

Análisis del transporte de sedimentos en el curso bajo del río Ebro mediante modelización numérica de una avenida controlada

Sediment transport analysis in Ebro River lower course based on the numerical modelling of a controlled flood

David López-Gómez ^{a1}, Miguel de Blas-Moncalvillo^{a2}, María Castejón-Zapata^{a3},
Ángel Gassó-Sánchez ^{*a4}, Ernest Bladé ^{b1}, Marcos Sanz-Ramos ^{b2}, Danial Dehghan-Souraki ^{b3},
Luis Garrote-de Marco ^{c1}, David Santillán-Sánchez ^{c2}, Juan Miguel Soria-García ^d,
Javier San Román-Saldaña^{e1}, Rogelio Galván-Plaza^{e2}, Miguel Ángel García-Vera^{e3},
Javier Sánchez-Martínez^f

^a CEH. CEDEX. Pº Bajo de Virgen del Puerto, 5, 28005, Madrid, España.

^b Flumen Research Institute, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), 08034, Barcelona, España.

^c Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España.

^d Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva, Universitat de València, 46980-Paterna, España.

^e Confederación Hidrográfica del Ebro, Pº Sagasta, 24, 50071, Zaragoza, España.

^f Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (P/ San Juan de la Cruz, 10, 28071, Madrid, España).

E-mail: ^{a1} david.lopez@cedex.es, ^{*a4} angel.gasso@cedex.es, ^{b1} ernest.blade@upc.edu, ^{c1} l.garrote@upm.es, ^b juan.soria@uv.es, ^{e3} mgarciave@chebro.es, ^f fsmartinez@miteco.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 21/05/2024

Aceptado: 29/07/2024

Publicado: 31/10/2024

Citar como: López-Gómez, D., de Blas-Moncalvillo, M., Castejón-Zapata, M., Gassó-Sánchez, A., Bladé, E., Sanz-Ramos, M., Dehghan-Souraki, D., Garrote-de Marco, L., Santillán-Sánchez, D., Soria-García, J. M., San Román-Saldaña, J., Galván-Plaza, R., García-Vera, M.A., Sánchez-Martínez, J. 2024. Sediment transport analysis in Ebro River lower course based on the numerical modelling of a controlled flood. *Ingeniería del agua*, 28(4), 246-262. <https://doi.org/10.4995/ia.2024.21768>

RESUMEN

El principal objetivo de este estudio es el análisis de la movilización de sedimento durante la avenida controlada del 5 de mayo de 2022 en el curso bajo del río Ebro desde la presa de Ribarroja. Durante este evento, se realizó una campaña de ensayos incluyendo aforo de caudales y medidas de turbidez y concentración de sedimentos en suspensión. Esta información ha permitido simular numéricamente el curso bajo del río Ebro desde la presa de Flix hasta su desembocadura con el modelo Iber, modelo euleriano 2D basado en el esquema de los volúmenes finitos de primer orden. Para ello se ha empleado el módulo de transporte de sedimentos en suspensión que resuelve la ecuación de advección – difusión, que emplea el modelo de erosión y sedimentación de Van-Rijn y resuelve la conservación de masa de Exner para estudiar la evolución del lecho. Los resultados de la modelización numérica son coherentes con la campaña de ensayos y validan el modelo Iber para analizar el transporte de sólidos en suspensión en la zona de estudio.

Palabras clave | transporte de sedimentos; modelación numérica; Iber; calibración modelos numéricos; muestreo de sedimentos.

ABSTRACT

The main objective of this study is the analysis of the sediment mobilization during the controlled flood event on 5th May 2022. During this event a test campaign was carried out, including flow gauging and measures of turbidity and suspended sediments concentration. This information has allowed the numerical simulation of the Ebro River lower course from the Flix dam to the mouth

with the model Iber, a 2D Eulerian model based on the finite volumes scheme. For this, the sediment transport module has been employed, solving the advection – diffusion equation using the Van – Rijn erosion-sedimentation model and solving the Exner mass conservation to study the riverbed evolution. Results of the numerical model are consistent with the test campaign and validate the Iber model to analyze the transport of suspended sediments in the study area.

Key words | sediment transport; numerical modelling; Iber; numerical models calibration; sediment sampling.

INTRODUCCIÓN

La Gestión Integrada de los Sedimentos es una política que está siendo impulsada por la Unión Europea en el contexto de la Directiva Marco del Agua que además está alineada con los objetivos del Pacto Verde Europeo, y en particular de la Estrategia para la Biodiversidad de la UE para 2030, del Plan de Acción para la Contaminación Cero, de la Estrategia de Adaptación de la UE y de la Estrategia del Suelo de la UE para 2030 (DGA, 2023). En este sentido cabe destacar la obligación establecida en el Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica de incluir en la revisión del próximo ciclo de planificación hidrológica un estudio específico de adaptación a los riesgos del cambio climático que incluya expresamente los impactos derivados de la retención de sedimentos en los embalses y las posibles soluciones para su movilización.

Para poder materializar esta política es necesario realizar una fase de I+D+i previa, para crear los instrumentos y las herramientas necesarias, siendo la modelación numérica del transporte de sedimentos en una cuenca y su interacción con los embalses un elemento clave. En este marco, la problemática del curso bajo del río Ebro representa un proyecto piloto en cuyo estudio se ha desarrollado el módulo de transporte de sedimentos del modelo bidimensional Iber, el cual se ha calibrado con una extensa campaña de muestreos del sedimento movilizado por una avenida controlada generada en la presa de Flix. El presente estudio recoge los trabajos realizados y los resultados obtenidos.

El “Plan para la Protección del Delta del Ebro”, actualmente en tramitación ambiental y en cuya elaboración han participado la Dirección General de la Costa y el Mar, la Dirección General del Agua y la Confederación Hidrográfica del Ebro, con el soporte técnico científico del CEDEX, es el instrumento básico que estudia la situación del curso bajo del río Ebro. Su objetivo final es desarrollar en el corto, medio y largo plazo distintas acciones que, fomentando el conocimiento y la transparencia, permitan paliar o gestionar los problemas derivados de la gestión del delta en la actualidad y ante los previsibles efectos del cambio climático, con medidas tanto en el ámbito fluvial como litoral (López-Gómez *et al.*, 2022).

El programa de medidas del Plan Hidrológico del Ebro (RD 35/2023) recoge una serie de actuaciones que quedan integradas en el marco más extenso de la denominada “Estrategia para la gestión integral de sedimentos en la demarcación hidrográfica del Ebro”, una de cuyas actuaciones se desarrolla el presente estudio. Estas actuaciones en relación con los sedimentos se enmarcan en el Plan para la Protección del Delta del Ebro, en los preceptos el artículo 19 de la Ley 7/2021, de 20 de mayo de cambio climático y transición energética, así como en el artículo 4bis del Reglamento de la Planificación Hidrológica.

La regulación de la cuenca del Ebro a través de los embalses tiene unos efectos socioeconómicos positivos indudables, pero también es cierto que tiene algunas externalidades negativas, como la reducción del tránsito sedimentario a lo largo de los cauces fluviales de la cuenca, junto con procesos de acorazamiento aguas abajo de las presas principales.

Estos efectos también se producen en el curso bajo del río Ebro debido a los embalses de Mequinenza (1964-66) y Ribarroja (1958-67) (Figura 1). La influencia del embalse de Flix (1945-48) es mucho menor, al estar situado aguas abajo de ellos y tener una capacidad muy reducida. Este conjunto de embalses permite satisfacer numerosos usos: garantiza una producción energética (hidroeléctrica y nuclear) estratégica para el mantenimiento del sistema eléctrico nacional; garantiza los usos del bajo Ebro (arrozales del delta incluidos) y los que toman en los propios embalses; permite por bombeo el riego de una gran extensión de frutales aguas arriba de los embalses; posibilita el actual caudal ecológico de la desembocadura del Ebro; reduce significativamente el riesgo de inundación en el tramo bajo del Ebro y contribuye al desarrollo de actividades recreativas y ambientales ligadas al agua.

Sin embargo, la puesta en funcionamiento de estos embalses ha modificado el equilibrio sedimentario en el bajo Ebro. El tránsito sedimentario en el curso bajo del Ebro podría acotarse en la actualidad, de acuerdo con diferentes autores, en una horquilla que iría de 0.15 a 0.50 Mt/año (Vericat y Batalla, 2006). Muchos de los estudios consultados incluyen estudios o información sobre el volumen de sedimentos acumulados en los embalses de Mequinenza y Ribarroja, estimándose que, en la actualidad, estas

pero con unos costes muy reducidos. Esto ha supuesto una revolución en el campo de la supercomputación que se ha extendido al ámbito de las criptomonedas, de la inteligencia artificial o los CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Así, el CEDEX empleó esta tecnología para la paralelización de SPHERIMENTAL (López y Cuéllar, 2011), modelo lagrangiano de partículas tridimensional, basado en el método SPH (*Smoothed Particles Hydrodynamics*) con aplicaciones en el estudio del flujo hidrodinámico en estructuras hidráulicas (López, 2016 y López *et al.*, 2018), y que ha convertido la modelización numérica en una herramienta fundamental en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos (CEH-CEDEX). Tras esta experiencia, se decidió optimizar Iber pues resulta necesario abordar estudios con mayor extensión espacial y mayor discretización de malla, proporcionando mayor precisión de los resultados, con tiempos de computación muy reducidos. La paralelización del código de Iber se ha realizado con CUDA FORTRAN, con el fin de mantener la misma estructura del código y que los desarrolladores habituados a programar en FORTRAN se encuentren cómodos en la nueva versión (Sanz-Ramos *et al.*, 2022, 2023).

López-Gómez *et al.* (2024) presenta resultados de los rendimientos computacionales obtenidos con la paralelización. En el caso de prueba analizado se alcanzaron aceleraciones 843 x en un modelo de 6.4 millones de celdas con una tarjeta de computación V-100.

Módulo de sedimentos del modelo Iber

El modelo Iber permite resolver las ecuaciones de transporte de sedimentos por arrastre de fondo, así como las de transporte en suspensión. El modelo de arrastre de fondo calcula por un lado las tensiones tangenciales de fondo que movilizan el sedimento de fondo por el criterio de partición de tensiones de Einstein (1950). Por otro lado, calcula las tensiones críticas de inicio de arrastre por el criterio de Shields. Con ambas tensiones el modelo permite estimar la capacidad de transporte de fondo por diferentes modelos experimentales como son el de Meyer-Peter y Müller (1948), van Rijn (1984) o el de Engelund y Hansen (1967), entre otros. A continuación, conocidos los caudales sólidos, con la restricción de la capa de roca, es posible calcular la evolución de la cota del lecho mediante la ecuación de conservación de masa de Exner (1).

$$(1 - p) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{sb,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sb,y}}{\partial y} = D - E \quad (1)$$

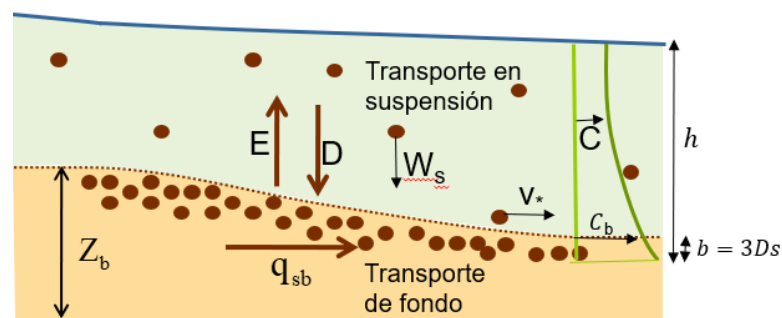


Figura 2 | Esquema de la ecuación de Exner para determinar la evolución del lecho.

En esta formulación Z_b representa la cota del fondo, p la porosidad del material, $q_{sb,x}$ y $q_{sb,y}$ representan los caudales adimensionales sólidos en los ejes x e y . Los términos D y E representan la deposición y erosión derivadas del transporte en suspensión (3). En esta expresión se adimensionalizan los caudales dividiéndolos por el término raíz (RgD^3).

El transporte de sedimento en suspensión es más complejo pues requiere resolver una ecuación adicional que es la de advección difusión (2), del sedimento en suspensión. Esto permite estudiar la evolución de la concentración de sedimento en suspensión en el dominio de estudio. Iber incluye tres modelos para estimar la erosión y sedimentación que se produce en cada celda de cálculo, a partir de los resultados de concentración. Para material granular resultan más adecuados los de Smith y McLean (1977) y van Rijn (1984), mientras que para material cohesivo lo es la formulación de Ariathurai y Arulanandam (1978).

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hU_x C}{\partial x} + \frac{\partial hU_y C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\Gamma + \frac{\nu_t}{S_{c,t}} \right) h \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + (E - D) \quad (2)$$

Donde h es el calado, C la concentración de sedimento en suspensión, U_x y U_y , las componentes de la velocidad, ν_t la viscosidad cinemática turbulenta, $S_{c,t}$, la constante de Smith y Γ , la viscosidad molecular.

Para este estudio, se ha utilizado la formulación de van Rijn (1984), en donde el término E-D se evalúa a partir de la expresión (3):

$$E - D = W_s (c_b^* - c_b) = \alpha W_s (C^* - C) \quad (3)$$

en donde: α es un coeficiente que relaciona la concentración media de partículas en suspensión y la concentración cerca del lecho del río, cuyo valor se obtiene a partir del perfil de Rouse para la distribución de concentración de sedimentos en profundidad; W_s es la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas; C es la concentración de sólidos en suspensión promediada en profundidad; C^* es la concentración de sólidos en suspensión promediada en profundidad en condiciones de equilibrio (capacidad de transporte de sólidos en suspensión); c_b y c_b^* (6) son respectivamente la concentración instantánea y la concentración de equilibrio a una altura $z=b$ sobre el lecho del río.

El coeficiente α se calcula a partir de la distribución de concentración en la vertical (perfil de Rouse) a partir de la siguiente integral (4), siendo Z_u el exponente del perfil de Rouse (5) y $k=0.41$ la constante de von Karman, donde el coeficiente β permite modular dicho coeficiente ($\beta=2.5$ en este estudio):

$$\alpha = \frac{h - b}{\int_b^h \left[\frac{h-z}{z} \frac{b}{h-b} \right]^{Z_u} dz} \quad (4)$$

$$Z_u = \frac{W_s}{\beta k v_*} \quad (5)$$

La concentración de equilibrio cerca del lecho del río propuesta por van Rijn (1984) puede estimarse según la expresión (6). B es el espesor de la capa en la cual se produce el transporte de fondo (límite teórico de separación entre el transporte de fondo y el transporte en suspensión), calculándose conforme a las Ecuaciones (7) y (8):

$$c_b^* = 0.015 \frac{D_{50} T^{1.5}}{b D_*^{0.3}} \quad (6)$$

$$b = k_s ; \quad k_s = 3D_s \quad (7)$$

$$D_* = D \left(\frac{g R}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} ; \quad R = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (8)$$

La velocidad de sedimentación de las partículas W_s se calcula en función de su diámetro, en este caso, empleando la formulación de van Rijn (9, 10 y 11):

$$W_s = \frac{R \cdot g \cdot D_{50}^2}{18 \cdot \nu} \rightarrow D_{50} < 10^{-4} m \quad (9)$$

$$W_s = \frac{10 \cdot \nu}{D_{50}} \left(\sqrt{\frac{1 + 0.01 \cdot R \cdot g \cdot D_{50}^3}{\nu^2}} - 1 \right) \rightarrow 10^{-4} m < D_{50} < 10^{-3} m \quad (10)$$

$$W_s = 1.1 \cdot \sqrt{R \cdot g \cdot D_{50}} \rightarrow 10^{-3} m < D_{50} \quad (11)$$

El cauce de la zona de estudio hasta Tortosa se encuentra totalmente acorazado (Batalla *et al.*, 2014), parcialmente hasta Amposta y libre en el resto de cauce hasta la desembocadura. Debido a estas características, en la simulación se ha supuesto que el lecho no es erosionable en la simulación y, por lo tanto, que el movimiento predominante del sedimento es en suspensión. También se ha considerado que el diámetro característico que se moviliza durante la avenida corresponde a arenas muy finas según la clasificación de American Geophysical Union, siendo $D_{50} = 0.12$ mm.

CAMPAÑA DE ENSAYOS

Situación actual

Actualmente no se dispone de datos suficientes para cuantificar con precisión el transporte de sedimentos en el curso bajo del río Ebro desde el embalse de Flix a la desembocadura. Existen tres estaciones de medida de turbidez en activo en el tramo. Una en Flix explotada por la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) y otras dos de la red del Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas (SAICA) de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) en Ascó y en Xerta. Existe otra en Amposta, pero fuera de servicio. Para poder estimar el transporte de sedimentos en suspensión (SS) a partir de los registros de turbidez es necesario comprobar la correlación de estos registros con valores de concentración medidos en campo. Esta correlación hay que contrastarla para una amplia gama de caudales sólidos, pues la calibración de los sensores de turbidez se realiza para un rango de NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*), fuera del cual deja de medir correctamente. Por otro lado, se carece de registros históricos completos de las estaciones de medida, pues sensores de turbidez dejaban de medir durante las avenidas para prevenir daños en otros equipos, que es cuando se produce la mayor parte del transporte de sedimentos (CHE, 2017). Esto se ha corregido recientemente. Complementariamente, se están tratando de buscar otras técnicas que permitan medir durante estos episodios. Una alternativa es el empleo de técnicas de teledetección, calibrando fotografías de satélite con datos de campo. De esta forma es posible asignar a los diferentes patrones de la imagen satélite una concentración de sedimentos en suspensión.

La Confederación Hidrográfica del Ebro, como actividad programada en su planificación hidrológica para la regulación de los caudales hidrológicos, realiza dos avenidas controladas una en primavera y otra en otoño, siempre que lo permitan las reservas hídricas.

En este contexto, se decidió realizar una campaña de muestreo de sedimentos en suspensión durante la avenida controlada de primavera de 2022, que permitiera calibrar los registros de las estaciones de turbidez. Así mismo, se programó la campaña para el 5 de mayo coincidiendo con el paso del satélite Sentinel-2 del programa Copernicus, por la zona de estudio. La información sobre dicha campaña se recoge en la Nota Técnica publicada por el CEDEX (2022), recogiendo a continuación los datos más importantes.

Además de la Confederación Hidrográfica del Ebro y del CEDEX, en esta campaña ha colaborado la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en el marco del proyecto europeo REST-COAST, con cuyos fondos se han financiado los análisis de laboratorio de las muestras de sedimento en suspensión. Así mismo, han participado la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y la Universidad de Valencia (UV), así como ENDESA-ENEL que es el operador de la infraestructura.

Planificación de la campaña

La Figura 3 muestra el hidrograma de salida de la presa de Flix. La avenida se diseñó para que alcanzara una punta de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ a las 8:40 am y se mantuviera durante casi 5 horas con una duración de una hora tanto de la rama ascendente como la descendente.

Se dispone de los registros del SAICA de la avenida del mes de noviembre de 2021, que también tuvo una punta de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto ha permitido estimar, con bastante precisión, la velocidad de propagación del hidrograma a lo largo del curso bajo y la previsión de la hora de paso del frente de onda de avenida a los diferentes puntos de control y programar las horas más adecuadas para la toma de las muestras. Las secciones de control han sido ubicadas en puentes desde los que se pueden realizar los trabajos

de muestreo con seguridad, en lugares que permitan caracterizar el evento con la mayor representatividad. Con este criterio se han seleccionado los puntos de control cuya ubicación se puede consultar en la Figura 10, más adelante.

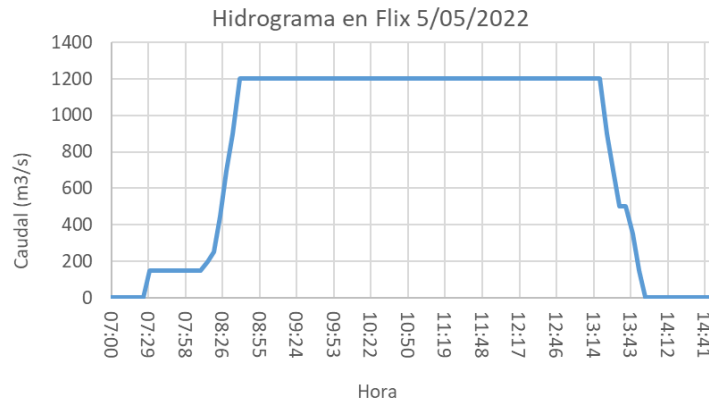


Figura 3 | Hidrograma programado de la avenida controlada desde Ribarroja.

Se han constituido 6 equipos de trabajo con las siguientes funciones:

- Equipo 1 (CEDEX): toma de muestras de sólidos en suspensión.
- Equipo 2 (UPC): toma de muestras de sólidos en suspensión.
- Equipo 3 (CHE): toma de muestras de sólidos en suspensión.
- Equipo 4 (UV): toma de muestras de sólidos en suspensión.
- Equipo 5 (CHE): aforo líquido con Doppler (ADCP). 2 grupos.
- Equipo 6 (CHE): grabación de vídeo con dron.

En relación con los primeros cuatro equipos, la toma de muestras de sólidos en suspensión se realizó con turbisonda (Figura 4 izquierda) montada sobre torno (Figura 5), con escala o contador de vueltas, que permite saber la longitud de cable desenrollado con el fin de medir la profundidad del punto de muestreo. Todas las muestras se analizaron con turbidímetro (Figura 4 derecha) y se seleccionaron algunas para su análisis en laboratorio. Los turbidímetros empleados estaban calibrados para un rango de 0 a 800 NTU. El equipo 4 además tomó muestras de sólidos en suspensión en la zona de la desembocadura con botella oceanográfica. El equipo 5 realizó aforos líquidos con sonda Doppler (*Acoustic Doppler Current Profiler*, ADCP). Esto permite, por un lado, contrastar el avance del frente de avenida y por otro, caracterizar el flujo hidrodinámico transversal de las secciones de muestreo de sólidos en suspensión para poder calcular correctamente el caudal sólido en dichas secciones.

