

Evaluación del riesgo y análisis de la respuesta hidrológica del Barranco de la Muerte (Zaragoza) ante inundaciones repentinas mediante simulación numérica

Risk evaluation and analysis of the hydrological response of the Barranco de la Muerte (Zaragoza) during flash floods using numerical simulation

Daniel Salvador-Arracó ^{a1}, Pablo Vallés ^{a2,b*}, Pilar Brufau ^{a3}

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

^b E2S-Chair HPC-Waves, SIAME, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Anglet, Francia.

E-mail: ^{a2}pvalles@unizar.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 30/04/2025

Aceptado: 09/07/2025

Publicado: 31/07/2025

Citar como: Salvador-Arracó, D., Vallés, P., Brufau, P. 2025. Risk evaluation and analysis of the hydrological response of the Barranco de la Muerte (Zaragoza) during flash floods using numerical simulation. *Ingeniería del agua*, 29(3), 213-228. <https://doi.org/10.4995/ia.2025.23846>

RESUMEN

Se presenta un análisis de la respuesta hidrológica del Barranco de la Muerte (Zaragoza) frente a eventos de precipitación intensa y corta duración, mediante simulación numérica con RiverFlow2D, basado en un método explícito de volúmenes finitos. El modelo considera un MDT y distribución espacial de usos del suelo de alta resolución, la infiltración del terreno y la incorporación de estructuras hidráulicas singulares. Se simulan dos episodios reales y lluvias sintéticas en función de la duración y el periodo de retorno del evento, obteniendo valores de calado y velocidad del flujo, que permiten caracterizar el comportamiento del barranco ante este tipo de situaciones. Se generan mapas web de evaluación del riesgo para personas y vehículos. Los resultados confirman la elevada vulnerabilidad de esta zona y la importancia de elaborar medidas de mitigación y planificación de riesgos.

Palabras clave | barranco; inundación repentina; precipitación extrema; simulación numérica; ecuaciones de aguas poco profundas.

ABSTRACT

A hydrological response analysis of the Barranco de la Muerte (Zaragoza) to short-duration, high-intensity rainfall events is presented. The study is conducted through numerical simulation using RiverFlow2D, based on an explicit finite volume method. The model incorporates a high-resolution Digital Terrain Model (DTM), detailed spatial distribution of land uses, soil infiltration processes, and the incorporation of specific hydraulic structures. Two real storm events and several synthetic rainfall scenarios are simulated. The outputs include water depth and flow velocity distributions, enabling a thorough characterisation of the ravine's behaviour under extreme precipitation conditions. Web-based hazard maps for pedestrians and vehicles are generated. The results emphasise the area's high vulnerability and the critical need for the development of mitigation measures and risk management planning.

Key words | gully; flash flood; extreme rainfall; numerical simulation; shallow water equations.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones repentinas tienen lugar tras eventos de precipitación extremos y pueden tener consecuencias devastadoras, poniendo en riesgo vidas humanas y causando daños materiales (Dahri y Abida, 2017). La rapidez con la que ocurren estos eventos puede suponer un verdadero reto a la hora de tomar medidas de protección ciudadana, lo que los hace todavía más peligrosos (Xia *et al.*, 2011a; Elkhachy, 2015). Un claro ejemplo de ello ocurrió el 6 de julio de 2023 en el Barranco de la Muerte (Zaragoza, España), mostrándose en la Figura 1a una de las zonas más afectadas durante este evento, en el cual decenas de vehículos fueron transportados por el torrente de agua y donde los daños en bienes municipales superaron los 2,5 millones de euros (El Periódico de Aragón, 2023). Organizaciones empresariales como Cepyme Aragón estimaron que los daños en empresas y particulares alcanzaron entre 90 y 100 millones de euros (Aragón Noticias, 2023) que se repetiría con menor intensidad el 21 de septiembre de 2024. La relevancia de este tipo de peligros se ha incrementado notablemente tras el reciente episodio de la DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) que azotó la Comunidad Valenciana el 29 de octubre de 2024, causando 227 víctimas y numerosos daños materiales, como los automóviles que se muestran en la Figura 1b, siendo 141 000 los vehículos que fueron gravemente dañados, en torno a 306 000 fueron las personas afectadas, y más de 800 km de carreteras quedaron inutilizados debido a este evento (Europa Press, 2025). Los efectos de este fenómeno en el levante español han reavivado el interés acerca de la preparación ante lluvias torrenciales en otras regiones propensas a inundaciones súbitas. En consecuencia, las instituciones públicas y privadas se ven obligadas a desarrollar planes de mitigación de daños (Olcina *et al.*, 2016; European Parliament and Council, 2007), así como buscar y desarrollar herramientas que permitan estimar y predecir la evolución del flujo durante esta clase de eventos (Hu *et al.*, 2023; Martínez-Puentes *et al.*, 2023). Dentro de estas herramientas, los modelos computacionales proporcionan información precisa y en plazos breves sobre la dinámica espacial y temporal de estos fenómenos (Saleh *et al.*, 2020; Balasch *et al.*, 2023; Navas *et al.*, 2024). Aunque una inundación tenga un comportamiento visualmente tridimensional, numerosos estudios han demostrado la elevada precisión y eficiencia del uso de modelos computacionales bidimensionales para representar las inundaciones (Vacondio *et al.*, 2016).



Figura 1 | (a) Tercer Cinturón de Zaragoza durante el evento del 6 de julio (fuente: @chuaquinbernal, 2023, X); (b) Vehículos amontonados en una calle tras las intensas lluvias de la Dana (Catarroja, Valencia) (fuente: Manuel Pérez García y Estefanía Monerri Mínguez, 2024, Wikimedia Commons. CC-BY-SA-4.0)

En el presente trabajo se analiza la respuesta hidrológica del Barranco de la Muerte ante eventos extremos cortos e intensos en precipitación. Se utiliza el software comercial RiverFlow2D, el cual resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas en dos dimensiones mediante un método explícito de volúmenes finitos implementado en GPU (Lacasta *et al.*, 2014) lo que permite una gran rapidez de cálculo aun usando mallas computacionales finas en dominios extensos, además de permitir la modelización de diques y obras de drenaje transversal, entre otros, arrojando un error en el balance de masa de tan solo 10^{-8} . Tras recoger todos los datos disponibles sobre el dominio de estudio, se modelizan determinadas estructuras hidráulicas presentes en la zona y se incorpora la modelización de la infiltración del terreno. El análisis de los resultados obtenidos muestra una elevada probabilidad de sufrir inundaciones severas en el dominio con eventos de precipitación intensos, lo que supone la necesidad de buscar soluciones que permitan mitigar los daños producidos por esta clase de eventos naturales e informar a la población. De ese modo, el modelo no solo

es capaz de predecir el comportamiento hidrológico del barranco ante un evento de precipitación extraordinario, sino que además ha permitido implementar soluciones de mitigación a partir de la simulación de eventos reales.

ECUACIONES Y CONDICIONES DE CONTORNO

A continuación, se presentan las ecuaciones que gobiernan el flujo de superficie libre para este tipo de situaciones, que carecen de solución analítica y deben resolverse mediante métodos numéricos. En particular, el software RiverFlow2D utiliza un método numérico explícito de volúmenes finitos.

