

Modelización multiescala de avenidas extremas en el tramo medio del río Ebro

Multiscale modeling of extreme flood events in the middle reach of the Ebro River

Pablo Vallés ^{a1,b*}, Ignacio Ojer-García ^{a2}, Jorge Faci ^{a3}, Juan Mairal ^{a4},
Juan Manuel Pérez-García-de-Carellán ^{a5}, Mario Morales-Hernández ^{a6}, Pilar Brufau ^{a7},
Pilar García-Navarro ^{a8}

^a I3A, Universidad de Zaragoza, C/Mariano Esquilor s/n, 50018, Zaragoza, España.

^b SIAME, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Rue de Mirambeau 55, 64600 Anglet, Francia.

E-mail: ^{a1} pvalles@unizar.es, ^{a2} oojer@unizar.es, ^{a3} jfaci@unizar.es, ^{a4} mairalascaso@unizar.es, ^{a5} juanma@unizar.es, ^{a6} mmorales@unizar.es, ^{a7} brufau@unizar.es, ^{a8} pigar@unizar.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 18/08/2025 Aceptado: 04/12/2025 Publicado: 31/01/2026

Citar como: Vallés, P., Ojer-García, I., Faci, J., Mairal, J., Pérez-García-de-Carellán, J.M., Morales-Hernández, M., Brufau, P., García-Navarro, P. 2026. Multiscale modeling of extreme flood events in the middle reach of the Ebro River. *Ingeniería del agua*, 30(1), 14-30. <https://doi.org/10.4995/ia.24491>



RESUMEN

Este trabajo analiza el comportamiento hidrodinámico del tramo medio del río Ebro entre Logroño y Mequinenza, incluyendo los afluentes Ega, Arga y Aragón, ante eventos extremos de avenida. Se evalúa la idoneidad de modelos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y modelos agregados según las características geomorfológicas del cauce. La metodología combina en la fidelidad de representación del tramo a simular, eficiencia numérica y validación con datos hidrológicos. Los resultados indican que los modelos 2D ofrecen alta precisión en zonas con llanuras de inundación extensas, mientras que los 1D resultan más eficientes en tramos estrechos y encauzados. En áreas de gran volumen, como el embalse de Mequinenza, los modelos agregados reducen el coste computacional sin pérdida significativa de precisión. Se concluye que una combinación estratégica de modelos multiescala permite optimizar el equilibrio entre precisión y eficiencia, constituyendo una herramienta clave para las administraciones en la gestión de avenidas.

Palabras clave | modelos multiescala; simulación hidrodinámica; ecuaciones de aguas poco profundas; volúmenes finitos; inundaciones; río Ebro.

ABSTRACT

This study analyzes the hydrodynamic behavior of the middle reach of the Ebro River between Logroño and Mequinenza, including its tributaries Ega, Arga, and Aragón, under extreme flood events. The suitability of one-dimensional (1D), two-dimensional (2D), and aggregated models is assessed based on the geomorphological characteristics of the river channel. The methodology integrates representational accuracy of the topography, numerical efficiency, and validation using available hydrological data. Results show that 2D models provide high accuracy in areas with extensive floodplains, while 1D models are more efficient in narrow, confined sections. In large-volume regions, such as the Mequinenza Reservoir, aggregated models significantly reduce computational costs without substantial loss of accuracy. The study concludes that a strategic combination of multiscale models enables an optimal balance between accuracy and efficiency, offering a valuable tool for public authorities in flood management.

Key words | multiscale models; hydrodynamic simulation; shallow water equations; finite volumes; floods; Ebro River.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, uno de los desastres naturales que más pérdidas causa son las inundaciones (Ripple *et al.*, 2020; Wallemacq *et al.*, 2015), siendo en España el segundo desastre natural que más muertes provocó (215) entre 2000 y 2020 según datos de Protección Civil (Protección Civil, 2021). No sólo son pérdidas humanas lo que acarrea la presencia de estos eventos, sino también pérdidas naturales, económicas y paisajísticas. Sólo en la cuenca del Ebro, las inundaciones ocurridas entre 1980 y 2018 generaron alrededor de 1000 millones de euros en pérdidas, lo que representa el 77% de las pérdidas económicas registradas en Aragón por desastres naturales en ese período (Heraldo de Aragón, 2018b). Por esta razón, es necesario desarrollar y optimizar modelos predictivos que proporcionen información acerca de la evolución de estos eventos, ayudando a cuantificar los daños potenciales (Hu *et al.*, 2023; Knijff *et al.*, 2010; Thielen *et al.*, 2009). Entre estos, los modelos de resolución numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo en lámina libre constituyen una herramienta útil, que ha sido desarrollada y perfeccionada en las últimas décadas (Kalyanapu *et al.*, 2011; Özgen-Xian *et al.*, 2021; Vacondio *et al.*, 2016). A su vez, es imprescindible disponer de medidas reales y precisas de la evolución del flujo para poder calibrar dichos modelos.

Dada la complejidad del estudio de este tipo de flujos, se incorporan frecuentemente aproximaciones que facilitan la resolución de las ecuaciones que los describen. Las distintas hipótesis consideradas dan lugar a sistemas de ecuaciones que conforman los distintos modelos matemáticos. Aunque el fenómeno de una inundación asociada a la crecida en un río es, en esencia, un problema tridimensional (3D), es habitual su estudio a gran escala mediante el promedio de las ecuaciones en la vertical, obteniendo un modelo bidimensional (2D) (Hu *et al.*, 2019; Noh *et al.*, 2018; Vreugdenhil, 1994); e incluso, mediante el promedio en la sección transversal para reducir el fenómeno a una aproximación unidimensional (1D) (Horrit y Bates, 2002; Mark *et al.*, 2004; Samal *et al.*, 2025). Además, en regiones donde la velocidad del flujo es aproximadamente nula, como en un embalse, es frecuente el uso de modelos agregados o 0D, que permiten describir con relativa precisión y alta eficiencia la evolución de ciertas variables hidráulicas (Dazzi *et al.*, 2024; García-Alén *et al.*, 2023). Recientemente, diversos estudios han demostrado la utilidad de combinar modelos 0D con modelos 1D o 2D para representar sistemas hidrológicos complejos, como cuencas con embalses (Echeverribar *et al.*, 2021; Vallés *et al.*, 2025). Este acoplamiento permite aprovechar la eficiencia computacional de los modelos agregados en zonas de flujo cuasiestático, mientras se mantiene una descripción más detallada del flujo en los tramos fluviales. Todos estos modelos permiten representar un mismo fenómeno, diferenciándose en la precisión de sus resultados y en su ámbito de validez.

Por tanto, el estudio de la dinámica fluvial en grandes sistemas hidrográficos requiere la implementación de modelos computacionales de altas prestaciones que permitan una representación precisa y fiable del comportamiento del flujo bajo distintos episodios de avenida. En este contexto, el presente trabajo analiza el comportamiento del tramo del río Ebro comprendido entre Logroño y Mequinenza (Figura 1), incluyendo sus principales afluentes: Ega, Arga y Aragón. Esta región se caracteriza por sufrir frecuentes inundaciones debidas a las crecidas del río Ebro y sus afluentes, dada la presencia de extensas llanuras de inundación, salvo en la región aguas abajo del dominio, donde la presencia de la presa de Mequinenza y el acusado relieve generan un flujo encauzado y cercano al reposo. Dada la amplia extensión del dominio de estudio (más de 700 km de cauce), se ha optado por dividir el tramo en diferentes subdominios, cada uno modelizado con distintas aproximaciones numéricas para optimizar el tiempo de cálculo. La selección del tipo de modelo en cada tramo (0D, 1D, 2D o sus combinaciones) ha estado condicionada por la morfología del cauce, la extensión de la lámina de agua durante episodios de avenida y la necesidad de equilibrar precisión de los resultados con eficiencia computacional. Para evaluar el desempeño de los modelos, se ha realizado una comparación con mediciones procedentes de las estaciones de aforo gestionadas por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), las cuales registran niveles de agua a intervalos de 15 minutos (<https://www.saihebro.com/homepage/estado-cuenca-ebro>). Los resultados obtenidos evidencian la idoneidad de los modelos 2D en zonas con amplias llanuras de inundación, donde la representación del flujo lateral es crucial para capturar la evolución hidrodinámica del sistema. En contraste, en tramos encauzados y de menor anchura, el modelo 1D ha demostrado ser más eficiente y preciso. Asimismo, en el embalse de Mequinenza, la combinación de modelos 2D y 0D ha permitido reducir significativamente el tiempo de cálculo sin comprometer la precisión de los resultados. De este modo, se concluye que este trabajo contribuye al desarrollo de estrategias de modelización del flujo hidrodinámico en ríos, proporcionando una herramienta útil para la gestión de los recursos hídricos y la evaluación de eventos hidrológicos extremos. Los modelos computacionales utilizados en este estudio, resueltos mediante esquemas numéricos explícitos de primer orden basados en el método de volúmenes finitos, han sido desarrollados por el Grupo de Hidráulica Computacional de la

Universidad de Zaragoza, y han sido validados extensamente en configuraciones bidimensionales (Echeverribar *et al.*, 2019b; García-Navarro *et al.*, 2019), unidimensionales (Echeverribar *et al.*, 2021; Murillo y García-Navarro, 2010), y en regiones susceptibles de modelización 0D (Echeverribar *et al.*, 2021; Vallés *et al.*, 2025).

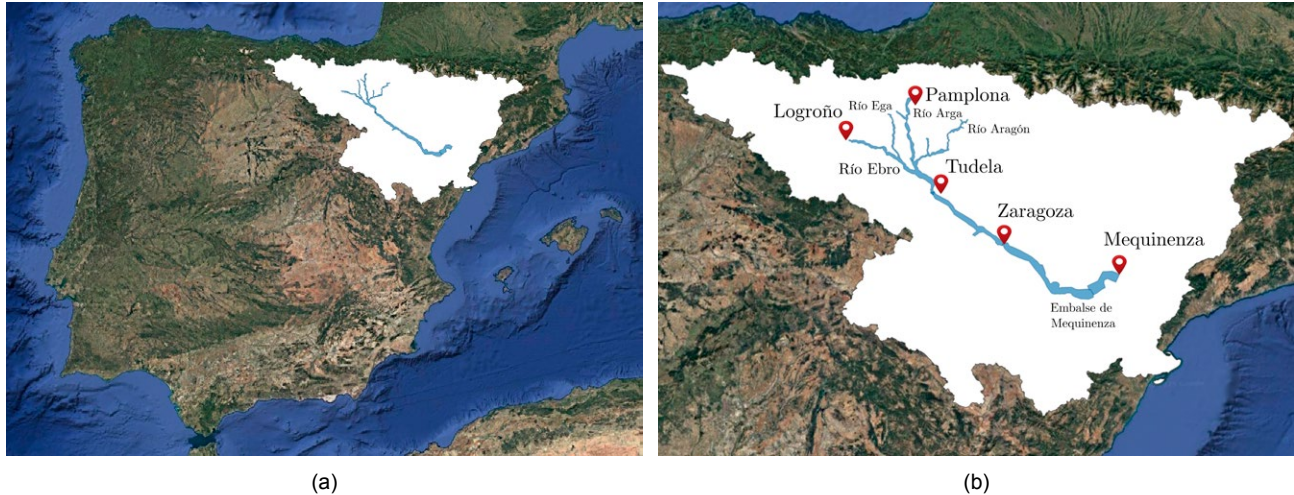


Figura 1 | Vista satelital de la península ibérica (a) y zoom del área de estudio (b). En blanco se muestra la delimitación de la cuenca hidrográfica del Ebro, mientras que en azul se indica el dominio espacial considerado en este estudio.

MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL FLUJO

A continuación, se presentan las ecuaciones que conforman los modelos matemáticos utilizados para describir la evolución del flujo (Figura 2). Estas ecuaciones deben resolverse mediante métodos numéricos, ya que carecen de soluciones analíticas. Dichos métodos no se describen en el presente trabajo, pero sí en las siguientes referencias: Murillo y García-Navarro (2010) y García-Navarro *et al.* (2019).

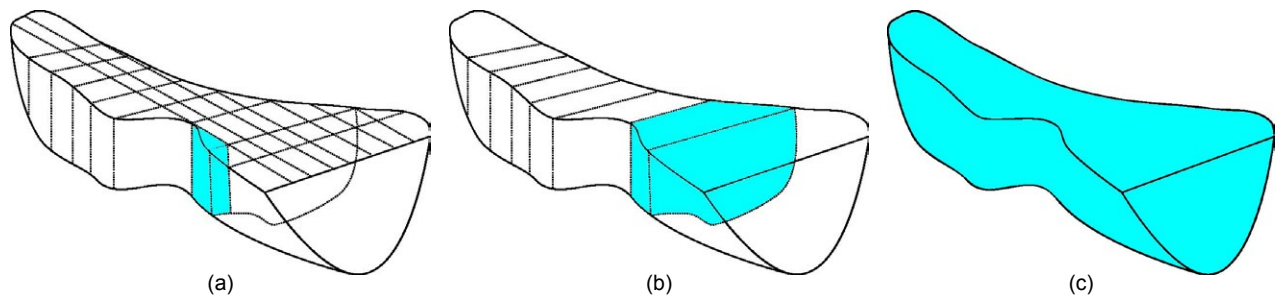


Figura 2 | Esquema de los modelos de flujo 2D (a), 1D (b) y 0D (c).

Modelo de aguas poco profundas 2D

El modelo de aguas poco profundas en 2D se deriva de la integración, a lo largo de la vertical, de las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes (Figura 2a), y está constituido por la ecuación de conservación de la masa y las ecuaciones de conservación del momento (Cunge *et al.*, 1980):

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \left(\frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \right) \\ \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{gh^2}{2} \right) = -gh \left(\frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \right) \end{cases} \quad (1)$$

donde h es el calado, u y v son las velocidades del flujo en las direcciones x e y , respectivamente; g es la aceleración gravitacional, es la cota del fondo (Figura 3a), y n es el coeficiente de rugosidad de Manning, que proporciona la información sobre la rugosidad del terreno (Arcement y Schneider, 1989).

Modelo de aguas poco profundas 1D

El modelo de aguas poco profundas en 1D se obtiene mediante la integración en la sección transversal de las ecuaciones tridimensionales (Figura 2b), y está conformado por la ecuación de conservación de la masa y una única ecuación de conservación del momento (Cunge *et al.*, 1980):

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = g \left[I_2 - A \left(\frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{Q^2 n^2}{A^2 R_h^{4/3}} \right) \right] \end{cases} \quad (2)$$

donde A es el área transversal mojada, Q es el caudal, I_1 e I_2 son las integrales de presión hidrostática y R_h es el radio hidráulico, que relaciona el área transversal mojada con el perímetro mojado, P ($R_h = A/P$). Estas variables se representan en la Figura 3b.

Modelo agregado 0D

Un modelo agregado busca obtener una representación simplificada que permita describir la evolución del flujo en un determinado dominio sin la necesidad de discretizar espacialmente dicha región (Figura 2c). En nuestro caso, el interés en utilizar un modelo agregado radica en la presencia de un embalse en la región aguas abajo del dominio estudiado. Por este motivo, la ecuación que sustenta el modelo agregado corresponde a la ecuación de conservación de masa-volumen, la cual permite obtener la evolución temporal del nivel embalsado:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (3)$$

donde V es el volumen del embalse, Q_{in} es el caudal de entrada al embalse y Q_{out} es el caudal de salida del embalse. Para completar la Ecuación (3), son necesarias las hipótesis en las cuales se basa el modelo agregado utilizado (Nanía y Gómez, 2004):

- La superficie libre del embalse se encuentra a un mismo nivel, H .
- El volumen del embalse, V , es función del nivel H .
- El caudal de salida, Q_{out} , también es función del nivel H .

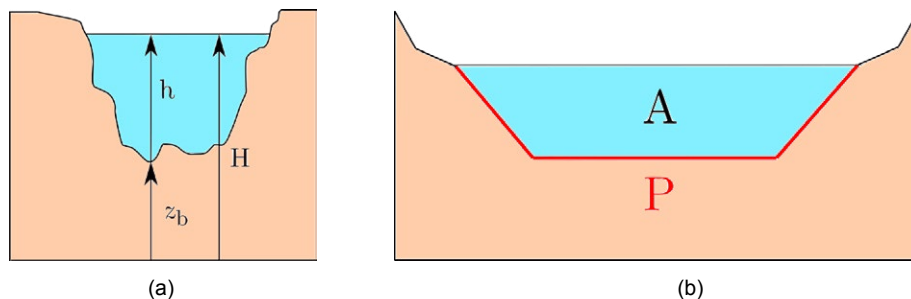


Figura 3 | Esquema de las variables físicas en la sección transversal del cauce: variables principales del flujo (a), y área transversal mojada y perímetro mojado (b).

Teniendo en cuenta que el nivel del embalse de Mequinenza se regula mediante una presa, el caudal de salida debe modelizar correctamente cómo sale el flujo por esta estructura. Por ese motivo, el caudal se define mediante la ley de vertedero (Sotelo, 2002):

$$Q_{out} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_D b H_w^{3/2} + \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) C_D H_w^{5/2} \quad (4)$$

donde $H_w = H - h_{Crest}$ es la diferencia entre el nivel de la superficie libre del embalse, H , y la altura de la cresta del vertedero, h_{Crest} ; C_D es el coeficiente de descarga; α es el doble del ángulo que conforman los lados laterales del trapecio con la vertical; y b es la anchura de la base menor del trapecio (Figuras 4a y 4b). Por simplicidad, y teniendo en cuenta la forma real de las compuertas de la presa de Mequinenza, se asume un vertedero rectangular, por lo que $\alpha = 0$ y $C_D = 0.611$ (Henderson, 1966). Mientras que el caudal de salida, Q_{out} , se obtiene a partir de la Ecuación (4), el caudal de entrada al embalse 0D se obtiene a partir del esquema numérico, al utilizarse el modelo agregado como condición de contorno de los modelos computacionales discretizados 1D y 2D en la región embalsada (Figura 4c), denominando a estos modelos acoplados como modelos 1D-0D y 2D-0D, respectivamente (Dazzi *et al.*, 2024; Vallés *et al.*, 2025).

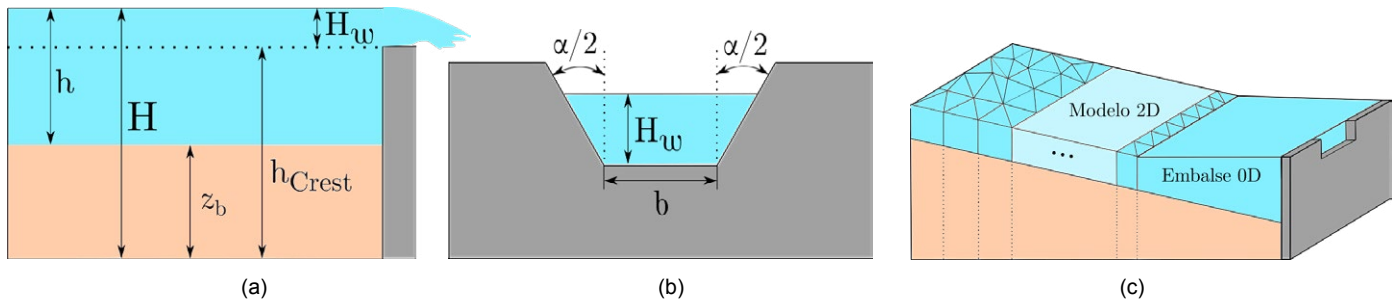


Figura 4 | Vista lateral (a) y vista frontal (b) de un vertedero; y esquema del modelo acoplado 2D-0D, donde se impone el modelo 0D como condición de contorno del modelo 2D (c).

DOMINIO DE ESTUDIO

El principal interés en analizar esta región radica en las frecuentes inundaciones que ha sufrido en las últimas décadas (Heraldo de Aragón, 2018b). Dado que el dominio abarca más de 700 kilómetros de cauce y aproximadamente 1600 km² de extensión, este se divide en 5 tramos (Figura 1b) con el objetivo de analizar de forma más precisa cada subdominio, así como aplicar diferentes aproximaciones numéricas que permitan optimizar la eficiencia computacional:

- Tramo Logroño-Tudela (TM1): Tramo del río Ebro comprendido entre las localidades de Logroño y Tudela, conformado por 120 km de cauce y 286 km² de extensión. En él desembocan los ríos Ega, Aragón y Arga.
- Río Ega (TM1.1): Afluente del río Ebro, con 52 km de cauce y 42 km² de extensión.
- Río Aragón (TM1.2): Afluente del río Ebro, con 105 km de cauce y 94 km² de extensión.
- Río Arga (TM1.3): Afluente del río Ebro, con 92 km de cauce y 130 km² de extensión.
- Tramo Tudela-Zaragoza (TM2): Tramo del río Ebro comprendido entre Tudela y Zaragoza, con 110 km de cauce y 298 km² de extensión. Caracterizado por la presencia de amplias llanuras de inundación (Figura 5a).
- Tramo Zaragoza-Mequinenza (TM3): Tramo del río Ebro comprendido entre Zaragoza y Mequinenza, con 222 km de cauce y 722 km² de extensión. Se caracteriza, aguas arriba, por relieves de poca pendiente y amplias zonas inundables, mientras que, aguas abajo, presenta paredes verticales que encauzan el flujo, generando una dinámica cercana al reposo debido a la presencia del embalse de Mequinenza (Figura 5b).

Todos los tramos mencionados se modelizan mediante un enfoque 2D y 1D, a excepción del tramo TM3, el cual se modeliza mediante modelos acoplados 2D-0D y 1D-0D debido a la presencia del embalse en su región final.



Figura 5 | Inundación en la localidad de Novillas durante el evento de inundación de 2018 (a) e imagen satélite del tramo final del embalse de Mequinenza (b). Fuente: Guardia Civil (a) y Mapquest (b).

Modelo computacional

El modelo computacional de cada uno de los tramos se caracteriza principalmente por el modelo digital de terreno (MDT), que proporciona la topografía del dominio; el mapa de rugosidad, que contiene información sobre el coeficiente de Manning presente en las ecuaciones que caracterizan los modelos (véanse los sistemas de ecuaciones (1) y (2)); la malla de cálculo; así como por las condiciones iniciales y de contorno.

Modelo digital de terreno

Los modelos digitales de terreno (MDTs) utilizados para caracterizar la topografía de cada tramo se obtienen del Instituto Geográfico Nacional (IGN, <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/home>), con una resolución espacial de 2×2 m (Figura 6a). Tal y como se observa en la Figura 6, la elevación en las llanuras de inundación se representa con alta precisión; sin embargo, en el cauce principal dicha precisión se ve frecuentemente afectada por la presencia del flujo, lo que puede generar escalones artificiales en el MDT. Para corregir estas zonas, se rebaja la elevación del cauce siguiendo la evolución espacial que

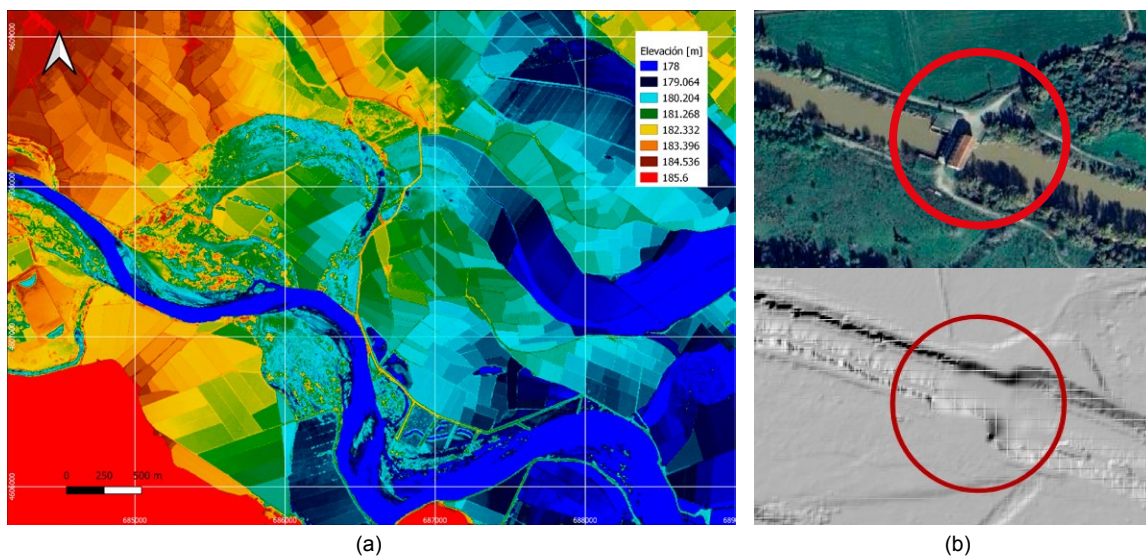


Figura 6 | Ejemplo de MDT en el tramo Zaragoza-Mequinenza (a) y ejemplo de modificación del MDT debido a la presencia de la elevación de una estructura hidráulica en el cauce (b).

debería tener, en consonancia con las regiones aguas arriba y aguas abajo. Además, la presencia de estructuras hidráulicas a lo largo del cauce, como puentes, diques o compuertas, genera distorsiones en el MDT, por lo que estas estructuras se eliminan del modelo para representar adecuadamente la morfología del cauce (Figura 6b). Estas modificaciones se aplican de manera sistemática a lo largo de todos los tramos estudiados, asegurando una representación coherente y continua del cauce y las llanuras de inundación.

Mapa de rugosidad

Además de la topografía proporcionada por el MDT, es necesario disponer de información sobre la rugosidad del suelo para caracterizar los sistemas de ecuaciones (1) y (2), que describen los modelos computacionales utilizados. Para ello, se utilizan los mapas de uso del suelo proporcionados por el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE, <https://www.siose.es/presentacion>). A partir de esta información, a cada tipo de uso del suelo se le asigna un coeficiente de Manning de acuerdo con valores recogidos en la literatura (Dirección General del Agua, 2011; Palmeri *et al.*, 2002). Sin embargo, en algunas regiones, el uso del suelo asignado resulta incorrecto o impreciso. Por este motivo, se corrigen estas regiones mediante los valores mostrados en la Tabla 1. Como resultado, se obtienen mapas de rugosidad como el que se muestra en la Figura 7.

Tabla 1 | Coeficientes de rugosidad de Manning para diferentes tipos de suelo.

