observa cómo tras el evento 3, el terreno obtenido como resultado supera nuevamente la altura de la barra en t3, pero tras la simulación de los siguientes eventos (con un caudal pico mucho menor, del orden de 140 m³/s), en lugar de "barrerse" el material depositado y disminuir la altura total de la barra, se sigue acumulando material, llegando a obtenerse un PL muy alejado del registrado al final del proyecto.



Figura 13 | Resultados obtenidos tras la simulación de los 6 eventos, con la malla de 2 m de lado mínimo, CC de capacidad de arrastre.

DISCUSIÓN

Tras el análisis de los resultados más relevantes del trabajo desarrollado, se puede decir, a grandes rasgos, que la línea de trabajo seguida presenta un gran potencial, pero todavía es necesario seguir trabajando en el modelo elaborado para obtener resultados plenamente satisfactorios.

Una de las características que se repite, tanto a nivel de perfil longitudinal como de sección transversal, es la acumulación de material por encima de la cota registrada en t3 tras la simulación del evento 3. Este evento es a todas luces el más extremo de toda la serie hidrológica simulada, presentando un caudal pico que es el doble que el correspondiente al siguiente evento de mayor magnitud (477 m³/s del evento 3 frente a los 234 m³/s del evento 1). Tras el evento 3, sería esperable que los siguientes eventos (con caudales pico del orden de los 140 m³/s) erosionaran las zonas más elevadas de la barra generada, alcanzándose un nivel final más próximo al medido en t3. Es posible incluso que esta movilización se produzca con caudales menores que los establecidos como umbrales para la base topográfica de t2.

Sin embargo, el evento 3 no sólo genera una modificación significativa del cauce en la zona de la barra, sino también en las primeras secciones del modelo, ya que la CC de capacidad de arrastre introduce en el mismo una gran cantidad de sedimentos, que se queda acumulada y que va siendo arrastrada hacia aguas abajo en sucesivas simulaciones.

Evidentemente, no todo este material fue transportado en la realidad, ya que éste depende de la disponibilidad real de material en los tramos aguas arriba de la zona de estudio. Por tanto, la CC real estará entre el máximo (capacidad de arrastre) y la situación de aguas claras, y será un valor a calibrar mediante la simulación de diferentes escenarios.

V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

Por otra parte, es importante recalcar que el único transporte simulado es el del material que se transporta como carga de lecho. El transporte en suspensión no se ha modelado por dos motivos: en primer lugar, porque las modificaciones morfológicas más importantes se deben fundamentalmente al material de mayor tamaño, que se transporta por carga de lecho; en segundo lugar, generar un modelo que incluya los dos tipos de transporte es más costoso de calibrar, por lo que se ha considerado más oportuno ir por partes, aumentando la complejidad del modelo a medida que los resultados anteriores se consideren satisfactorios. Esto implica que siempre existirán diferencias entre la topografía tomada en campo y la simulada, pero deben ser menores, y probablemente no supongan la mayor fuente de error en los resultados del modelo.

No obstante, se considera como desarrollo futuro el activar el transporte en suspensión en este modelo. Existen datos de campo de concentraciones de sedimentos en suspensión a lo largo de todo el periodo de monitorización, por lo que se podría llevar a cabo un proceso de calibración y validación muy exhaustivo. Además, desde un punto de vista geomorfológico, la presencia de materiales finos entre el material granular de mayor tamaño, que constituye la mayor parte de la barra de gravas, puede ayudar a estabilizar y consolidar la formación de la misma, sobre todo en sus primeros estadios, donde existe presencia escasa de vegetación.

En cuanto a la repercusión que ha tenido en los resultados el aumentar el tamaño mínimo de la malla, en las simulaciones realizadas con ambas mallas se observan diferencias apreciables, sobre todo tras la simulación del evento 3 (movilizándose mucho más material en el caso de la malla más gruesa). Sin embargo, para poder determinar con qué malla se obtienen mejores resultados, es imprescindible mejorar el modelo en lo relativo a las CC de entrada de caudal sólido.