Modelo de aguas poco profundas 2D

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del flujo de superficie libre son las llamadas ecuaciones de aguas poco profundas, que surgen de promediar en la vertical las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento de Navier-Stokes, asumiendo que la aceleración en la vertical es irrelevante. Con ello, se obtiene la ecuación de continuidad que relaciona la profundidad de agua h con las componentes de la velocidad u y v en las direcciones x e y , respectivamente:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = R - f \quad (1)$$

siendo R la tasa de precipitación y f la tasa de infiltración. El sistema de ecuaciones se completa mediante las ecuaciones de la cantidad de movimiento en las direcciones x e y :

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (2)$$

siendo S_0 la pendiente del fondo del terreno y S_f la pérdida de energía por fricción a causa del rozamiento con el fondo:

$$S_{0x} = -\frac{\partial z_b}{\partial x}, \quad S_{0y} = -\frac{\partial z_b}{\partial y} \quad S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

donde z_b es la elevación del fondo y n es el coeficiente de rozamiento de Manning, el cual denota la resistencia que sufre el flujo a causa de la rugosidad del fondo (Arcement y Schneider, 1989).

Condiciones de contorno externas: salida del flujo y bordes del dominio

Como condición de contorno en los bordes del dominio se escoge la condición de flujo libre, exceptuando la sección principal de salida del flujo (Figura 3). Para dicha condición de contorno, el modelo calcula la velocidad y el calado aplicando las ecuaciones de las celdas internas, que equivale a asumir que las derivadas de la velocidad y del calado son nulas. Sin embargo, en la zona de salida del flujo se ha optado por establecer la condición de contorno de flujo uniforme. En cada intervalo de tiempo se determina la elevación de la superficie del agua correspondiente al caudal del contorno.

Condiciones de contorno internas

Debido a la presencia de un elevado número de obras de drenaje transversal o culverts en el dominio (Figura 2), ha sido necesario modelar estas estructuras hidráulicas singulares (Fernández-Pato *et al.*, 2020), cuyo principal objetivo reside en permitir que el flujo de agua pase por debajo de un obstáculo, es decir, transporte agua de un lado a otro de una vía o terraplén. En el dominio estudiado, se usan para salvar obstáculos como autopistas y vías de tren, principalmente.

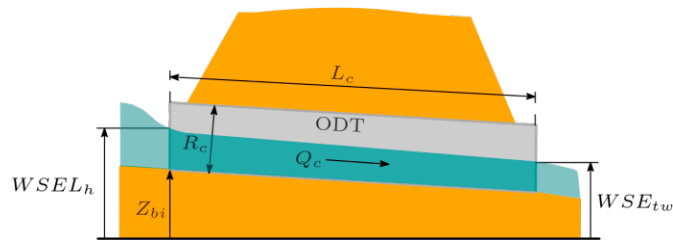


Figura 2 | Sección longitudinal de una obra de drenaje transversal.

El caudal a través de la obra de drenaje transversal se calcula mediante la siguiente expresión (Froehlich, 2003; Schall *et al.*, 2012):

$$Q = N_b C_c A_c \sqrt{2gH_c} \quad (5)$$

donde N_b es el número de conductos idénticos, C_c es un coeficiente de descarga que depende del control de flujo y de las características geométricas de la obra de drenaje transversal, A_c es la sección transversal, g es la aceleración gravitatoria, y $H_c = WSEL_h - Z_{bi}$ para el control de entrada y $H_c = WSEL_h - WSE_{tw}$ para el control de salida. $WSEL_h$ es la elevación de la superficie del agua en la entrada, Z_{bi} es la elevación del fondo de entrada, y WSE_{tw} es la elevación aguas abajo de la obra (Figura 2). Para hallar el coeficiente de descarga C_c en el cálculo del caudal de entrada y salida se hace uso de la expresión:

$$C_{c,entrada} = \min \left\{ \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{D_c}{H_h}\right)(Y + mS_0)}{2C'}}, \frac{1}{\sqrt{2K'(1/M)}} \left(\frac{H_h}{D_c}\right)^{\left(\frac{1}{M} - 0.5\right)} \right\} \quad C_{c,salida} = \left(1 + K_e + \frac{2gn^2L_c}{R_c^{4/3}}\right)^{-0.5} \quad (6)$$

donde $H_c = WSEL_h - WSE_{tw}$ es la profundidad de cabeza, D_c es el diámetro de la obra de drenaje en caso de que sea circular o la altura para obras rectangulares, m es un coeficiente experimental con $m = 0.7$ para entradas en ángulo y $m = -0.5$ para todas las demás entradas, R_c es el radio hidráulico de la obra, K_e es el coeficiente de pérdidas en la entrada, n es el valor de rugosidad de Manning, L_c es la longitud del conducto, e Y , K' , M , y C' son coeficientes experimentales.

DOMINIO DE ESTUDIO: BARRANCO DE LA MUERTE

El área de estudio se sitúa en la cuenca del Barranco de la Muerte (Figura 3) y abarca 8.25 km². El Barranco de la Muerte nace al norte de la localidad de Torrecilla de Valmadrid, aproximadamente 6 kilómetros al sur de Zaragoza, y termina en el Tercer Cinturón (Z-30) de Zaragoza. En este estudio, se ha elegido la antigua canalización del Canal Imperial como la región más aguas abajo del dominio (Figura 3), siendo la sección principal de salida de flujo o condición de contorno aguas abajo.

Modelo digital del terreno

Para conocer el relieve del dominio se hace uso de un Modelo Digital de Terreno (MDT), obtenido del repositorio del Instituto Geográfico Nacional (IGN, <https://www.ign.es/web/ign/portal>). Concretamente, se ha utilizado el MDT02¹, que cuenta con un paso de malla de 2 m×2 m y data del año 2016. Es importante destacar que el MDT únicamente recoge las elevaciones de los puntos pertenecientes a la superficie terrestre, por lo que edificios, árboles e infraestructuras no se encuentran presentes en el mismo.

¹ <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/modelo-digital-terreno-mdt02-segunda-cobertura>

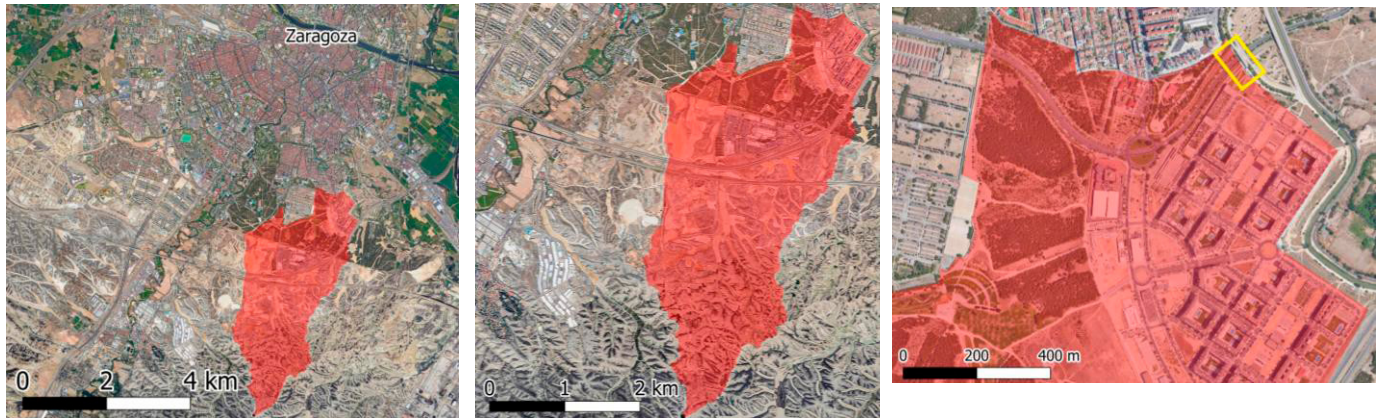


Figura 3 | Localización del Barranco de la Muerte (sección principal de salida del flujo en amarillo).