Tipo de suelo	Coficiente de rugosidad de Manning ($s\ m^{-1/3}$)
Suelo agrícola	0.028
Cauce	0.035
Área urbana	0.050
Islas fluviales	0.060

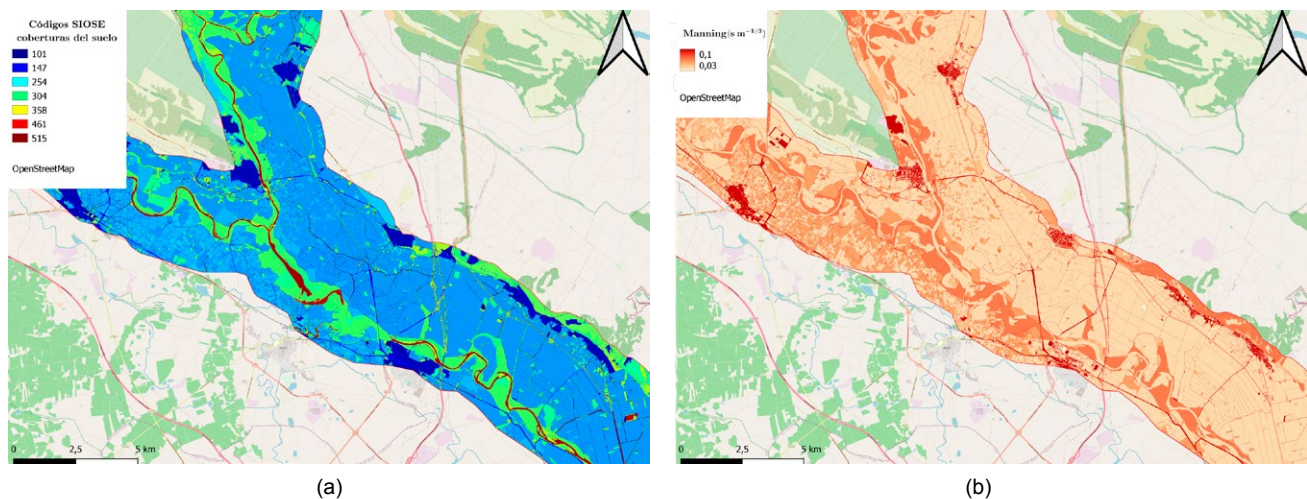


Figura 7 | Ejemplo de mapa de usos del suelo con códigos SIOSE de cobertura del suelo (a) y ejemplo de mapa de coeficientes de Manning (b) en el tramo Logroño-Tudela.

Malla de cálculo

Tras obtener un MDT y un mapa de usos del suelo lo suficientemente precisos para representar correctamente la topografía y la rugosidad del dominio, se procede a la construcción de la malla de cálculo para cada uno de los modelos. La geometría y el tamaño constituyen un factor determinante en el coste computacional de la simulación. Por tanto, es necesario mantener equilibrio entre eficiencia computacional y precisión de los resultados. Con el fin de garantizar dicho compromiso, se aplica un mayor nivel de refinamiento en aquellas zonas que presumiblemente requieren más detalle en la simulación, como el cauce y las motas (Figura 8),

debido a la complejidad de sus geometrías. En cambio, en la llanura de inundación y áreas lejanas al cauce, se emplea un mallado más grueso. La Tabla 2 muestra los valores mínimos y máximos de discretización utilizados en la malla computacional 2D. El mallado óptimo se obtiene mediante un proceso iterativo y de calibración, en el que se ajustó progresivamente el tamaño de celda con el objetivo de alcanzar el mejor compromiso entre precisión y coste computacional. En este proceso, se generó inicialmente una malla base de alta resolución que posteriormente se adaptó en función de la relevancia hidráulica de cada zona, manteniendo celdas finas en el cauce y aumentando su tamaño en las llanuras de inundación. Este procedimiento permitió garantizar una representación adecuada de las condiciones hidráulicas sin necesidad de realizar un análisis formal de independencia de malla. En el caso del modelo 1D, el tamaño de celda se mantiene constante a lo largo de cada tramo. Los tramos TM1, TM2 y TM3 presentan un número de celdas significativamente mayor que los afluentes TM1.1, TM1.2 y TM1.3, debido principalmente a su mayor extensión tanto en longitud de cauce como en superficie. En cuanto a las mallas del modelo 1D, el número de celdas varía en función de la complejidad geomorfológica del cauce, siendo necesario un menor tamaño de celda en tramos meandrosos, como ocurre en TM1.1, TM1.2 y TM2 (Tabla 2).

Tabla 2 | Características de las mallas de cálculo 1D y 2D de cada uno de los tramos estudiados, así como información de las condiciones de contorno e iniciales impuestas en el evento simulado.

Tramo	Celdas 2D	Lado celda 2D (m)	Celdas 1D	Tamaño celda 1D (m)	CI	CCE	CCS
TM1	490000	10 – 150	1400	91.9	Estacionario, $Q=356 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	Hidrograma	Curva de aforo
TM1.1	161000	5 – 100	1300	39.3	Estacionario, $Q=11.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	Hidrograma	Curva de aforo
TM1.2	231000	10 – 130	2000	37.9	Estacionario, $Q=52.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	Hidrograma	Curva de aforo
TM1.3	184000	8 – 120	700	115.4	Estacionario, $Q=206 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	Hidrograma	Curva de aforo
TM2	400000	10 – 150	3000	39.5	Estacionario, $Q=345 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	Hidrograma	Curva de aforo
TM3	366000	10 – 250	900	253.7	Estacionario, $Q=425 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	Hidrograma	Modelo 0D

Condiciones iniciales y de contorno externas

Junto con la condición inicial (CI), las condiciones de contorno completan los sistemas de ecuaciones que conforman los modelos, permitiendo resolver las variables hidráulicas. La condición inicial para todos los modelos computacionales corresponde a un estado estacionario, el cual se alcanza cuando el caudal que ingresa al dominio es igual al que egresa. La condición de contorno de entrada (CCE) consiste en un hidrograma para todos los tramos, cuyo valor proviene de las medidas de caudal proporcionadas por la CHE en las estaciones de aforo ubicadas aguas arriba de cada tramo. Estos datos fueron previamente validados para garantizar su consistencia y fiabilidad, dado que se utilizan en la evaluación de los modelos matemáticos. En cuanto a la condición de contorno de salida (CCS), se impone una curva de aforo, excepto en el tramo TM3, donde se utiliza un modelo agregado 0D, tal como se ha descrito previamente. La curva de aforo impuesta relaciona el caudal circulante en la salida con el nivel en esa región, y su valor también es proporcionado por la CHE. Estas condiciones, impuestas en el evento simulado, se recogen en la Tabla 2.

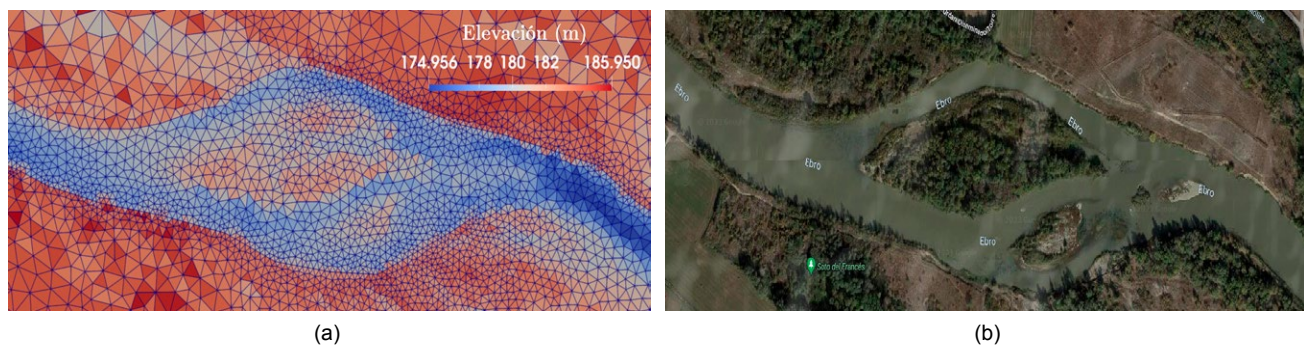


Figura 8 | Comparación entre la vista vía satélite (a) y la malla de cálculo (b) de una zona con una isla fluvial en el tramo TM3.

Condiciones de contorno internas

Dentro del dominio de estudio, existen estructuras hidráulicas que desempeñan un papel fundamental en la evolución temporal del flujo, por lo que deben ser representadas adecuadamente en el modelo computacional. Estas estructuras se incorporan como condiciones de contorno internas, que introducen ecuaciones adicionales a las de los sistemas (1) y (2). En particular, se modelizan como condiciones de contorno internas las motas, estructuras cuya función es encauzar el flujo y evitar su desbordamiento hacia campos de cultivo y otras zonas adyacentes al cauce. Este tipo de estructuras se representa exclusivamente en el modelo 2D, ya que el modelo 1D, al tratarse de una aproximación promediada en la sección transversal, no permite representar la llanura de inundación. La representación de las motas puede realizarse mediante dos estrategias (Figura 9): (i) utilizando la elevación proporcionada por el MDT, lo cual requiere un tamaño de celda lo suficientemente pequeño para capturar con precisión la geometría topográfica; o (ii) mediante la incorporación de una condición de contorno interna que imponga la ley de descarga de un vertedero rectangular (véase Ecuación (4)) cuando el nivel del flujo supera la altura de la mota. Esta última estrategia permite reducir significativamente el coste computacional al disminuir el número de celdas sin comprometer de forma sustancial la precisión de los resultados (Echeverribar *et al.*, 2019a).

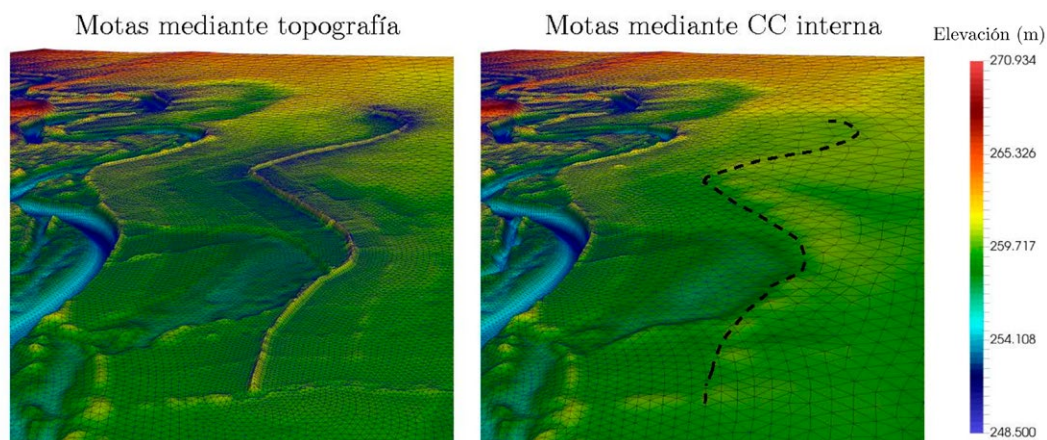


Figura 9 | Esquema de las dos posibles estrategias para representar una mota en el modelo computacional.

RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el evento de inundación ocurrido en abril de 2018 en los tramos analizados, dado que se trata de una de las avenidas que más pérdidas ha provocado en la región de Aragón en las últimas décadas (Heraldo de Aragón, 2018a). Este análisis se realiza de manera individual en cada tramo, evaluando la precisión y la eficiencia de cada uno, con el objetivo de obtener un modelo global previamente validado. Para cada tramo, se muestra el hidrograma correspondiente a la condición de contorno de entrada durante dicho evento, así como la evolución temporal simulada y observada del caudal en las distintas estaciones de aforo ubicadas a lo largo del cauce (Figuras 10, 11, 12, 13, 14 y 15). Estos hidrogramas de entrada (Figuras 10a, 11a, 12a, 13a, 14a y 15a) corresponden a datos medidos y proporcionados por la CHE. Dado que cada tramo se analiza de forma individualizada, estos hidrogramas no son acumulados ni resultan de la simulación, sino que representan los caudales reales registrados en el río principal del tramo y en sus afluentes durante el evento. El resto de las condiciones iniciales y de contorno se recogen en la Tabla 2. Además, las láminas de inundación simuladas y observadas para los tramos principales TM1, TM2 y TM3 pueden consultarse de forma interactiva mediante la herramienta BeMaps, desarrollada por Geospatiumlab S.L. en colaboración con GEOT (Grupo de Estudios de Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza), en el enlace: <https://bemaps.unizar.es/user-map/684belf3c8c0ee487a5317f9/view>.

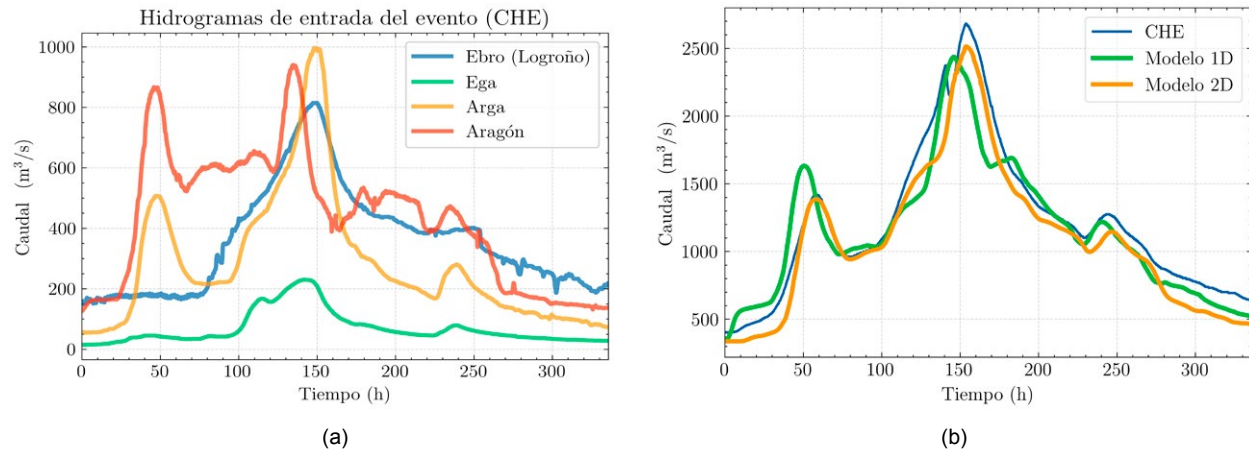


Figura 10 | Hidrograma de entrada en el tramo TM1 (a) y comparación de la evolución temporal del caudal medido y simulado en la estación de aforo de Castejón (A002) en el tramo TM1 (b) para el evento de 2018.

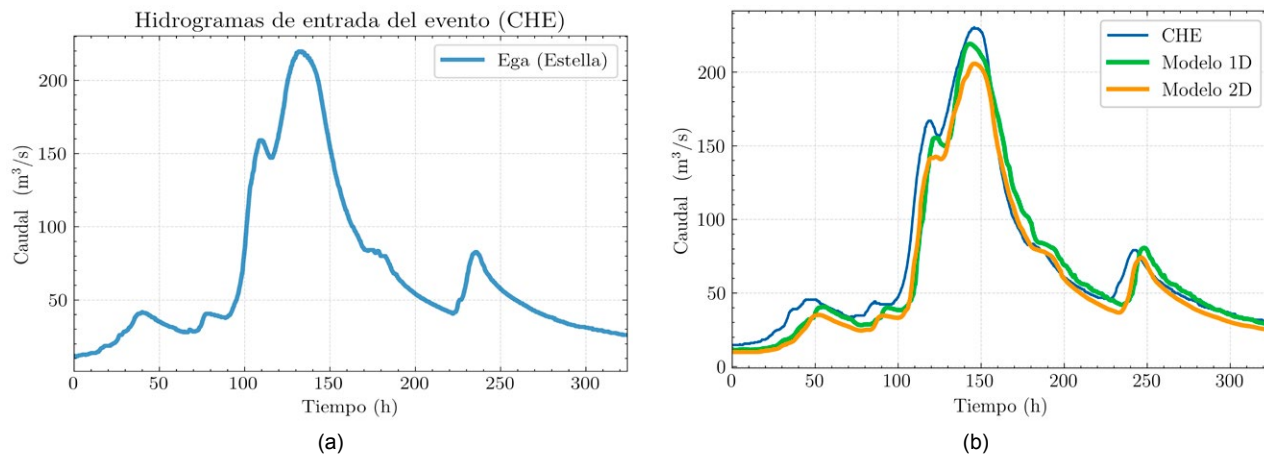


Figura 11 | Hidrograma de entrada en el tramo TM1.1 (a) y comparación de la evolución temporal del caudal medido y simulado en la estación de aforo de Andosilla (A003) en el tramo TM1.1 (b) para el evento de 2018.

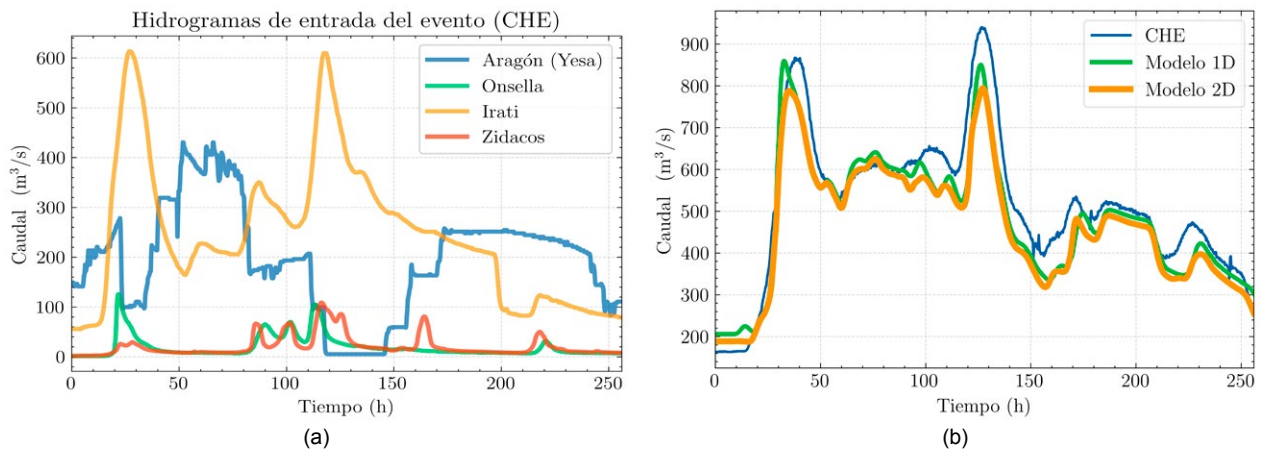


Figura 12 | Hidrograma de entrada en el tramo TM1.2 (a) y comparación de la evolución temporal del caudal medido y simulado en la estación de aforo de Caparros (A005) en el tramo TM1.2 (b) para el evento de 2018.

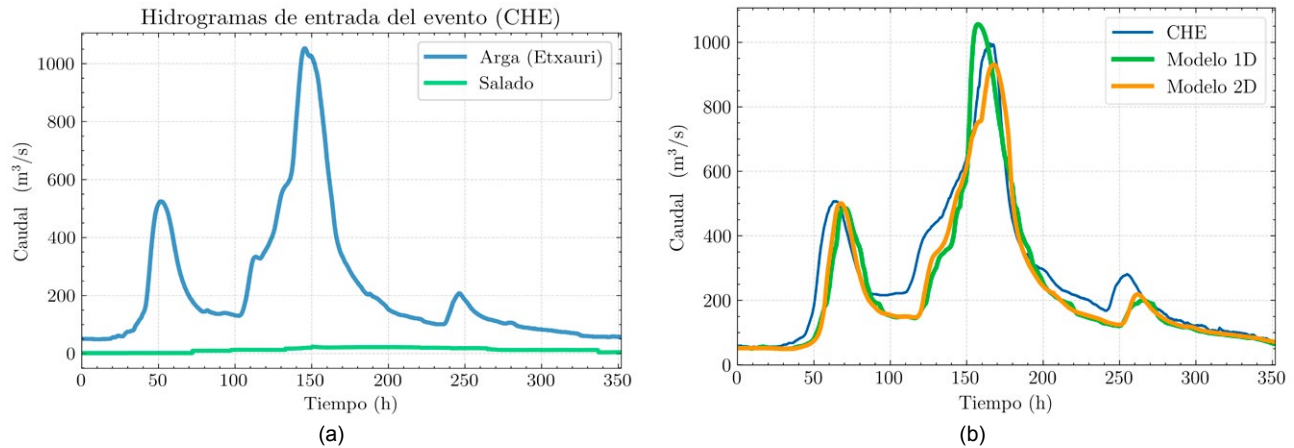


Figura 13 | Hidrograma de entrada en el tramo TM1.3 (a) y comparación de la evolución temporal del caudal medido y simulado en la estación de aforo de Funes (A004) en el tramo TM1.3 (b) para el evento de 2018.

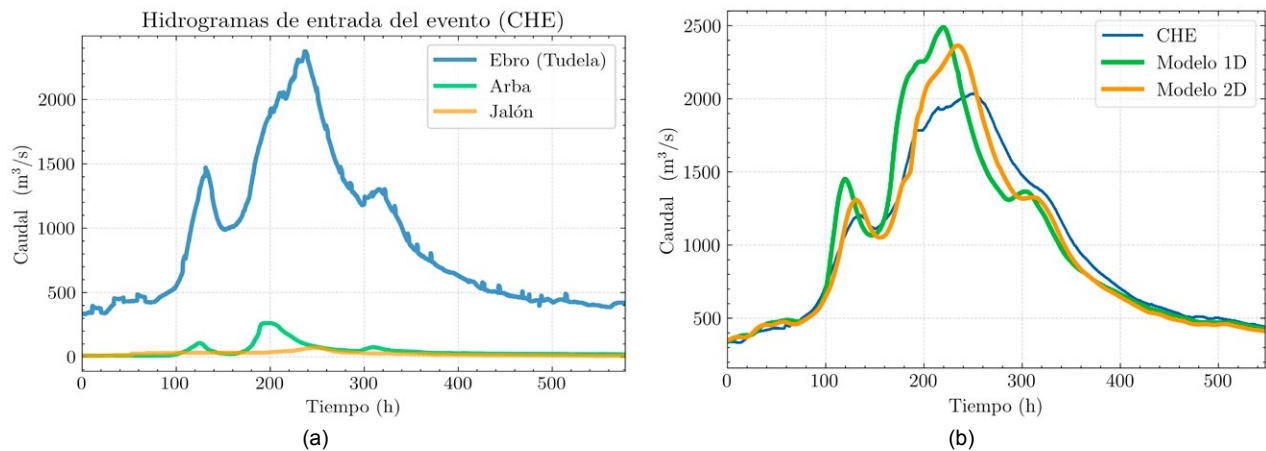


Figura 14 | Hidrograma de entrada en el tramo TM2 (a) y comparación de la evolución temporal del caudal medido y simulado en la estación de aforo de Zaragoza (A011) en el tramo TM2 (b) para el evento de 2018.

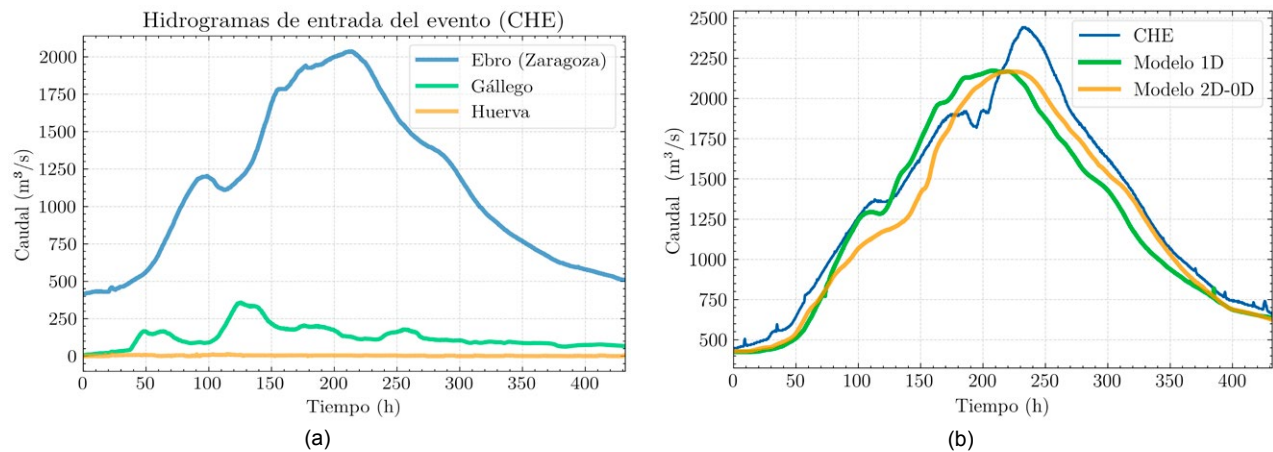


Figura 15 | Hidrograma de entrada en el tramo TM3 (a) y comparación de la evolución temporal del caudal medido y simulado en la estación de aforo de Gelsa (A263) en el tramo TM3 (b) para el evento de 2018.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de los resultados mostrados en la sección anterior, se presenta un análisis de su precisión, utilizando parámetros cuantitativos, así como una discusión sobre la eficiencia computacional de los modelos. Para ello, se emplean distintos parámetros que permiten evaluar la precisión de los modelos tanto en el cauce como en la llanura de inundación.

- Parámetros de evaluación en el cauce. Estos parámetros cuantifican la capacidad del modelo para reproducir la evolución del caudal, prestando especial atención a la predicción del pico máximo durante el evento simulado. En particular, se utilizan los siguientes indicadores:
 - Error Absoluto Medio (*Mean Absolute Error*, MAE): Mide la precisión global del caudal simulado a lo largo del evento, comparando el valor simulado con el observado en cada instante de tiempo:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_{i,sim} - Q_{i,real}| \quad (5)$$

donde N es el número de estados temporales observados, $Q_{i,sim}$ es el caudal simulado en el instante i , y $Q_{i,real}$ es el caudal medido en el mismo instante.

- Porcentaje de Diferencia en el Pico (*Peak Percentage Difference*, PPD): Evalúa la precisión en la estimación del valor máximo de caudal durante el evento:

$$PPD(\%) = 100 \times \frac{(Q_{sim} - Q_{real})}{Q_{real}} \quad (6)$$

donde Q_{sim} y Q_{real} representan el caudal máximo simulado y observado, respectivamente. Un valor de $PPD > 0$ indica una sobreestimación del pico máximo por parte del modelo computacional, mientras que $PPD < 0$ implica una subestimación o laminación del pico en la simulación.

- Diferencia de Tiempo del Pico (*Peak Time Difference*, PTD): Permite cuantificar el desfase temporal en la predicción del pico máximo:

$$PTD = t_{Q,sim} - t_{Q,real} \quad (7)$$

donde $t_{Q,sim}$ es el instante en el que se alcanza el caudal máximo simulado, y $t_{Q,real}$ es el instante correspondiente en las observaciones. De esta forma, si $PTD > 0$, el modelo adelanta la predicción del pico, mientras que si $PTD < 0$, el modelo computacional se retrasa respecto a la realidad.

- Parámetros para la llanura de inundación. Para evaluar la precisión de la evolución del flujo en la llanura de inundación, se utilizan las envolventes de máxima extensión medidas por la CHE como referencia (Figura 16a). Cada celda es clasificada según una matriz de confusión (Figura 16b) en una de las siguientes categorías:
 - Verdadero positivo (*True Positive*, TP): celda que está mojada en la simulación y la realidad.
 - Falso negativo (*False Negative*, FN): celda que no está mojada en la simulación, pero sí en la realidad.
 - Falso positivo (*False Positive*, FP): celda que está mojada en la simulación, pero no en la realidad.
 - Verdadero negativo (*True Negative*, TN): celda que no está mojada en la simulación ni en la realidad.
 - A partir de estas categorías, se definen las siguientes métricas de verificación categórica (Gangrade et al., 2023):
 - *Hit Rate* (HR). Indica la tasa de zonas inundadas en el evento real que el modelo es capaz de predecir (mayor precisión en el modelo si $HR \approx 1$):

$$HR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (8)$$

- *False Alarm Ratio* (FAR). Mide la tendencia a sobreestimar ($FAR \approx 1$) la llanura de inundación:

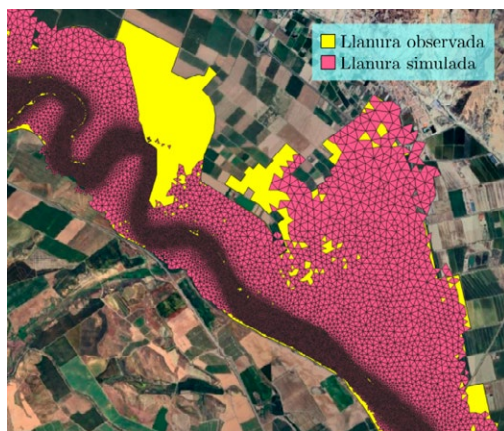
$$FAR = \frac{FP}{TP + FP} \quad (9)$$

- *Critical Success Index* (CSI). Mide la tendencia a la sobreestimación y a la subestimación en la representación de la llanura de inundación (mayor precisión en el modelo si $CSI \approx 1$):

$$CSI = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (10)$$

Los valores obtenidos para las métricas de evaluación se presentan en la Tabla 3 para el modelo 1D y en la Tabla 4 para el modelo 2D. En la Tabla 3 no se incluyen las métricas relativas a la llanura de inundación, ya que este modelo, al estar promediado en la sección transversal, no permite representar el flujo lateral ni, por tanto, la inundación en esta región del dominio. Asimismo, no se incluyen dichas métricas para los tramos TM1.1, TM1.2 y TM1.3 en la Tabla 4 por falta de datos observacionales. Como se aprecia en ambas tablas, los errores MAE y PPD son, en general, menores en los tramos principales (TM1, TM2, y TM3) cuando se utiliza el modelo 2D. Por ejemplo, el parámetro MAE disminuye un 9%, un 26% y un 20% en los tramos TM1, TM2 y TM3, respectivamente, cuando se usa el modelo 2D en vez del modelo 1D. Esto se debe a que en estos tramos el flujo tiende a desbordarse hacia la llanura de inundación, donde el modelo 2D reproduce con mayor realismo los gradientes laterales de velocidad y la redistribución del caudal. Sin embargo, en los afluentes (TM1.1, TM1.2 y TM1.3), donde el flujo permanece mayoritariamente encauzado y la llanura de inundación no desempeña un papel relevante en la evolución de la avenida, el modelo 1D proporciona resultados más precisos, ya que la componente lateral del flujo tiene menor relevancia. A pesar de ello, el parámetro PTD muestra valores más elevados con el modelo 1D en comparación con el modelo 2D. Esta diferencia se debe a que el modelo 1D, al no representar la llanura de inundación, no captura el efecto de laminación que ocurre cuando el flujo se extiende sobre esta zona, mientras que el modelo 2D sí lo contempla, resultando en predicciones más ajustadas temporalmente (PTD más bajos). Por otro lado, las métricas de evaluación de la llanura de inundación reportadas en la Tabla 4 indican una elevada precisión del modelo 2D en la representación de esta región del dominio. En particular, se obtienen valores altos de HR (superiores a 0.9) y valores reducidos de FAR (inferiores a 0.2), dando lugar a valores de CSI cercanos o superiores a 0.8 en todos los tramos. Esta precisión es especialmente destacable en el tramo TM3, lo que demuestra que la utilización de un modelo 0D para representar el embalse no reduce la precisión de los resultados. Finalmente, con el objetivo de evaluar la eficiencia computacional de los modelos utilizados, se presenta la Tabla 5, donde se recogen los tiempos computacionales para cada tramo y modelo, así como el valor de la variable FTTR (*Faster Than Real Time*), definido como:

$$FTTR = \frac{\text{Tiempo real del evento}}{\text{Tiempo computacional}} \quad (11)$$



(a)

		Valores medidos	
		Mojado	Seco
Valores simulados	Mojado	Verdadero positivo (TP)	Falso positivo (TP)
	Seco	Falso negativo (TP)	Verdadero negativo (TP)

(b)

Figura 16 | Ejemplo de comparación de llanura de inundación simulada y medida (a) y matriz de confusión de las métricas utilizadas (b).

Los valores de FTRT (Tabla 5) evidencian una elevada eficiencia computacional en todos los casos, especialmente en los modelos 1D, donde las simulaciones se ejecutan entre tres y cinco órdenes de magnitud más rápido que el tiempo físico del evento. En el caso de los modelos 2D, los valores de FTRT oscilan entre 67 y 180, siendo superiores en los afluentes debido al menor número de celdas mojadas en el dominio respecto a los tramos principales.

Tabla 3 | Métricas de evaluación para el modelo 1D de cada uno de los tramos estudiados durante el evento de 2018.

Tramo	MAE ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	PPD (%)	PTD (h)
TM1	138	-9.11	-7.75
TM1.1	9.40	-4.93	-2.75
TM1.2	51.0	-8.55	-2.50
TM1.3	58.1	6.00	-7.00
TM2	147	22.2	-30.00
TM3	146	-11.1	-23.75

Tabla 4 | Métricas de evaluación para el modelo 2D de cada uno de los tramos estudiados durante el evento de 2018.

Tramo	MAE ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	PPD (%)	PTD (h)	HR	FAR	CSI
TM1	126	-6.25	0.25	0.93	0.15	0.80
TM1.1	10.4	-10.7	0.25	-	-	-
TM1.2	56.8	-15.5	0.5	-	-	-
TM1.3	48.7	-6.52	3.75	-	-	-
TM2	109	13.6	-18.25	0.96	0.19	0.79
TM3	117	-11.3	-12.5	0.97	0.11	0.87

Tabla 5 | Tiempos computacionales y valores del FTRT para el evento de 2018 en los diferentes tramos estudiados. *Tiempo obtenido mediante modelo 1D-0D. **Tiempo obtenido mediante modelo 2D-0D.

Tramo	Tiempo evento (h)	Tiempo 1D (s)	FTRT	Tiempo 2D (h)	FTRT
TM1	336	32.8	37000	4.97	67.6
TM1.1	324	34.6	33000	1.83	177
TM1.2	352	7.08	179000	2.02	174
TM1.3	256	6.38	144000	1.75	146
TM2	578	353	5892	5.17	112
TM3	432	13.1*	119000	4.56**	94.7

CONCLUSIONES

Tras la realización y análisis de las simulaciones correspondientes al evento de avenida de 2018, se ha comprobado que los modelos desarrollados para cada uno de los tramos proporcionan resultados satisfactorios, tanto en el cauce como en las llanuras de inundación. En particular, los modelos construidos para los tramos principales TM1, TM2 y TM3 han demostrado una adecuada capacidad para reproducir tanto la altura como el momento de llegada de los picos de caudal en las estaciones de aforo de referencia. Las métricas obtenidas para la llanura de inundación corroboran también una alta precisión en la representación espacial del evento. En cuanto a los afluentes Ega, Arga y Aragón, la evaluación se ha limitado a la evolución del flujo en el cauce, dado que no se dispone de datos observacionales sobre la extensión de la inundación en estas regiones. Aun así, los resultados en estos tramos muestran una buena concordancia entre las simulaciones y las observaciones en las estaciones de aforo. Por otro lado, se ha mostrado que una elevada precisión no implica necesariamente un alto coste computacional, como se refleja en los valores elevados del parámetro

FTRT, especialmente en los modelos 1D. En los tramos principales (TM1, TM2 y TM3), el uso de modelos 1D conlleva una pérdida notable de precisión, así como la imposibilidad de representar la dinámica en la llanura de inundación. Sin embargo, en los afluentes (TM1.1, TM1.2 y TM1.3), los resultados obtenidos con los modelos 1D son similares o incluso más precisos que los del modelo 2D, pese a su menor coste computacional. Esto se debe a que el flujo en estos afluentes está mayoritariamente encauzado, por lo que su comportamiento se ajusta bien a una modelización unidimensional, basada en una aproximación a lo largo de la sección transversal.