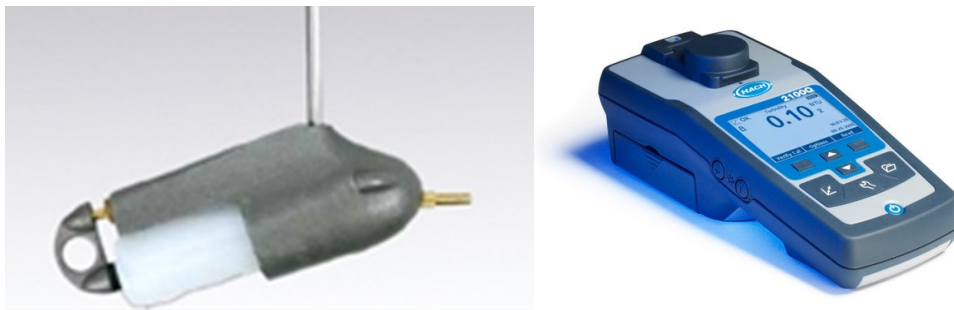


Figura 4 | Turbisonda modelo USB-48, Bureau Reclamation (izquierda). Turbidímetro (derecha).



Figura 5 | Torno para descenso de turbisonda.

Considerando las diferentes secciones de control, la propagación de la avenida y los equipos de trabajo explicados se elaboró un plan de ensayos con las actuaciones a realizar antes, durante y tras el paso de la avenida. Antes de iniciar la campaña de ensayos se realizó una puesta en común de los procedimientos de medida entre los equipos de muestreo con el fin de garantizar la homogeneidad en la toma de muestras.

Resultados de la campaña de ensayos

Desde el embalse de Flix se suministró el hidrograma planeado, gestionando el complejo de embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix de forma que estos dos últimos mantuvieran su nivel de explotación con el fin de no generar molestias a pescadores y otros usuarios del embalse. Sin embargo, esto tiene el inconveniente de reducir la capacidad de movilización del sedimento de ambos embalses. Por lo tanto, el material sedimentario movilizado en esta avenida corresponde en su mayor parte al previamente existente aguas abajo del embalse de Flix, y que resultó escaso por el arrastre producido en las avenidas ocurridas a principios de este año 2022. La Figura 6 muestra el aliviadero de la presa de Ribarroja en la fase inicial del hidrograma.



Figura 6 | Aliviadero de la presa de Ribarroja durante las maniobras de apertura.

En relación con la medición de la turbidez y de la concentración de los sólidos en suspensión, se tomaron muestras en varios puntos a lo largo de la sección transversal y a varias profundidades, para poder también analizar la variación de estas variables en diferentes puntos de la sección. A modo ilustrativo, en la Tabla 1 y en la Figura 7 se pueden observar los resultados del muestreo en la sección de control del Puente de Ascó. La posición X indica la distancia a la orilla de la margen izquierda en la sección transversal.

Tabla 1 | Puntos de muestreo, turbidez y concentración de sólidos en suspensión.

Muestras de sedimento en suspensión				Sección de control: Puente de Ascó	
N.º muestra	Hora	Posición x (m)	Profundidad z (m)	Turbidez (NTU)	Concentración SS (mg/l)
1	10:10	58	1	50	209
2	10:23	58	3	85	131
3	10:36	58	5	67.5	132
4	10:52	73	1	58.125	
5	10:55	73	3	55	
6	11:05	73	5	45.625	
7	11:12	43	1	57.5	
8	11:17	43	3	57.5	
9	11:24	43	5	36.875	
10	11:31	28	1	51.25	
11	11:38	28	3	51.875	
12	11:48	28	5	51.875	
13	12:05	88	1	57.5	
14	12:05	88	3	67.5	
15	12:18	88	5	65	
16	12:25		0	28.125	43

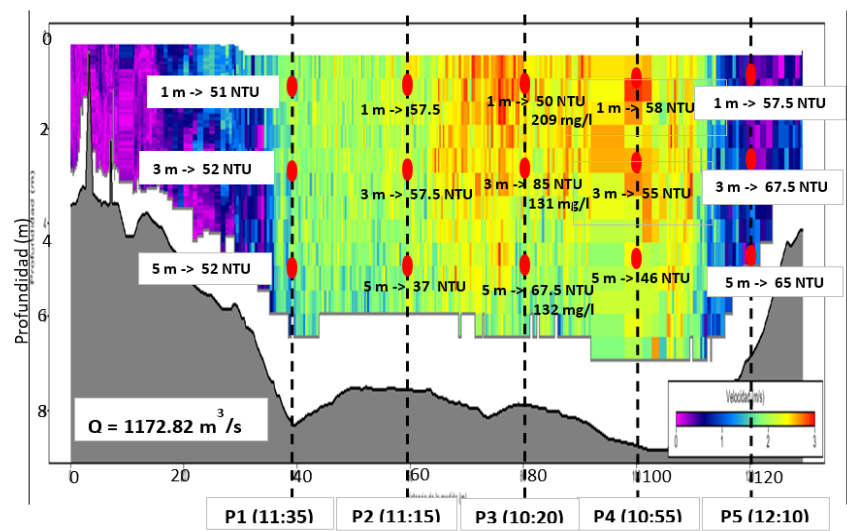


Figura 7 | S1, Puente de Ascó. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.

Una vez realizada la campaña de ensayos se ha llevado a cabo un estudio detallado de los resultados obtenidos. En resumen, se puede descartar la dependencia de la turbidez con la profundidad y en general se puede afirmar que, para las tasas de transporte analizadas, el campo de turbidez es muy homogéneo en la sección transversal. También se evidencia una dependencia entre la turbidez y el caudal circulante, aunque con gran dispersión.

Finalmente, en varias secciones muestreadas se ha detectado una dependencia lineal entre la turbidez y la concentración, aunque con un espacio muestral muy reducido. En la Figura 8 se recoge la relación entre la turbidez y la concentración de sólidos en suspensión eliminando los datos anómalos. El turbidímetro de la Confederación Hidrográfica del Ebro es comercial, a diferencia del de la Universidad Politécnica de Cataluña, y presenta una mayor precisión y un coeficiente de determinación R^2 igual a 0.8.

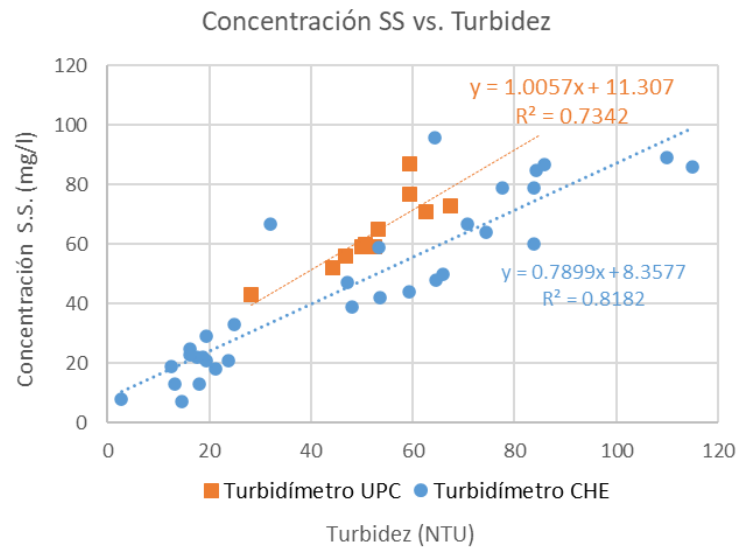


Figura 8 | Relación entre la turbidez y la concentración de sólidos en suspensión en los puntos de muestreo.

Como complemento a este análisis se dispone del registro de caudal de la red SAIH en Ascó, aguas abajo del puente, y turbidímetro de la red SAICA en Pas de l'Ase, aguas abajo de Ascó. Esto nos permite contrastar con los valores registrados en el puente de Ascó (Figura 9). Teniendo en cuenta la homogeneidad de turbidez y, por ende, de la concentración de SS en la sección transversal, cada registro es representativo de toda la sección. Por tanto, se ha podido ajustar el solidograma experimental y compararlo con el registrado por la red SAICA. Teniendo en cuenta el desplazamiento debido a la distancia entre el puente de Ascó y Pas de l'Ase, los registros de turbidez se han aproximado al solidograma en el puente de Ascó. Se aprecia que los aforos líquidos obtenidos en el puente de Ascó proporcionan caudales algo inferiores a los de la red SAIH. Por otro lado, la turbidez registrada en el puente resulta algo mayor que la proporcionada por la red SAICA. Teniendo en cuenta la relación entre turbidez y concentración

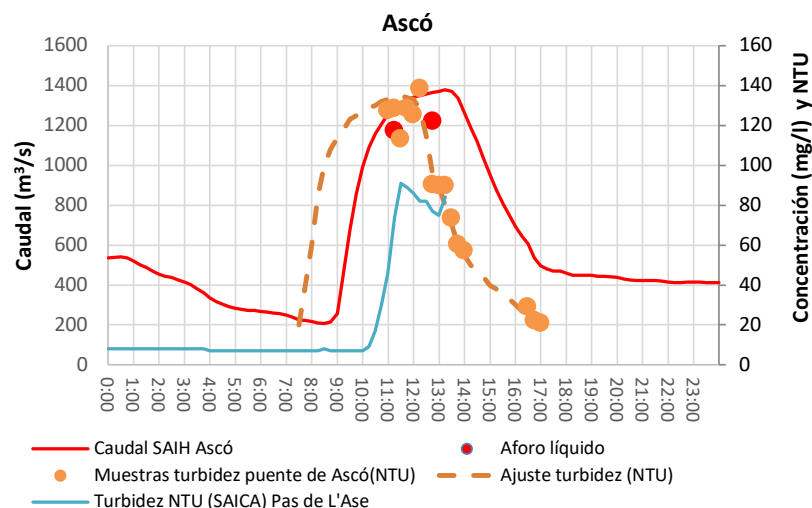


Figura 9 | S1, Hidrograma y registro de turbidez en Ascó.

de sedimentos en suspensión, se ha podido estimar la cantidad de sedimento que pasó por la sección del puente de Ascó durante la avenida controlada. Esta sería de algo más de 1830 toneladas de sedimento en suspensión en el período desde la 8:00 de la mañana hasta 17:00 horas, frente a las 145 toneladas que habría transportado el cauce en ese mismo período con un caudal base de 230 m³/s y una turbidez de 8 NTU. Es decir, el transporte se habría multiplicado aproximadamente por 13 durante el evento.

RESULTADOS

Resultados extraídos con el modelo Iber

Una vez realizada la campaña de muestreo y con el análisis de los datos obtenidos, se ha llevado a cabo la modelación con Iber como herramienta numérica para el cálculo hidrodinámico y de transporte de sedimentos (Figura 10), resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes integradas en profundidad. En el modelo se ha representado una longitud aproximada de 120 km, con un elemento mínimo de 12 m, lo que ha resultado en 1.2 millones de elementos. Se ha establecido una rugosidad de n de 0.028, con objeto de representar un lecho acorazado tipo roca. La condición de entrada es el hidrograma programado de la avenida controlada y la condición de salida es un nivel fijo a la cota 0.5 m, representando esta el nivel del mar.

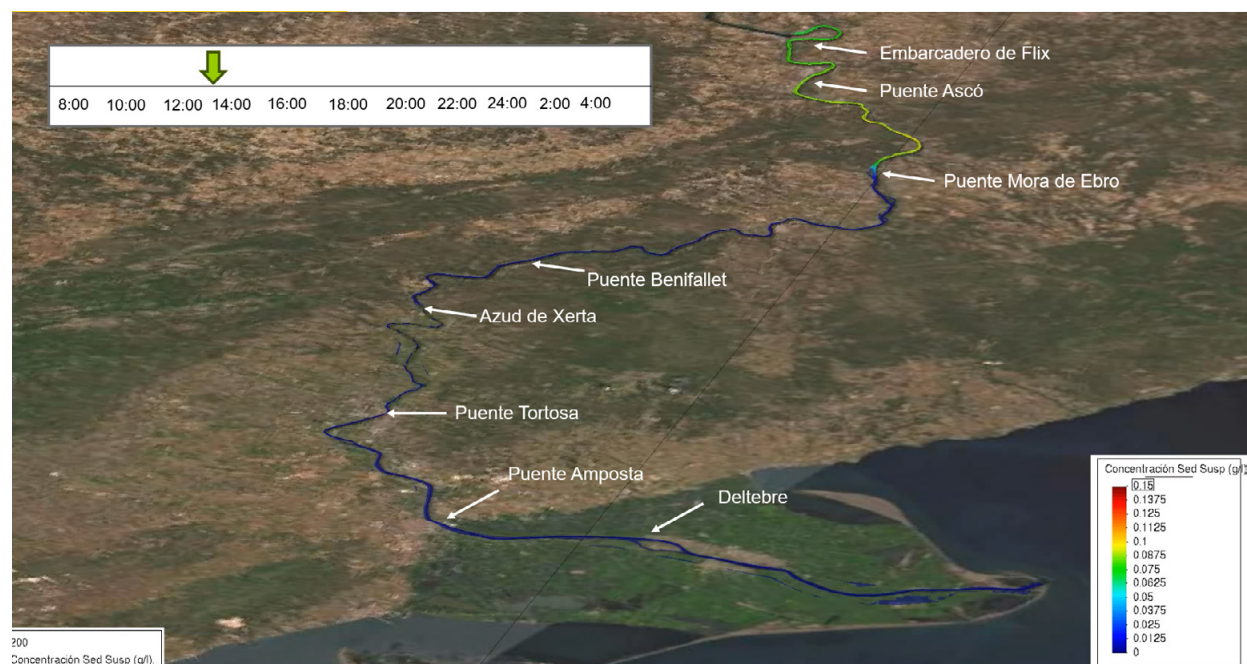


Figura 10 | Simulación numérica Iber. Campo de concentración de sedimentos en suspensión a las 13:40 horas.

Los principales resultados del modelo se muestran en la Figura 11, donde cabe destacar la evolución tanto de caudales líquidos, como sólidos (hidrograma y solidograma) a lo largo de las diferentes secciones de control. También se muestra la evolución de las concentraciones en g/l a lo largo del tiempo en dichos puntos de estudio. Por último, en el gráfico inferior derecho se observa cómo se movilizan los sólidos en suspensión, desde el embalse de Flix hasta el Delta del Ebro, en diferentes momentos de la modelación. Por ejemplo, si se observa el inicio de la modelación, con la curva de las 10 de la mañana, la concentración de sólidos en suspensión llega hasta los 0.10 g/l aproximadamente en el embalse de Flix. En este mismo instante de tiempo, dichos sólidos en suspensión todavía no han llegado al puente de Ascó.

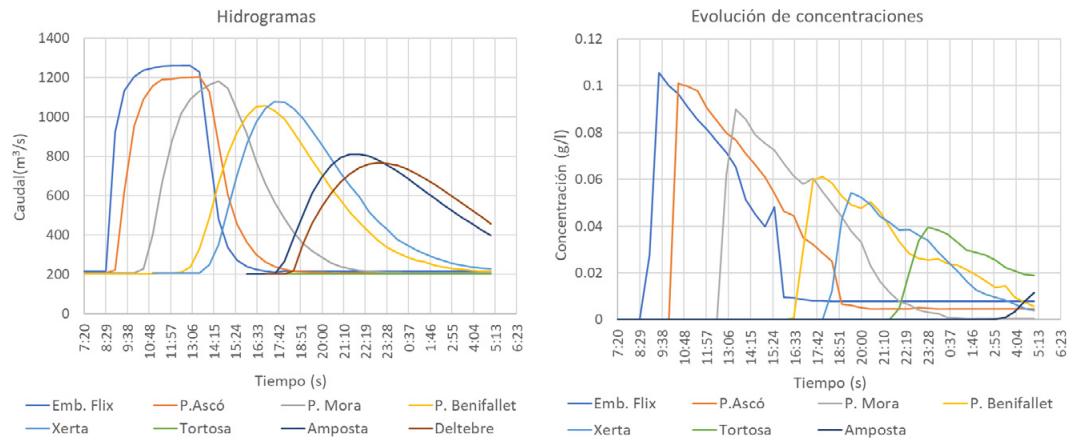


Figura 11 | Principales resultados de la modelización del transporte de sedimentos realizada con el modelo Iber.

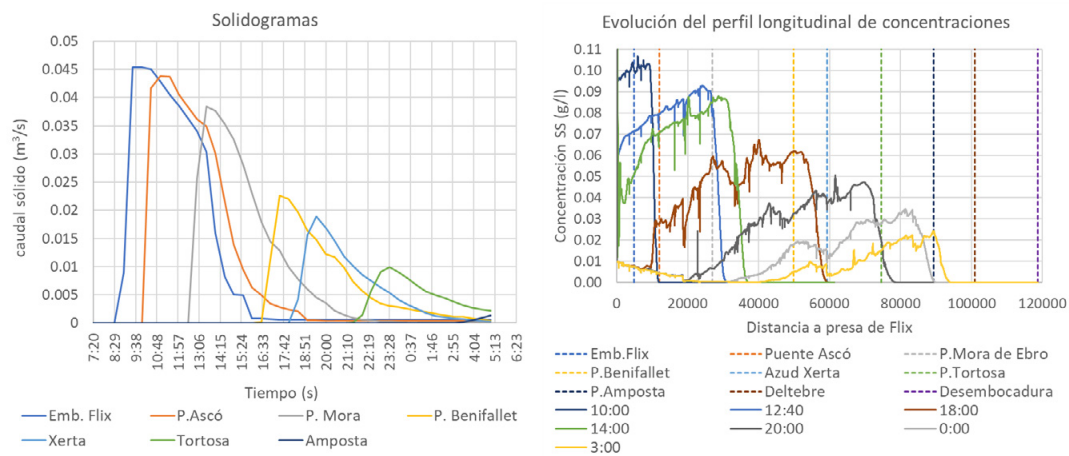


Figura 11 (continuación) | Principales resultados de la modelización del transporte de sedimentos realizada con el modelo Iber.

La Tabla 2 muestra la masa y de volumen de los solidogramas obtenidos con la simulación numérica, en cada una de las secciones consideradas. Se aprecia que por la sección del embarcadero de Flix pasaron unas 2000 toneladas de sedimento, que en su mayor parte quedaron depositadas en el propio cauce pues a Tortosa llegó menos del 20% de ese sedimento.

Tabla 2 | Masa y volumen de los solidogramas calculados en la simulación numérica.

Transporte	Embarc. Flix	P. Ascó	P. Mora	P. Benifallet	Azud Xerta	P.Tortosa
Masa (ton)	1998.5	1832.4	1455.3	864.6	651.3	371.2
Volumen (m³)	754.1	691.5	549.2	326.3	245.8	140.1

DISCUSIÓN

Validación del modelo Iber con los datos experimentales

Una vez llevada a cabo la modelización con Iber, se han contrastado los resultados, tanto de caudal como de concentraciones de sólidos en suspensión, con los datos extraídos de la campaña de muestreo.

La Figura 12 muestra los hidrogramas en Ascó, Tortosa, Mora de Ebro y Benifallet, y los compara con las mediciones de caudal mediante la sonda Doppler (ADCP), comprobando como el modelo Iber se ajusta perfectamente a los datos muestrados y que reproduce con precisión la onda de avenida. En Ascó y Tortosa también se dispone de los hidrogramas de la red SAIH, donde se comprueba que, en Ascó, el modelo Iber se ajusta mejor a los datos muestrados.

Por otro lado, la Figura 13 presenta la evolución de la concentración de sólidos en suspensión en Flix, Ascó, Mora de Ebro y Benifallet. En estos gráficos se puede observar los resultados de la modelación en Iber (línea continua), junto con los datos muestrados en esas secciones de control, tanto *in situ* (NTU), como en laboratorio (concentraciones g/l). En cada una de estas localizaciones, se aprecia una buena correspondencia del modelo Iber con los registros de sedimento en suspensión obtenidos en la campaña experimental.

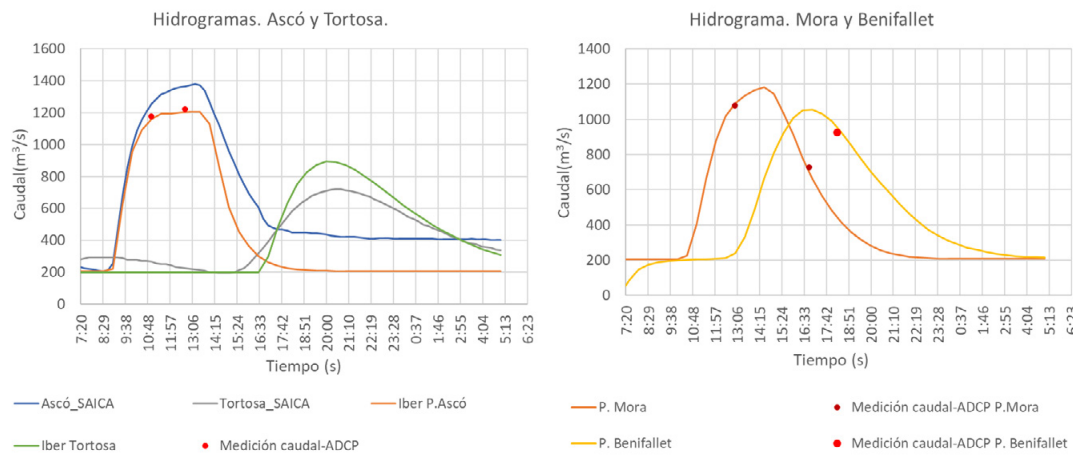


Figura 12 | Validación de caudales obtenidos con el modelo Iber.

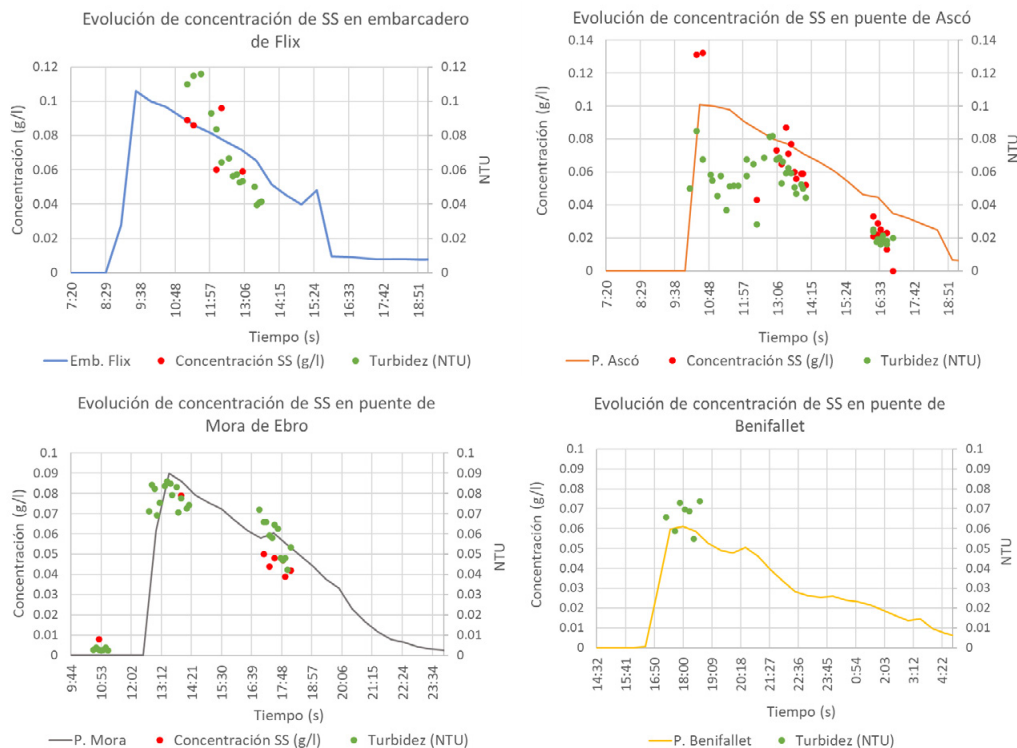


Figura 13 | Validación de concentraciones de sólidos en suspensión obtenidos con el modelo Iber.

Capacidad de transporte de sedimentos en el curso bajo del río Ebro

La carga de sedimento en suspensión en el curso bajo del río Ebro es muy pequeña. El turbidímetro de la red SAICA de Ascó suele indicar turbideces del orden de 10 NTU. Por tanto, con esta maniobra se ha multiplicado por 10 la carga de sedimentos. Sin embargo, la capacidad de transporte del Ebro es mucho mayor, pero al no tener suministro de los embalses y encontrarse el cauce acorazado, no hay más sedimento que movilizar. Durante la maniobra se han mantenido los niveles de embalse a su nivel de explotación por lo que el sedimento movilizado de los embalses es muy reducido. Por otro lado, las lluvias registradas en los meses anteriores habían producido el arrastre del material fino que residualmente queda en el lecho, por lo que en esta campaña había muy poco sedimento que transportar.

Las próximas campañas se deben diseñar haciendo coincidir la punta del caudal proveniente de Mequinenza con una reducción de niveles en Ribarroja y Flix. Esto permitirá movilizar sedimento de la cola liberada de los embalses con el descenso de nivel y aumentar las cargas de sedimento en el curso bajo. También se deberá explorar la existencia de corrientes de turbidez por el fondeo del embalse de Ribarroja, y cómo favorecerla para baipasear el sedimento.

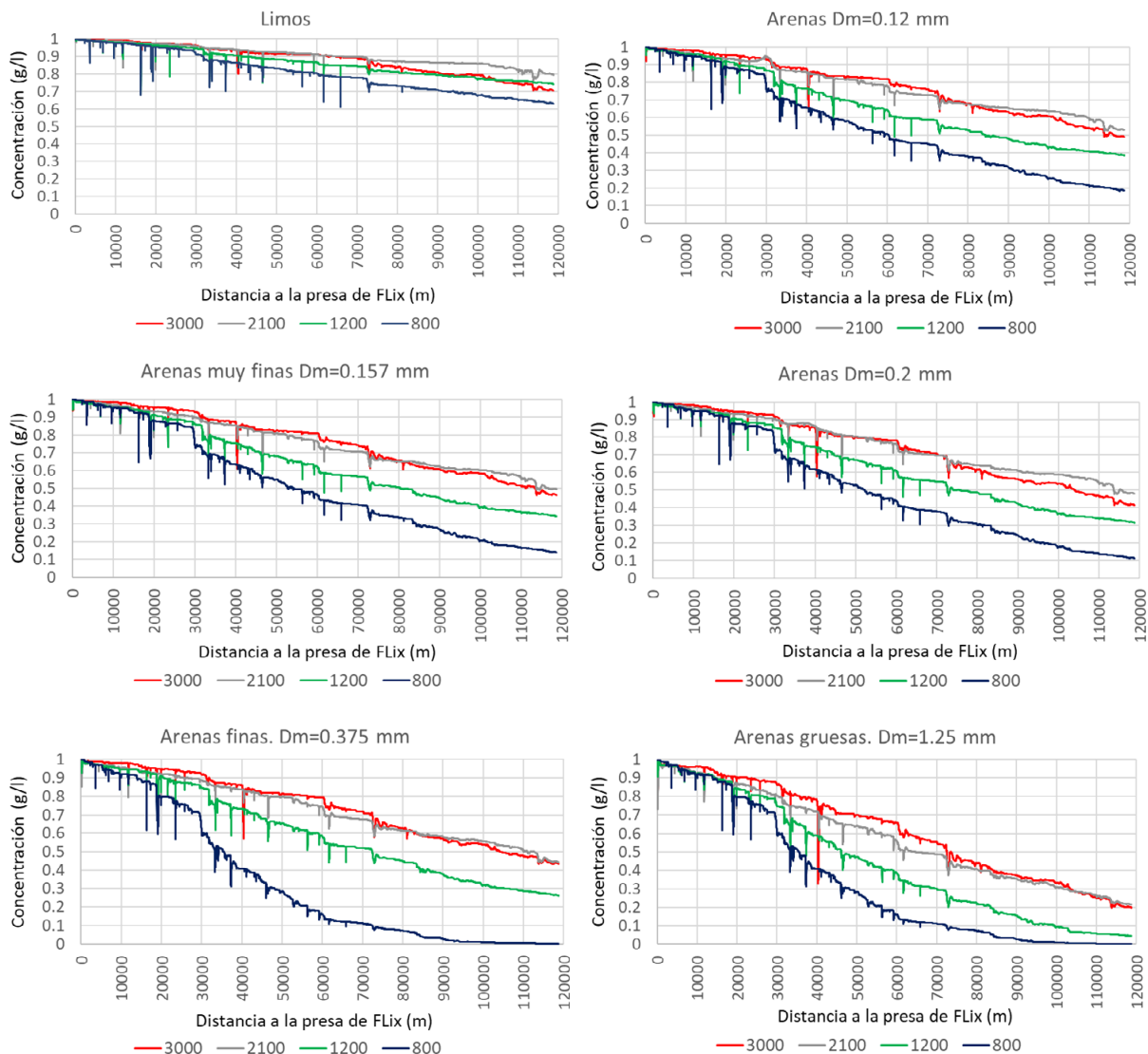


Figura 14 | Simulaciones de la movilización de sólidos en suspensión mediante modelización Iber para diferentes granulometrías y caudales.

La experiencia realizada indica que la concentración de sedimentos en suspensión es muy homogénea en la sección transversal por lo que para próximas campañas sería más interesante muestrear únicamente en el centro de la sección, cerca de la superficie libre. A cambio resultará de gran utilidad intensificar la cadencia de muestreo para disponer de una serie completa de la evolución de la concentración de SS a lo largo de la avenida controlada.

En cualquier caso, este estudio demuestra que el modelo de transporte de sedimentos de van Rijn, es aplicable en el curso bajo del río Ebro y confirma que el río tiene una gran capacidad de transporte. Para ilustrar este extremo se han realizado una serie de simulaciones suponiendo una alimentación en el embalse de Flix de 1 g/l de sólidos en suspensión con distinta granulometría y para distintos caudales (3000 m³/s, 2100 m³/s, 1200 m³/s y 800 m³/s), durante dos días. La Figura 14 muestra la concentración de sólidos en suspensión a lo largo del eje del curso bajo del río Ebro al cabo de dos días, manteniendo las condiciones de contorno de entrada de caudal líquido y sólido. En dos días no se alcanzan condiciones de régimen para el transporte de sedimento, por lo que si se mantuvieran estas condiciones durante más tiempo, el rendimiento de transporte sería mucho mayor. En todo caso, hay que tener en cuenta que, en el curso bajo pueden generarse afecciones por inundación con caudales superiores a 1500 m³/s.

CONCLUSIONES

Analizados los resultados, tanto de la campaña experimental como de la modelación Iber en las secciones de control, se han alcanzado las siguientes conclusiones.

En relación con los datos registrados de concentraciones en la campaña de muestreo, se aprecia una relación lineal de la concentración de sedimentos en suspensión obtenida en los ensayos de laboratorio y en los análisis in situ, validando por tanto estos últimos. Además, los valores de concentración de sólidos en suspensión obtenidos muestran un reparto muy uniforme del transporte de sedimento en suspensión en toda la sección transversal, sin apreciarse diferencias entre las muestras de fondo y en superficie por lo que, para futuras campañas, no será necesario muestrear tantos puntos diferentes en una misma sección.

La avenida del 5 mayo movilizó muy poco sedimento, en parte por episodios previos de avenida que habían lavado el lecho y sobre todo por la dificultad de movilizar sedimento si no se reducen los niveles de los embalses durante las avenidas. Se puede concluir que en futuras crecidas controladas habría que trabajar en la línea de descender progresivamente la cota de la lámina de agua de los embalses de Ribarroja y de Flix. El efecto de movilización de sedimentos puede ser significativamente mayor a cotas bajas.

Además, deberá analizarse en futuras campañas la existencia de corrientes de turbidez en el embalse de Ribarroja. Por supuesto, este fenómeno está condicionado a la estratificación del embalse, que se rompe en otoño (Arbat-Bofill, 2015). Siendo necesario investigar medidas que favorezcan su formación para baipasear el sedimento procedente de las crecidas del Cinca y Segre.

Por último, este estudio valida los resultados del modelo Iber, tras compararlos con los valores de concentración de sólidos en suspensión y caudal en las estaciones de control. De esta manera, la verificación del modelo Iber lo sitúa como una herramienta fundamental sobre la que apoyar el estudio y diseño de las actuaciones enmarcadas en la gestión integrada de los sedimentos, siendo este un ámbito de actuación cada vez más importante de las Confederaciones Hidrográficas.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General del Agua y a la Confederación Hidrográfica del Ebro por su inestimable labor en la mejora de la gestión de los sedimentos, poniendo en marcha pruebas piloto que proporcionan una maravillosa herramienta para el avance del conocimiento. A ENEL-ENDESA por su colaboración en la operación de los embalses durante la crecida controlada. Al proyecto RESTCOAST por su apoyo en los trabajos de campo y financiación de los ensayos de laboratorio. Al grupo Flumen de la UPC y la Universidad de Valencia por su generosa ayuda y apoyo en las labores de campo.

REFERENCIAS

- Arbat-Bofill, M. 2015. *Distribución de temperatura y velocidad en embalses: Análisis numérico-experimental aplicado a los embalses de Sau (Ter) y Ribarroja (Ebro)*. Tesis doctoral. UPC. <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-95799>
- Ariathurai, R., Arulanandan, K. 1978. Erosion rate of cohesive soils. *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, 104(HY2), 279–283. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004937>
- Batalla, R.J., Vericat, D., Tena, A. 2014. The fluvial geomorphology of the lower Ebro (2002-2013): Bridging gaps between management and research. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40(1), 29–52. <https://doi.org/10.18172/cig.2569>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, 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*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- CEDEX. 2021. *Plan para la protección del Delta del Ebro*. Centro de Estudios de Puertos y Costas. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/images/es/planparalaprotecciondeldeltadelebro_jmg_signedfe_tcm30-522381.pdf
- CEDEX. 2022. *Campaña de muestreo de sedimentos en suspensión en el curso bajo del río Ebro durante la avenida controlada del 5 de mayo de 2022*. Nota Técnica. https://www.chebro.es/documents/20121/1548903/Nota_Tecnica_Avenida_Mayo_22_v5.pdf/d9aee623-074c-e4b1-e189-1e1119fbee1e?t=1709812472025
- CHE. 2017. *Análisis de registros de turbidez y transporte de sedimentos en la cuenca del Ebro*. Entidad colaboradora: Universidad de Lleida. Disponible en el archivo de la OPH-CHE.
- Dirección General del Agua. 2023. *Gestión integrada de los sedimentos. Directrices y buenas prácticas en el contexto de la Directiva Marco del Agua*. Versión Española.
- Dolz, J., Bladé, E., Arbat, M. 2010. Estudio de hidrodinámica del Segre. Annex 7 of the work: *Recuperación del Lecho y Mejora del Estado Ecológico del Río Segre en la Confluencia con el Ebro*. T.M. De Mequinenza (Zaragoza). Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Einstein, H. A. 1950. *The Bedload Function for Bedload Transportation in Open Channel Flows*. U.S.D.A. Soil Conservation Service, 1026, pp. 1–71.
- Engelund, F., Hansen, E. 1967. *A Monograph in Sediment Transport in Alluvial Streams*. Teknisk Vorlag, Copenhagen, Denmark.
- Garrote, L. 2018. *Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix*. Confederación Hidrográfica del Ebro.
- López, D., Cuéllar, V. 2011. Paralelización CUDA del método SPH. Aplicaciones en el diseño de estructuras hidráulicas. In *Proc. III Jornadas de Ingeniería del Agua*, Barcelona. JIA.
- López, D. 2016. Aplicación del método SPH al estudio hidráulico de estructuras. Análisis hidrodinámico del aliviadero en pozo de la presa de Nagore (Navarra). *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua*, 3(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2016.03.001>
- López, D., Ramos, T., Sánchez, P., Marivela, R., Díaz, R., Rebollo, J. J., Andrés, F. R., Cuellar, V., De Blas, M., García, J. L. 2018. Smoothed Particle Hydrodynamics Method for Three-Dimensional Open Channel Flow Simulations. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(6), 1599-1611. <https://doi.org/10.29252/jafm.11.06.28608>
- López-Gómez, D., Balairón, L., García-Vera, M.A., Galván, R., Arrazola, C., Polanco, L., Sánchez-Martínez, F.J. 2022. Estudios para la mejora de la gestión de los sedimentos en el curso bajo del río Ebro. *XXX Latin-American Congress. IAHR*.
- López-Gómez, D., de Blas-Moncalvillo, M., Cuéllar-Moro, V. 2024. Herramientas para la gestión sostenible de la sedimentación en el embalse de Marmolejo (España). *Ingeniería Del Agua*, 28(1), 1–16. <https://doi.org/10.4995/ia.2024.20376>
- Meyer-Peter, E., Müller, R. 1948. Formulas for Bedload Transport. *2nd IAHR World Congress*, Stockholm.

- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Silva-Cancino, Salzar, F., López-Gómez, D., Martínez-Gomariz, E. 2023. A Probabilistic Approach for Off-Stream Reservoir Failure Flood Hazard Assessment. *Water*, 15(12), 2202. <https://doi.org/10.3390/w15122202>
- Sanz-Ramos, M., López-Gómez, D., Bladé, E., Dehghan-Souraki, D. 2022. A CUDA Fortran GPU-parallelised hydrodynamic tool for high-resolution and long-term eco-hydraulic modelling. *Environmental Modelling & Software*, 161, March 2023, 105628. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105628>
- Smith, J.D., McLean, S.R. 1977. Boundary Layer Adjustments to Bottom Topography and Suspended Sediment. *Elsevier Oceanography Series*, 19, 1977, 123-151. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70839-0](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70839-0)
- van Rijn, L.C. 1984. Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1613-1641. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:11\(1613\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:11(1613))
- Vericat, D., Batalla, R. J. 2006. Sediment transport in the lower Ebro River (NE Spain). *Geomorphology*, 79(1-2), 72-92. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.09.017>