La presencia de 6 cajones fluviales (Figura 4) en el cauce del barranco ha supuesto la necesidad de modificar el MDT corrigiendo la elevación asignada a estas zonas. Es decir, la elevación registrada para la superficie superior del cajón fluvial en el MDT ha sido sustituida por la elevación del terreno que reside debajo para que el flujo pueda atravesar el cajón libremente. Existe un puente en la sección de salida, que queda fuera del dominio, por lo que no se modeliza. Debido a sus grandes dimensiones (2 arcos de 13 m de anchura y 5 m de altura), el flujo queda lejos de estar colapsado, habiéndose registrado valores de calado de únicamente 0.5 m.

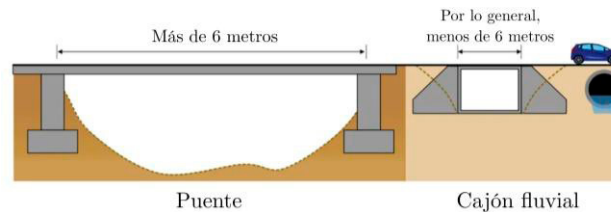


Figura 4 | Comparación entre puente y cajón fluvial.

Mapa de rugosidad

La información sobre el uso del suelo desempeña un papel fundamental en la simulación de estos eventos, ya que la dinámica del flujo está determinada tanto por la pendiente del lecho como por la resistencia generada por la fricción con la superficie. La disipación de energía del flujo debida a la fricción se representa mediante el coeficiente de rugosidad de Manning. Para incorporar este coeficiente en la modelización, el dominio ha sido dividido en distintas regiones, asignando a cada una un coeficiente de Manning específico en función del tipo de cobertura del suelo. La distribución espacial de los coeficientes de Manning asignados a cada región se presenta en la Figura 5a. Para modelar el coeficiente de rozamiento de Manning del dominio se han empleado los ficheros de usos del suelo del Sistema de Ocupación del Suelo en España de Alta Resolución (SIOSE AR²), disponible en Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), estableciendo un valor de coeficiente de rozamiento de Manning (Chow, 1959) para cada uno de los 17 usos del suelo dentro del dominio (Figura 5b).

Malla de cálculo y secciones de análisis del flujo

La malla de cálculo no estructurada que discretiza el dominio está conformada por 290 749 celdas triangulares, con un área promedio de celda de 28.4 m² (Figura 6a). Se han refinado los cauces principales y secundarios, y se ha empleado un tamaño de

² <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/siose-ar>

mallas más gruesas en zonas de menor interés como autopistas y vías de ferrocarril. Además, varios edificios han sido excluidos del dominio al no estar representados correctamente en el MDT y no aportar información relevante para la evolución del flujo. Con el fin de registrar la dinámica temporal del flujo, se han situado cuatro secciones de medida en el modelo computacional, localizadas en puntos estratégicos del barrio de Parque Venecia, tal y como se muestra en la Figura 6b.

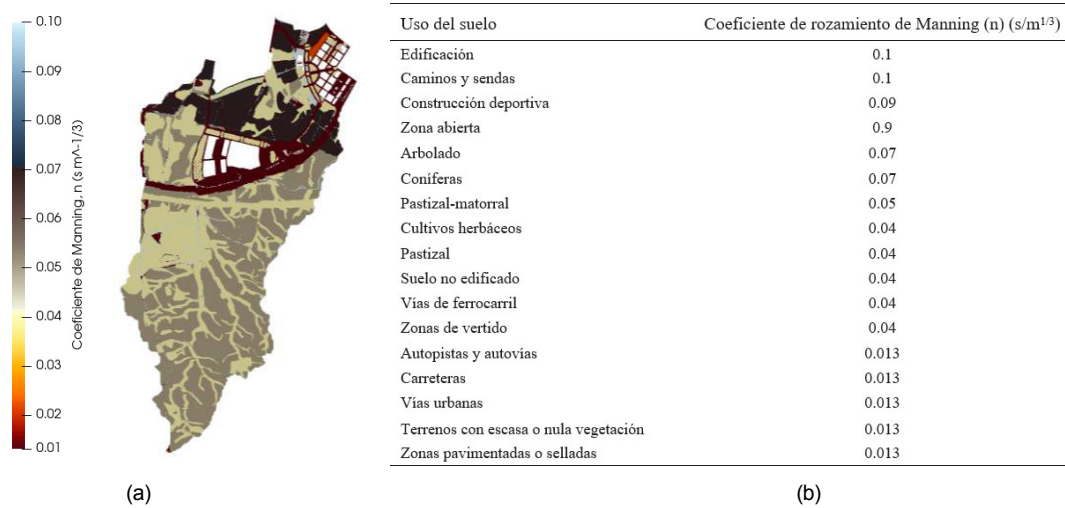


Figura 5 | Mapa de rozamiento según el uso del suelo (a) y correspondencia de usos del suelo con coeficientes de rozamiento (b).

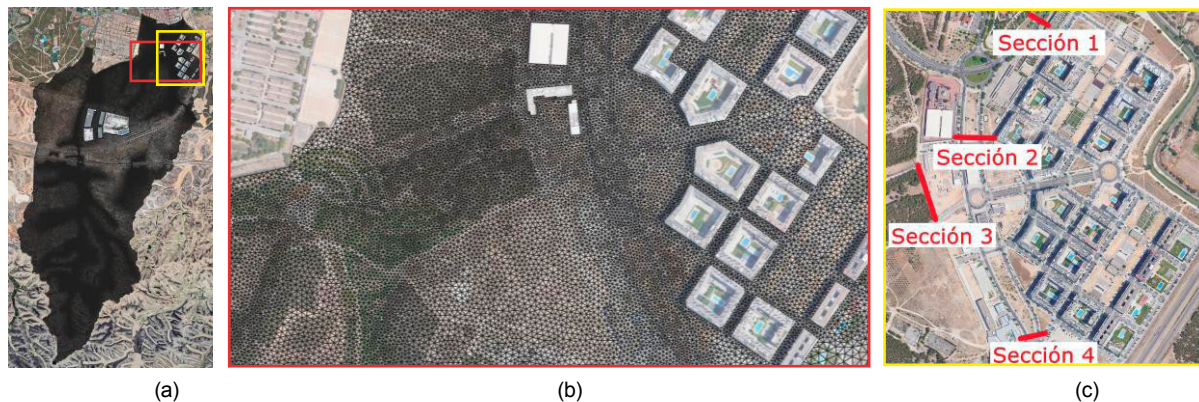


Figura 6 | Malla computacional (a), detalle de la malla (b) y localización de secciones de medida del modelo (c).

Infiltración

Para representar el fenómeno de infiltración, se utiliza el modelo de Horton (Horton, 1933) ya que son pocos los parámetros a calibrar, según los datos disponibles, y es ampliamente utilizado en la modelización de eventos de inundación (Chahinian *et al.*, 2005, Vallés *et al.*, 2024). Según este modelo, la capacidad de infiltración fluctúa entre un valor máximo cuando el suelo está seco y un valor mínimo al estar mojado. Esta se encuentra cerca de su valor máximo durante tormentas cortas que ocurren tras periodos secos, y cercana al valor mínimo en periodos prolongados de humedad, evolucionando sujeta a un decaimiento exponencial, del tipo:

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (4)$$

donde f_p es la capacidad de infiltración, f_c es la capacidad de infiltración saturada, f_0 es la capacidad de infiltración inicial, y k es la constante de decaimiento (Akan, 1992). La Ecuación (4) es válida en caso de que la superficie permanezca mojada ($h > 0$), de modo que ($f = f_p$). Sin embargo, si llueve sobre una superficie seca, se debe tener en cuenta que si la intensidad de la precipitación es inferior a la capacidad de infiltración ($R \leq f_p$) toda la lluvia se infiltra en el suelo, por lo que ($f = R$). En caso de que la intensidad de la precipitación sea mayor que la capacidad de infiltración ($R > f_p$), y de nuevo se tiene ($f = f_p$).

En el modelo se distinguen tres zonas con distinta tasa de infiltración: urbanizadas, secas y con vegetación. La litología de la zona se puede determinar a través del Mapa Geológico de España del Instituto Tecnológico Geominero de España (IGME³), compuesta por limos y arcillas, principalmente. A partir de estos datos, se asignan los parámetros de infiltración del modelo de Horton para suelos arcillosos con vegetación densa o con nula vegetación, según la zona (Figura 7b).

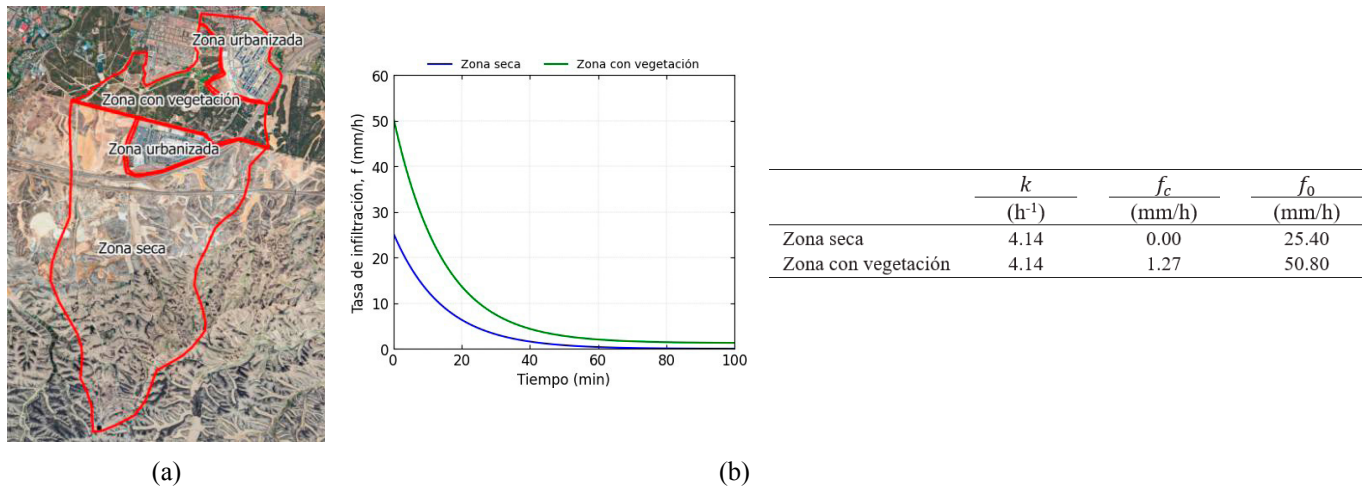


Figura 7 | Zonas de distinta infiltración del Barranco de la Muerte (a) y curvas de infiltración de cada zona con los respectivos parámetros del modelo de Horton (b).

De entre las tres zonas delimitadas (Figura 7a), la tasa de infiltración de las zonas verdes se asume como la mayor debido a la presencia de vegetación (Gajik *et al.*, 2008), mientras que la capacidad de infiltración de las zonas urbanizadas se considera nula a causa de su escasa permeabilidad y a la presencia de superficies relativamente lisas, que favorecen que el tiempo de residencia del flujo sobre la superficie sea muy bajo (Rammal y Berthier, 2020). Por último, las zonas secas poseen valores intermedios, tal y como se muestra en la Figura 7b.

Eventos de precipitación

El término R de la Ecuación (1) representa la cantidad de agua aportada al sistema por unidad de tiempo y área debido a la lluvia. Esta tasa de precipitación se introduce en el modelo en forma de hietogramas, es decir, representaciones de la distribución temporal de la precipitación sobre un área de estudio durante un periodo determinado (Figura 8). Por simplicidad y debido a la reducida extensión del área de estudio, se asigna el mismo hietograma a todo el dominio. Los hietogramas de eventos reales se han obtenido a partir del pluviómetro Parque Venecia EA2AFF - IZARAG80⁴, situado junto a las viviendas de Parque Venecia. Sin embargo, los hietogramas sintéticos se han elaborado a partir de las curvas IDF (Intensidad-Duración- Frecuencia) del PGOU (Plan General de Ordenación Urbana) del Ayuntamiento de Zaragoza.

³ <https://info.igme.es/cartografiadigital/tematica/Geomorfologico50Hoja.aspx?intranet=false&id=383>

⁴ <https://www.wunderground.com>

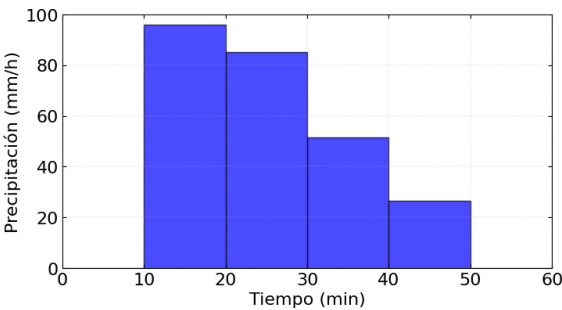


Figura 8 | Hietograma real de precipitación del evento de 2023.

Se establece una duración para los eventos sintéticos igual a la duración del evento real con el que se vayan a comparar, 40 minutos en el caso de 2023. Fijando el periodo de retorno y la duración del evento, se obtiene la intensidad de precipitación de la lluvia sintética. Finalmente, se usa el software de cálculo de hietogramas por el método de Bloques Alternos del Flumen Institute de la UPC usando los coeficientes característicos de la zona de la ciudad de Zaragoza y alrededores, para obtener los hietogramas de los eventos sintéticos (Gómez, 2007).

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas. El análisis se centra en variables clave como el calado máximo, la velocidad del flujo, los periodos de retorno considerados y el volumen de agua infiltrado con respecto al volumen total de precipitación. Estas simulaciones permiten caracterizar la dinámica del agua e identificar zonas de mayor peligrosidad ante distintos escenarios de lluvia. Además, en la Tabla 1, se puede observar cómo el coste computacional de las simulaciones llevadas a cabo durante el estudio es considerablemente reducido, adquiriendo valores elevados en la variable FTRT (*Faster Than Real Time*), que se define como el cociente entre el tiempo real de simulación y el coste computacional. Todas las simulaciones en el Barranco de la Muerte cuentan con el mismo tiempo real de simulación (5 horas) y el mismo número de celdas (290749 celdas).

Tabla 1 | Coste computacional de las distintas simulaciones para un tiempo de simulación de 5 horas empleando una GPU NVIDIA GeForce RTX 3060 Ti.

	Evento real	Evento sintético (Periodos de retorno)			
	2023	5	10	100	200
Duración del evento de precipitación (min)	40	110	110	40	40
Coste computacional (min)	8.62	7.20	8.12	6.72	7.82
FTRT	34.80	41.67	36.95	44.64	38.36

Evento de 2023

En la Figura 9a se muestra la evolución temporal de caudal en la sección 1 (S1) que registra el mayor caudal para el evento de 2023 y para los periodos de retorno de 100 y 200 años con una duración de la precipitación de 40 minutos. En la Figura 9b se muestran la evolución temporal de caudal en todas las secciones para el evento de 2023. La diferencia entre los tiempos de llegada del pico del evento de 2023 y de los distintos periodos de retorno es casi nula. El tiempo de llegada del pico en la sección 1 se da aproximadamente a los 70 minutos del intervalo de mayor intensidad de precipitación en todos los casos, por lo que se puede afirmar que independientemente de la distribución del hietograma, el tiempo de llegada del pico para esta sección no variará.

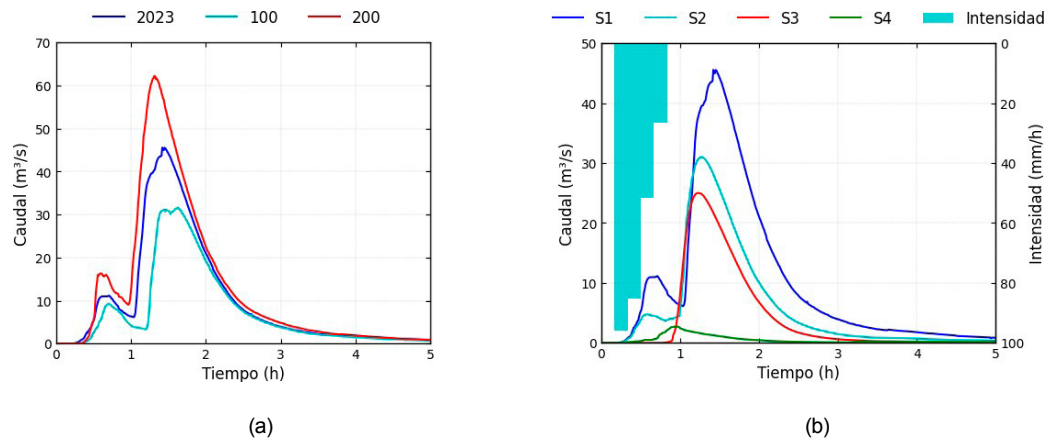


Figura 9 | Comparación de hidrogramas en la sección 1 (a) e hidrogramas en todas las secciones con hietograma (b) para el evento de 2023.

Debido a la localización de las secciones, el flujo las alcanza con 5 minutos de diferencia entre cada una de ellas, siendo la sección 4 la primera en ser alcanzada y la sección 1 la última. Mientras que las secciones 1, 2 y 3 resultan ser más críticas debido a su localización en el cauce natural del barranco, la sección 4 corrobora que fuera del mismo, el caudal se reduce considerablemente (ver Figura 9b). En la Figura 10 se presentan los resultados de profundidad de agua y velocidad máximos del evento de 2023, por ser el más extremo de entre los dos eventos reales.

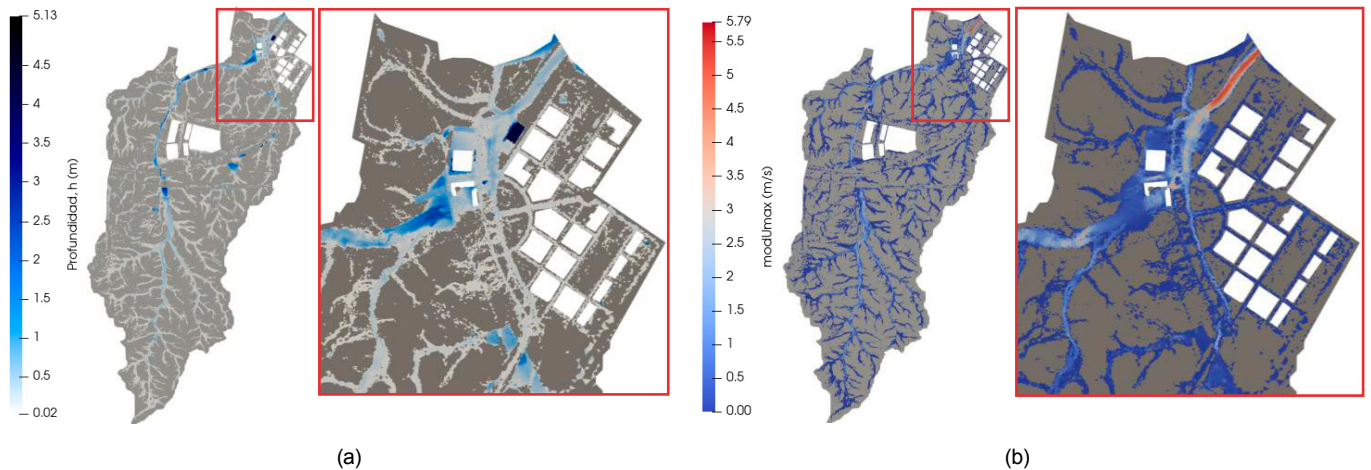


Figura 10 | Mapa de calados máximos (a) y de módulo de la velocidad máximo (b) para el evento de 2023.

Evaluación de riesgos

Una manera habitual de estimar la extensión de las zonas de riesgo es a través de la zona de graves daños (Ministerio de la Presidencia, 2008). Para que una zona se considere de graves daños se debe dar uno de los tres casos siguientes: que el calado supere el metro de profundidad, que la velocidad sea superior a 1 m/s o que el producto del calado por la velocidad sea superior a 0.5 m²/s (Figura 12a). Además, en este trabajo se plantea una serie de modelos que correlacionan el calado con la velocidad del flujo que resultaría peligrosa para las personas, diferenciando entre niños y adultos (Xia *et al.*, 2013), además de para los vehículos (Xia *et al.*, 2011b), estableciendo umbrales de riesgo (Figura 12).

La velocidad crítica para niños y adultos se determina a través de la Ecuación (7), tomando los parámetros de Xia *et al.* (2013) para un niño y un adulto.

$$h_f^\beta$$

$$U_{c,p} = \alpha \left(\frac{h_f}{h_p} \right)^\beta \sqrt{\frac{m_p}{\rho_f h_f^2} - \left(\frac{a_1}{h_p^2} + \frac{b_1}{h_f h_p} \right) (a_2 m_p + b_2)} \quad (7)$$

donde $U_{c,p}$ es la velocidad crítica para las personas, h_f es el calado, h_p es la estatura de la persona, m_p es la masa de la persona (siendo la estatura y el peso medio en España de 1.68 m y 73.76 kg, respectivamente (CIS, 2024)), ρ_f es la densidad del fluido y donde α , β , a_1 , b_1 , a_2 y b_2 son coeficientes experimentales. Se toma una altura de 1.26 m y una masa 25.64 kg como valores medios para un niño de 8 años (Instituto de Investigación sobre Crecimiento y Desarrollo, 2004).

La velocidad crítica para que un vehículo comience a deslizar depende de si el vehículo está total o parcialmente sumergido, de ahí la discontinuidad de la Figura 15c, y se puede expresar de la siguiente manera, tomando los parámetros de Xia *et al.* (2011b) para un Mini Cooper, por la facilidad que presenta a ser arrastrado por el flujo:

$$U_{c,v} = \alpha \left(\frac{h_f}{h_c} \right)^\beta \sqrt{\frac{\rho_c - \rho_f}{\rho_f} 2gh_c} \quad (8)$$

donde $U_{c,v}$ es la velocidad crítica para los vehículos, h_f es el calado, h_c la altura del vehículo, ρ_f y ρ_c son la densidad del fluido y del vehículo, respectivamente, y α y β son coeficientes experimentales.

La evaluación del riesgo se plantea a través de distintos umbrales para las expresiones anteriores. Los valores que se encuentran por encima de la curva roja representan un riesgo alto, mientras que los que se encuentran entre las dos curvas se consideran de riesgo moderado. Las zonas con valores inferiores a la curva naranja se considerarían como seguras (ver Figura 11).

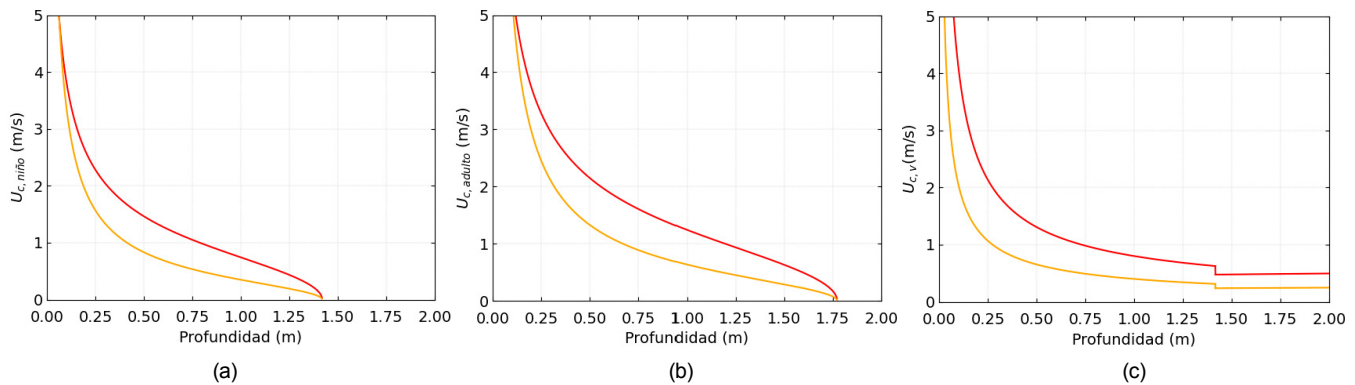


Figura 11 | Gráficas de riesgo alto (rojo) y moderado (naranja) para niños (a), adultos (b) y vehículos (c).

En el caso de las personas (Figura 11a), las curvas roja y naranja cuentan con distintos parámetros α y β para representar varios grados de riesgo, mientras que, para hacer esta distinción en el caso de los vehículos (Figura 11c), se ha trazado una segunda curva (en color naranja), cuyos valores corresponden a la mitad de los de la curva roja, con el objetivo de establecer un umbral intermedio que permita diferenciar entre distintos niveles de riesgo.

Esta evaluación del riesgo se puede trasladar de manera fácil y visual gracias a la herramienta web BeMaps⁵. En la Figura 12, se presentan los mapas de riesgo atendiendo a los criterios expuestos anteriormente, de los cuales se deducen las zonas más afectadas del barrio y donde se incluyen zonas de estacionamiento cercanas, así como centros de trabajo con el objetivo de observar cuáles se verían afectados por el suceso. Estos mapas se encuentran disponibles a través del siguiente enlace <https://bemaps.unizar.es/user-map/67f0d8d4c8c0ee487a4786eb/view>.

⁵ <https://bemaps.es>

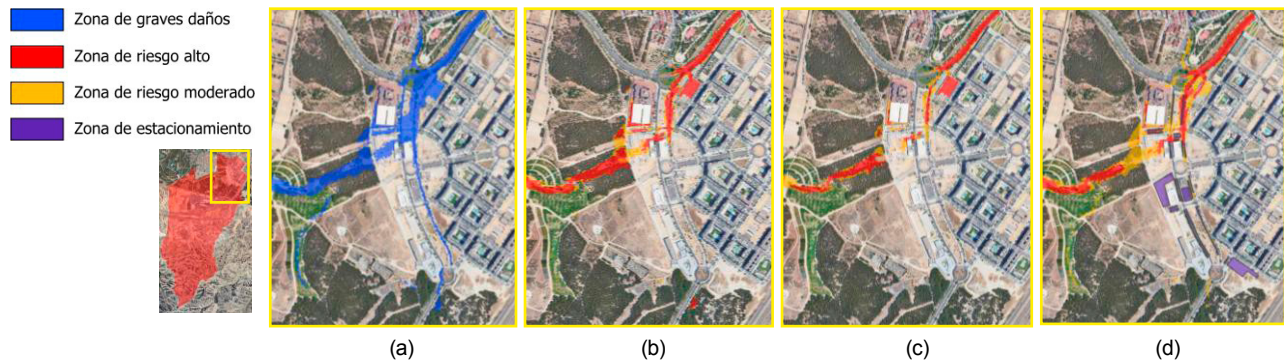


Figura 12 | Zona de graves daños (a) y mapas de riesgo para niños (b), adultos (c) y vehículos (d).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a lo largo de este estudio evidencian la relevancia de emplear modelos hidrodinámicos para evaluar la respuesta de barrancos y cauces secos ante eventos de precipitación extrema. En particular, la aplicación del software RiverFlow2D ha demostrado ser eficaz tanto en términos de precisión como de eficiencia computacional, permitiendo reproducir de forma robusta la evolución temporal y espacial del flujo superficial en el Barranco de la Muerte. En ausencia de otros datos, los resultados de calado y velocidad han sido validados a través de imágenes y vídeos del evento real como los de la Figura 13, donde a partir de la distancia recorrida por el vehículo blanco entre dos puntos de referencia y el tiempo de desplazamiento, se obtiene la velocidad estimada del flujo de 4.63 m/s aguas abajo del dominio. El valor del módulo de la velocidad arrojado por las simulaciones en dicha localización se sitúa en 4.97 m/s, lo que representa un error relativo del 8.04%. A través de otra de las fotografías del evento se estima que el calado en el mismo punto fue de 0.52 m, siendo el calado simulado de 0.46 m (error relativo del 11.54%).



Figura 13 | Método para la estimación de la velocidad media del flujo durante el evento (izq.) y para la obtención del calado aproximado en la región aguas abajo del dominio mediante las dimensiones del vehículo SEAT Córdoba (der.).

Asimismo, el trabajo resalta la importancia de considerar aspectos como la modelización de estructuras como cajones fluviales y obras de drenaje transversal, además de la capacidad de infiltración del terreno y los distintos coeficientes de rozamiento del suelo en la representación de este tipo de eventos. En este sentido, la división del dominio en función de las propiedades del terreno es clave para conseguir una representación más realista del fenómeno. Sin embargo, los valores propuestos han sido estimados a partir de fuentes secundarias y no a partir de observaciones en la zona. Del mismo modo, la ausencia de sensores

aumenta la incertidumbre, por lo que la toma de datos junto con la colocación de sensores, permitirían comparar los resultados de las simulaciones con medidas reales, asegurando una correcta calibración del modelo.

Por su parte, la evaluación del riesgo también aporta información valiosa para la planificación urbana y prevención ante este tipo de sucesos, cuya frecuencia se está viendo incrementada debido al cambio climático. Los mapas generados a partir de los criterios de calado y velocidad del flujo permiten delimitar con claridad las zonas de mayor peligrosidad para personas y vehículos, ofreciendo una herramienta útil para la planificación de emergencias y el diseño de medidas de protección. La visualización de estos resultados mediante plataformas como BeMaps representa un avance importante hacia la accesibilidad del conocimiento técnico y la implicación ciudadana en la gestión del riesgo.

Es importante destacar que, si bien los resultados son representativos y ofrecen una visión precisa del comportamiento del barranco ante lluvias intensas, las simulaciones se han llevado a cabo bajo ciertas simplificaciones, como la imposición de un único hietograma a todo el dominio y la omisión de ciertas estructuras. En futuras investigaciones, la incorporación de modelos más detallados de edificación y variabilidad espacial de la precipitación podrían enriquecer aún más la fidelidad del modelo, aunque podrían resultar computacionalmente más costosos. Asimismo, debido a la rapidez con la que se saturan las redes de drenaje ante estos eventos, se decide no incluir el colector principal de la zona, por lo que solo se considera el flujo superficial.

Por último, con el objetivo de amortiguar el impacto de este tipo de sucesos en el Barranco de la Muerte, se propone llevar a cabo una reforestación aguas arriba de la zona con vegetación. No se propone una mayor extensión debido al uso agrícola de las zonas de más aguas arriba. Dicha medida se fundamenta en el aumento del volumen infiltrado durante los eventos de precipitación extrema, lo que supone una disminución de la escorrentía superficial. Para ello, se modifican los valores de rozamiento y de infiltración de la zona reforestada (Figura 14). Concretamente, se compara la eficacia de la reforestación con *Pinus sylvestris* (especie autóctona), y con matorral (Regüés-Muñoz *et al.*, 2012, Fernández-Pato *et al.*, 2016).

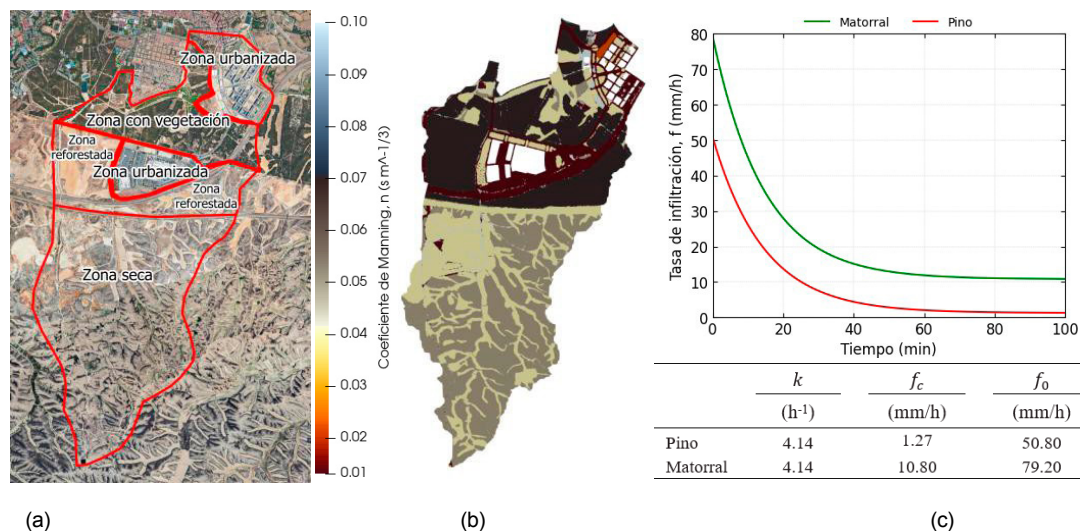


Figura 14 | Zonas con distinta infiltración (a) y mapa de rugosidad (b), ambos tras la reforestación y nuevos parámetros de infiltración.

Se observa que la mayor reducción del caudal pico de 6.4 m³/s se da en caso de reforestar con matorral (Figura 15a), alcanzando un porcentaje de volumen infiltrado del 25%, frente a una reducción de 3.4 m³/s y un 18% de volumen infiltrado reforestando con *Pinus sylvestris* (Figura 15b), siendo el volumen infiltrado original un 15.9%. De ese modo, no es suficiente con reforestar, sino que se debe llevar a cabo con la vegetación adecuada. Con ello, en caso de reforestar con matorral se produce además una reducción del área de riesgo de entre un 4.3% y un 5.1% (Tabla 2).

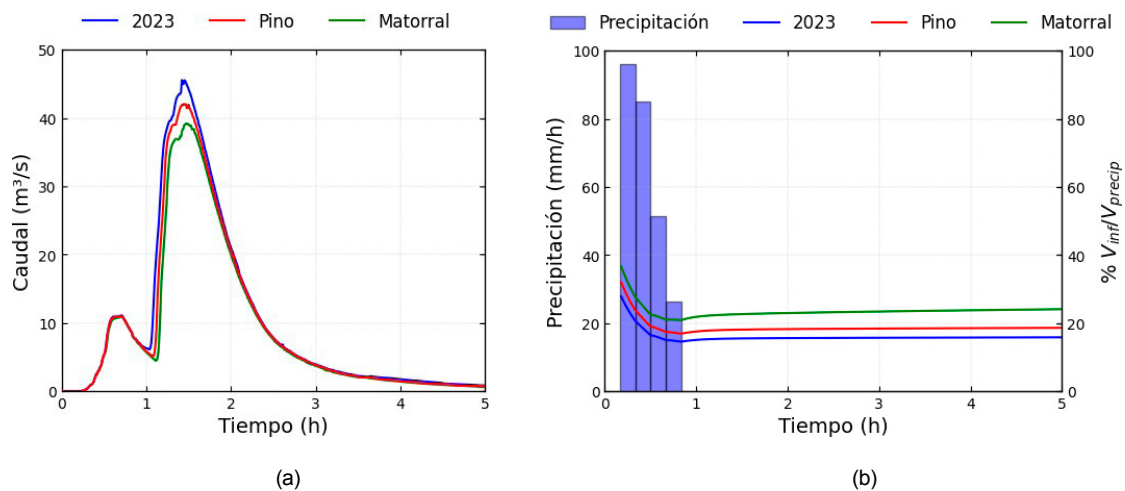


Figura 15 | Hidrogramas en la sección 1 (a) y porcentajes de volumen infiltrado (b) en el evento de 2023, en la reforestación con pino y en la reforestación con matorral.

Tabla 2 | Superficie abarcada por las zonas de riesgo y su variación con respecto a la superficie de riesgo original, ambas tras la reforestación.

	Niños	Adultos	Vehículos	Zona de Graves Daños
Variación del área total (%)	-4.3	-5.1	-5.0	-4.7
Variación del área de riesgo moderado (%)	-3.1	+0.7	-5.5	-
Variación del área de riesgo alto (%)	-4.9	-9.6	-4.4	-

CONCLUSIONES

La simulación de eventos extremos cortos e intensos en el Barranco de la Muerte a través del uso del software RiverFlow2D ha resultado ser altamente eficiente, permitiendo reproducir en escasos minutos episodios que realmente son mucho más prolongados en el tiempo, lo que se puede comprobar a través de los valores alcanzados en la variable FTTR. La rapidez que presenta la herramienta puede tener un impacto positivo en la prevención de estos eventos, aumentando el tiempo de respuesta ante los mismos. Además, se concluye que la incorporación de los parámetros de infiltración, rugosidad y relieve del terreno son claves a la hora de reproducir correctamente la evolución del flujo en este tipo de estudios.

Asimismo, la presencia de parques, infraestructuras y vías urbanas directamente en el cauce del barranco supone la posibilidad de que el evento afecte todavía a una mayor parte de la población. En particular, se ha observado que en la simulación de eventos como el de julio de 2023 se alcanzan umbrales de peligrosidad significativos para personas y vehículos, en concordancia con los daños registrados durante el evento real, donde numerosos vehículos se vieron arrastrados por la corriente, especialmente en la Z-30. Las simulaciones ponen de manifiesto la peligrosidad de dicha vía debido al encauzamiento del flujo a través de esta, el cual provoca un importante incremento de la velocidad.

Se concluye además que un aumento del volumen infiltrado durante estos eventos podría traducirse en una reducción del impacto de las inundaciones, debido a la reducción de la escorrentía superficial. Las simulaciones revelan que actualmente este volumen es escaso y se comprueba que la reforestación de la zona supondría un aumento en la tasa de infiltración, amortiguando así las consecuencias de la inundación.

En definitiva, este trabajo refuerza la idea de disponer de herramientas ágiles y fiables para la predicción y gestión de riesgos asociados a lluvias torrenciales, capaces de anticipar sus consecuencias. La implementación de modelos como el desarrollado en este estudio no solo mejora la capacidad de respuesta frente a estos fenómenos, sino que además proporciona una base sólida para

el diseño de infraestructuras de mitigación y la elaboración de mapas de riesgo de acceso público, como los generados a través de la herramienta BeMaps. De ese modo, la modelización del Barranco de la Muerte propuesta en este estudio puede servir como referencia para la elaboración de estudios más detallados sobre la zona o como hoja de ruta para la confección de nuevos estudios en otras localizaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la compañía Hydronia LLC su ayuda en la realización del presente trabajo al facilitar el uso del software RiverFlow2D y a los grupos de Ordenación del Territorio (GEOT-IUCA) y de Sistemas de Información Avanzados (IAAA-I3A) de la Universidad de Zaragoza en colaboración con la empresa GeosLab por desarrollar la herramienta de uso libre BeMaps.

REFERENCIAS

- Aragón Noticias. 2023. “Las pérdidas en las empresas de Zaragoza por el temporal superan los 100 millones de euros”. *Aragón Noticias*, 20 de julio de 2023.
- Akan, A.O. 1992. Horton Infiltration Equation Revisited. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118, 5. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1992\)118:5\(828\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:5(828))
- 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>.
- Balasch, J. C., Calvet, J., Tuset, J. 2023. Reconstrucción post-evento del flash-flood del 1 de septiembre de 2021 en Les Cases d'Alcanar (Tarragona). *Ingeniería Del Agua*, 27(1), 29–44. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.18535>.
- Bernal, Ch. [@chuaquinbernal]. 6 de julio de 2023. Tercer Cinturón de Zaragoza durante el evento del 6 de julio [Fotografía]. X. <https://x.com/chuaquinbernal/status/1677022538864418824/photo/3>
- Chahinian, N., Moussa, R., Andrieux, P., Voltz, M. 2005. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology*, 306, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.09.009>.
- Chow, V. Te. 1959. *Open-channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS). 2024. *Barómetro de marzo 2024 (Estudio n° 3462)*.
- Dahri, N., Abida, H. 2017. Monte Carlo simulation-aided analytical hierarchy process (AHP) for flood susceptibility mapping in Gabes Basin (southeastern Tunisia). *Environmental Earth Sciences*, 76, 302. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6619-4>.
- Elkhrachy, I. 2015. Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18, 261–278. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.06.007>.
- El Periódico de Aragón. 2023. “Zaragoza eleva a 2,5 millones el coste de los daños provocados por la tormenta”. *El Periódico de Aragón*, 28 de julio de 2023.
- Europa Press. 2025. “Impacto de la DANA en Valencia: 306.000 personas afectadas, 11.242 viviendas, 141.000 coches y 800km de carreteras”. *Europa Press*, 21 de marzo de 2025.
- European Parliament and Council. 2007. *Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks*. Official Journal of the European Union, L288, 27–34. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32007L0060> (accessed on 1 February 2023).

- Fernández-Pato, J., Caviades-Voullième, D., Garcia-Navarro, P. 2016. Rainfall/runoff simulation with 2D full shallow water equations: Sensitivity analysis and calibration of infiltration parameters. *Journal of Hydrology*, 536(5). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.021>.
- Fernández-Pato, F., Martínez-Aranda, S., Morales-Hernández, M., García-Navarro, P. 2020. Analysis of the performance of different culvert boundary conditions in 2D shallow flow models. *Journal of Hydroinformatics*, 22(5), 1093–1121. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.025>.
- Froehlich, D. 2003. *User's Manual for FESWMS FST2DH Two-dimensional Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model*. Federal Highway Administration, Washington DC, USA.
- Gajik, B., Dugalic, G., Sredojevic, Z., Tomić, Z. 2008. Effect of different vegetation types on infiltration and soil water retention. *Cereal Research Communications*, 36, 991-994. <https://doi.org/10.1556/CRC.36.2008.Suppl.1>
- Gómez, M. 2007. *Curso de Hidrología Urbana*. Distribuidora Alfambra de Papelería, S.L, Barcelona, Spain.
- Horton, R. E. 1933. The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos Transactions AGU* 14(1), 446–460. <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- 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(3), 602. <https://doi.org/10.3390/w15030602>.
- Instituto de Investigación sobre Crecimiento y Desarrollo. 2004. Curvas y tablas de crecimiento (estudios longitudinal y transversal).
- Lacasta, A., Morales-Hernández, M., Murillo, J., García-Navarro, P. 2014. An optimized GPU implementation of a 2D free surface simulation model on unstructured meshes. *Advances in Engineering Software*, 78, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.08.007>.
- Martínez-Puentes, M., Russo, B., Paindelli, A., Recolons Lopez-Pinto, P., Hernández Pérez, R., Bofill Ananos, J., Montes-Carretero, J. 2023. Implementación de un sistema de alerta temprana integral contra las inundaciones urbanas y desbordamientos de sistemas de saneamiento: el Proyecto LIFE BAETULO. *Ingeniería Del Agua*, 27(2), 93–110. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.19129>
- Ministerio de la Presidencia. 2008. *Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril*. Boletín Oficial del Estado núm. 14, de 16 de enero de 2008, 3141–3149. (Consultado el 21 de marzo de 2025).
- Navas, S., del Jesus, M., Martín, J., Sánchez, P. 2024. Aplicación de una nueva metodología para mejorar la estimación de las frecuencias de inundación en Calle 30 (Madrid). *Ingeniería Del Agua*, 28(4), 263–279. <https://doi.org/10.4995/ia.2024.22293>.
- Pérez-García, M., Monerri-Mínguez, E. 31 de octubre de 2024. Cotxes alçats i arrossegats per la DANA 2024 en una plaça de Catarroja [Fotografía]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cotxes_al%C3%A7ats_i_arrossegats_per_la_DANA_2024_en_una_pla%C3%A7a_de_Catarroja.jpg
- Olcina, J., Sauri, D., Hernández, M., Ribas, A. 2016. Flood policy in Spain: A review for the period 1983–2013. *Disaster Prevention and Management*, 25, 41–58. <https://doi.org/10.1108/DPM-05-2015-0108>.
- Rammal, M., Berthier, E. 2020. Runoff Losses on Urban Surfaces during Frequent Rainfall Events: A Review of Observations and Modeling Attempts. *Water*, 12, 2777. <https://doi.org/10.3390/w12102777>.
- Regüés-Muñoz, D., Serrano-Muela, M.P., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N. 2012. Análisis de la variabilidad temporal de la infiltración en un gradiente de degradación de usos del suelo en el Pirineo Central. *Cuaternalario y Geomorfología*, 26(1-2), 9-28. Sociedad Española de Geomorfología.
- Saleh, A., Yuzir, A., Abustan, I. 2020. Flash Flood Susceptibility Modelling: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 712, 012005.
- Schall, J., Thompson, P., Zerges, S., Kilgore, R., Morris, J. 2012. *Hydraulic Design of Highway Culverts*. Federal Highway Administration, Washington DC, USA.

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., Fernández-Pato, J., Morales-Hernández, M., Echeverribar, I., García-Navarro, P. 2024. A 2D shallow water flow model with 1D internal boundary condition for subgrid-scale topography. *Advances in Water Resources*, 189, 104716. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104716>.

Xia, J., Falconer, R.A., Lin, B., Tan, G. 2011a. Modelling flash flood risk in urban areas. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 164(6), 267-282. <https://doi.org/10.1680/wama.2011.164.6.267>.

Xia, J., Falconer, R., Lin, B., Tan, G. 2011b. Numerical assessment of flood hazard risk to people and vehicles in flash floods. *Environmental Modelling and Software – ENVSOFT*, 26, 987-998. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.017>.

Xia, J., Falconer, R., Xiao, X. 2013. New criterion of human stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies. *Proceedings of the 35th IAHR World Congress*, Chengdu, China.