Algunas de las discrepancias observadas en la evolución del flujo en el cauce en tramos como Zaragoza-Mequinenza (Figura 15) podrían explicarse por alteraciones topográficas durante el evento, como la rotura de motas. Asimismo, errores o simplificaciones en la digitalización del cauce (véase sección *Modelo digital de terreno*), junto con la imposibilidad de recoger los cambios en la topografía, constituyen una limitación en los modelos, al igual que la falta de información sobre procesos hidrológicos como la infiltración o la precipitación, que pueden provocar variaciones significativas del volumen de agua dentro del dominio. Como línea futura de trabajo, se propone incorporar al modelo la capacidad de simular este tipo de fenómenos. Esto permitiría no solo mejorar la precisión de las simulaciones, sino también dotar al modelo de un mayor realismo y utilidad como herramienta predictiva frente a eventos extremos de inundación. A su vez, se prevé incluir procesos hidrológicos, como la infiltración, exfiltración o precipitación, que podrían contribuir a una mayor precisión en la predicción del flujo. Finalmente, se plantea desarrollar una simulación global que integre todos los tramos del sistema, empleando los hidrogramas calculados en cada tramo como condiciones de contorno para el siguiente. Este enfoque permitiría evaluar de forma más realista la propagación del flujo y validar el comportamiento conjunto del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se encuentra en el marco del proyecto de investigación 2023/2009 *Convenio para la mejora y ampliación de la herramienta computacional de simulación para la toma de decisiones en la gestión de inundaciones en la Cuenca del Ebro*. Además, los autores quieren agradecer también a la Confederación Hidrográfica del Ebro su disponibilidad de consulta y gestión de datos, y a Jose Segovia, a Sergio Martínez, y a Víctor Loras por su ayuda y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Arcement, G.J., Schneider, V.R. 1989. *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. Water Supply Paper 2339. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/wsp2339>
- Cunge, J., Holly, F., Verwey, A. 1980. *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. En Macmillan Series in Civil Engineering; Pitman: Londres, Reino Unido.
- Dazzi, S., Verbeni, R., Mignosa, P., Vacondio, R. 2024. Simulation of Flood-Control Reservoirs: Comparing Fully 2D and 0D–1D Models. *Hydrology*, 11(11), 180. <https://doi.org/10.3390/hydrology11110180>
- Dirección General del Agua. 2011. *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Gobierno de España, Madrid, España.
- Echeverribar, I., Morales-Hernández, M., Brufau, P., García-Navarro, P. 2019a. Use of internal boundary conditions for levees representation: application to river flood management. *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 1253–1271. <https://doi.org/10.1007/s10652-018-09658-6>
- Echeverribar, I., Morales-Hernández, M., Brufau, P., García-Navarro, P. 2019b. 2D numerical simulation of unsteady flows for large scale floods prediction in real time. *Advances in Water Resources*, 134, 103444. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103444>
- Echeverribar, I., Vallés, P., Mairal, J., García-Navarro, P. 2021. Efficient Reservoir Modelling for Flood Regulation in the Ebro River (Spain). *Water*, 13(22), 3160. <https://doi.org/10.3390/w13223160>

- Gangrade, S., Ghimire, G.R., Kao, S.C., Morales-Hernández, M., Tavakoly, A.A., Gutenson, J.L., Sparrow, K.H., Darkwah, G.K.A., Kalyanapu, J., Follum, M.L. 2023. Unraveling the 2021 Central Tennessee flood event using a hierarchical multi-model inundation modeling framework. *Journal of Hydrology*, 625, 130157. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130157>
- García-Alén, G., García-Feal, O., Cea, L., Puertas, J. 2023. Implementación de embalses en cálculos hidrológicos con Iber. *Ingeniería del Agua*, 27(1), 59-72. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.18750>
- García-Navarro, P., Murillo, J., Fernández-Pato, J., Echeverribar, I., Morales-Hernández, M. 2019. The shallow water equations and their application to realistic cases. *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 1235-1252. <https://doi.org/10.1007/s10652-018-09657-7>
- Henderson, F.M. 1966. *Open channel flow*. En Macmillan Series in Civil Engineering; McGraw-Hill: New York, NY, USA.
- Heraldo de Aragón. 2018a. “Unas 15.000 hectáreas han resultado anegadas por la crecida del Ebro.” *Heraldo de Aragón*, 17 de abril.
- Heraldo de Aragón. 2018b. “Once riadas y 1.000 millones de euros en pérdidas en la cuenca del Ebro desde 1980.” *Heraldo de Aragón*, 25 de septiembre.
- Horritt, M.S., Bates, P.D. 2002. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of hydrology*, 268, 89-99. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(02\)00121-x](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(02)00121-x)
- Hu, R., Fang, F., Salinas, P., Pain, C.C., Sto.Domingo, N.D., Mark, O. 2019. Numerical simulation of floods from multiple sources using an adaptive anisotropic unstructured mesh method. *Advances in Water Resources*, 123, 173-188. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.11.011>
- Hu, H., Yang, H., Wen, J., Zhang, M., Wu, Y. 2023. An Integrated Model of Pluvial Flood Risk and Adaptation Measure Evaluation in Shanghai City. *Water*, 15, 602. <https://doi.org/10.3390/w15030602>
- Kalyanapu, A.J., Shankar, S., Pardyjak, E.R., Judi, D.R., Burian, S.J. 2011. Assessment of GPU computational enhancement to a 2D flood model. *Environmental Modelling and Software*, 26, 1009-1016. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.014>
- Knijff, J.M.V.D., Younis, J., Roo, A.P.J.D. 2010. LISFLOOD: AGISbased distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, 24, 189–212. <https://doi.org/10.1080/13658810802549154>
- Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S.B., Djordjević, S. 2004. Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology*, 299(3), 284-299. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.014>
- Murillo, J., García-Navarro, P. 2010. Weak solutions for partial differential equations with source terms: Application to the shallow water equations. *Journal of Computational Physics*, 229, 4327-4368. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2010.02.016>
- Nanía, L.S., Gómez, M. 2004. *Ingeniería Hidrológica*. Grupo Editorial Universitario, Granada, España.
- Noh, S.J., Lee, J.H., Lee, S., Kawaike, K., Seo, D.J. 2018. Hyper-resolution 1D-2D urban flood modelling using LiDAR data and hybrid parallelization. *Environmental Modelling & Software*, 103, 131-145. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.02.008>
- Özgen-Xian, I., Xia, X., Liang, Q., Hinkelmann, R., Liang, D., Hou, J. 2021. Innovations Towards the Next Generation of Shallow Flow Models. *Advances in Water Resources*, 149, 103867. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103867>
- Palmeri, F., Silván, F., Prieto, I., Balboni, M., García-Mijangos, I. 2002. *Manual de Técnicas de Ingeniería Naturalística en Ambito Fluvial*; Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, País Vasco Government: Bilbao, Spain.
- Protección Civil. 2021. *Fallecidos por riesgos naturales en España en 2020*. Subdirección General de Prevención, Planificación y Emergencias, Ministerio del Interior, Gobierno de España, Madrid, España.
- Ripple, W.J., Wolf, C., Newsome, T.M., Barnard, P., Moomaw, W.R. 2020. World scientists’ warning of a climate emergency. *BioScience*, 70, 8-12. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>
- Samal, P., Swain, P.C., Samantaray, S. 2025. Flood analysis using HEC-RAS 1D model for the delta of Brahmani river, Odisha, India. *Natural Hazards*, 121, 7941-7966. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07121-6>

- Sotelo, G. 2002. *Hidráulica General Vol. 1*, 1st ed. Limusa, Wellington, FL, USA.
- Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.H., de Roo, A. 2009. The European Flood Alert System—Part 1: Concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 125-140. <https://doi.org/10.5194/hess-13-125-2009>
- Vacondio, R., Aureli, F., Ferrari, A., Mignosa, P., Palù, A.D. 2016. Simulation of the January 2014 flood on the Secchia River using a fast and high-resolution 2D parallel shallow-water numerical scheme. *Natural Hazards*, 80, 103-125. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1959-4>
- Vallés, P., Echeverribar, I., García-Navarro, P. 2025. Flood-control reservoir simulation using an aggregated model and regulation in 2D shallow water problems. *Journal of Hydraulic Research*, 63(1), 48-63. <https://doi.org/10.1080/00221686.2024.2445539>
- Vreugdenhil, C.B. 1994. *Numerical Methods for Shallow-Water Flow*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8354-1_1
- Wallemacq, P., Herden, C., House, R. 2015. *The Human Cost of Natural Disasters 2015: A Global Perspective*. Technical Report, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Brussels, Belgium.