En cualquier caso, desde un punto de vista cualitativo, el modelo ha sido capaz de representar, desde una situación de lecho prácticamente plano tras la extracción de áridos, la formación de una nueva barra con las características de la observada en campo (una barra múltiple, con una zona más deprimida en el centro, localizada en la zona correcta). Con una mejor calibración del modelo de lecho móvil, fundamentalmente de la CC de entrada de carga de lecho, se puede llegar a un terreno deformado muy similar al de la topografía obtenida al final del proyecto.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado, analizado y discutido los resultados más relevantes de la simulación hidráulica, con lecho vivo, y a escala de tramo de río, de la evolución de un cauce aluvial sometido a un importante cambio morfológico de origen antrópico. El modelo empleado, Iber, ha sido capaz de representar correctamente, de manera cualitativa, las principales zonas de erosión y deposición en el tramo de estudio, tras el paso de sucesivos eventos de avenida, uno de ellos con un caudal significativamente superior al caudal medio del periodo de estudio.

Desde el punto de vista cuantitativo, todavía es necesario trabajar en la calibración de parámetros fundamentales para este tipo de simulaciones, como es la condición de contorno de entrada de caudal sólido. Este es un punto débil de este tipo de modelos, ya que difícilmente se dispone de datos de campo relativos al transporte como carga de lecho, y esta ausencia es más acusada todavía durante eventos importantes de crecida, donde la medición en campo es extremadamente compleja.

No obstante, los resultados obtenidos hasta la fecha proporcionan una envolvente de máximos y mínimos de erosión y deposición, entre los cuáles se encuentra la situación real. Este tipo de modelos constituye así una herramienta potente para analizar el efecto de diferentes escenarios futuros en la evolución de un cauce aluvial (ya sean modificaciones antrópicas en el mismo, aumento de caudales picos o alteraciones del régimen de caudales, todos ellos presentes en los escenarios de cambio global). Poder evaluar la evolución de un río a escala local permite también evaluar los cambios en la peligrosidad de inundación correspondiente, sobre los terrenos colindantes al río.

AGRADECIMIENTOS

El modelo hidráulico se ha generado con los datos recopilados durante el periodo de ejecución del Proyecto Consolider Ingenio 2010 SCARCE (CSD2009-00065), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad. Las simulaciones se han realizado en el marco del Proyecto AICO/2015/098 para Grupos de Investigación Consolidables, financiado por la Generalitat Valenciana. B. Nácher-Rodríguez es beneficiaria de las ayudas predoctorales VALi+D (ACIF/2015/074), financiadas por la *Generalitat Valenciana*. J.A. López-Tarazón es beneficiario del Programa Marie Curie Intra-European (PIEF-GA-2013-622468). D. Vericat es beneficiario del Programa Ramón y Cajal (RyC-2010-06264) financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores agradecen el apoyo del *Departament d'Economia i Coneixement* de la *Generalitat de Catalunya* a través del Grupo de Investigación Consolidable 2014 SGR 645 (RIUS- Fluvial Dynamics Research Group).

REFERENCIAS

Arbat-Bofill, M., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Niñerola, D., & Dolz, J. 2014. *Suspended sediment dynamics of Ribarroja Reservoir (Ebro River, Spain)*. Reservoir Sedimentation. Ed. Schleiss et al. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02675-9.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* Vol.30 (1) pp.1-10

Batalla, R.J., Tena, A. 2016. Procesos hidrosedimentarios en medios fluviales. Editoral Milenio. ISBN: 9788497437325.

Borga, M., Anagnoustou, E.N., Blöschl, G., Creutin, J.D., 2010. *Flash floods: observations and analysis of hydrometeorological controls.* Journal of Hydrology. 394: 1–3.

Corestein, G., Bladé, E., & Niñerola, D. 2014. *Modelling bedload transport for mixed flows in presence of a non-erodible bed layer*. RiverFlow 2014.

EEA. 2017. *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 - an indicator-based report*. EEA Report No 1/2017. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

García-Ruiz, J.M., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P., Ortigosa, L., White, S., González, C., Martí, C., 1996. Land-use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees. Landscape Ecology, 11: 267–277

Hirabayashi, Y., Kanae, S., Emori, S., Oki, T., & Kimoto, M. 2008. Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. Hydrological Sciences Journal, 53(4), 754-772.

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Meyer-Peter, E. y Müller, R. (1948) *Formulae for bedload transport*. Proceedings of 3rd Congress, International Association of Hydraulic Research, Sweden, 39-64

Schumm, S. A. 1979. *Geomorphic thresholds: the concept and its applications*. Transactions of the Institute of British Geographers, 485-515.

Wilcock, P.R., (1998). Two-fraction model of initial sediment motion in gravel-bed rivers. Science, 280(5362): 410-412

Wong M., Parker G. (2006). *Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller using Their Own Database.* Journal of Hydraulic Engineering, 132 (11), 1159-1168. V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña