

Comparación de modelos hidrológicos bidimensionales y semidistribuidos en una cuenca semiárida mediterránea

Comparison of two-dimensional and semi-distributed hydrologic models in a semiarid Mediterranean basin

Patricia Molina-López^{a1}, Nerea Burillo-Vidal^{a2}, José M. Carrillo^{ib a3*}, Juan T. García^{ib a4}

^aEscuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena, España.

E-mail: ^{a1}patriciamolina1997@gmail.com, ^{a2}nerea.burillo@edu.upct.es, ^{a3}jose.carrillo@upct.es, ^{a4}juan.gbermejo@upct.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 01/03/2024

Aceptado: 08/04/2024

Publicado: 30/04/2024

Citar como: Molina-López, P., Burillo-Vidal, N., Carrillo, J.M., García, J.T. 2024. Comparison of two-dimensional and semi-distributed hydrologic models in a semiarid Mediterranean basin. *Ingeniería del agua*, 28(2), 141-152. <https://doi.org/10.4995/la.2024.21289>

RESUMEN

Este estudio se centra en la comparativa de diferentes programas de modelización hidrológica en una cuenca semiárida con el objetivo de proporcionar una evaluación de su desempeño en la simulación de procesos hidrológicos. Para ello, se han evaluado dos programas de modelización distribuida o de enfoque bidimensional (Iber y HEC-RAS), y un programa de modelización semidistribuida (HEC-HMS), considerando tres eventos lluvia registrados en la red de pluviómetros de la Confederación Hidrográfica del Segura y un evento sintético de período de retorno de 100 años. Adicionalmente, se ha evaluado el comportamiento de los modelos al someter el modelo digital del terreno a cambios para una mejor modelización de la realidad. Los resultados demuestran que, en general, el modelo Iber presenta mayor similitud de los caudales simulados con respecto a los aforados, y que las obstrucciones presentes en las cuencas analizadas, a gran escala no ejercen influencia remarcable en los resultados.

Palabras clave | estudios de zonas inundables; cuenca mediterránea; humedad antecedente del suelo; número de curva.

ABSTRACT

This study focuses on the comparison of different hydrological programs in a semiarid basin with the aim of providing an evaluation of their performance in the simulation of hydrological processes. For this purpose, two distributed or two-dimensional programs have been evaluated (Iber and HEC-RAS), and a semi-distributed program (HEC-HMS), considering three rainfall events recorded in the rain gauge network of the Confederación Hidrográfica del Segura and a synthetic event with a return period of 100 years. In addition, the behaviour of the models has been evaluated by exposing the digital terrain model to changes to better model it to the reality. The results show that, in general, the Iber model shows greater similarity of the simulated flows with respect to the gauged flows, and that the obstructions present in the basins analysed, on a large scale, do not have a significant influence on the results.

Key words | flooding studies; mediterranean basin; antecedent soil moisture; curve number.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones representan uno de los desastres naturales más devastadores y frecuentes, causando graves daños materiales en la propiedad e infraestructuras, e incluso provocando la pérdida de vidas humanas. En los últimos años, al aumento de la frecuencia de eventos extremos como consecuencia del cambio climático, se suma la problemática del mayor desarrollo de las áreas urbanizadas, lo que acarrea el incremento de la superficie impermeable (Martínez-Puentes *et al.*, 2023). Estos aspectos obligan a las autoridades competentes en materia de zonas inundables y urbanismo a actuar de manera coordinada para estudiar las zonas inundables, con el fin de adaptar las ciudades y desarrollar planes de gestión de riesgo de inundación (Fraga *et al.*, 2021).

A este efecto, los modelos hidrológicos e hidráulicos se han convertido en herramientas fundamentales para comprender y predecir los procesos de transporte de sedimentos, suministro y calidad de agua, y riesgo de inundación. Sin embargo, en muchas ocasiones, los modelos presentan notables diferencias entre sí, y su precisión depende en gran medida de las particularidades de la topografía de cada zona.

El objetivo de este estudio consiste en realizar una comparativa de los resultados obtenidos con diferentes programas de modelización hidrológica empleando idénticos datos de entrada: modelo digital del terreno, capa de infiltración, y condiciones de contorno. Como método de infiltración, se ha optado por el número de curva (CN) del *Soil Conservation Service* (SCS), ampliamente utilizado y aceptado en España.

La zona de estudio es una cuenca semiárida situada en el sureste peninsular, afectada por variabilidad climática significativa, precipitaciones escasas y estacionales, y un alto grado de evapotranspiración, por lo que el comportamiento hidrológico de estas cuencas puede ser complejo y difícil de modelizar.

Los resultados muestran que, para la cuenca de estudio, los modelos bidimensionales concuerdan mejor con los resultados aforados que el modelo semidistribuido. Dentro de los primeros, el modelo Iber se adapta mejor a los resultados aforados, aunque en ocasiones obtiene un caudal punta ligeramente inferior al aforado, lo que puede implicar no quedar el lado de la seguridad en función de la humedad antecedente del suelo que se haya considerado.

MATERIAL Y MÉTODOS

Caracterización hidrológica de la cuenca y zona de estudio

La zona de estudio consiste en una cuenca de 149 km² situada en el levante español, en el Término Municipal de Cartagena (Figura 1). La cuenca se ha dividido en 5 subcuencas drenantes (Benipila, Barreros, Canteras, Atalaya, y Cuenca interna), que desembocan en la Algameca Chica y cuyas características se muestran en la Tabla 1. La ciudad cuenta con una zona portuaria donde drena también parte de la escorrentía producida en caso de desbordamiento de la rambla.

Tabla 1 | Características de las subcuencas.

Nombre de la cuenca	Área drenante (km ²)
Barreros	66.87
Benipila	68.13
Canteras	9.75
Atalaya	2.52
Cuenca interna	1.79
Total	149.06

Las cuencas se caracterizan por notables variaciones en cuanto a su antropización: localización de zonas urbanas, impermeabilidad, presencia de obras lineales, puentes y obras de drenaje transversal, entre otros. Por tanto, se ha tratado de analizar la influencia de dichas obstrucciones en las diferentes simulaciones, realizando modificaciones en el terreno en cada programa, de acuerdo a las herramientas disponibles, para lograr una mejor representatividad de acuerdo a los resultados.

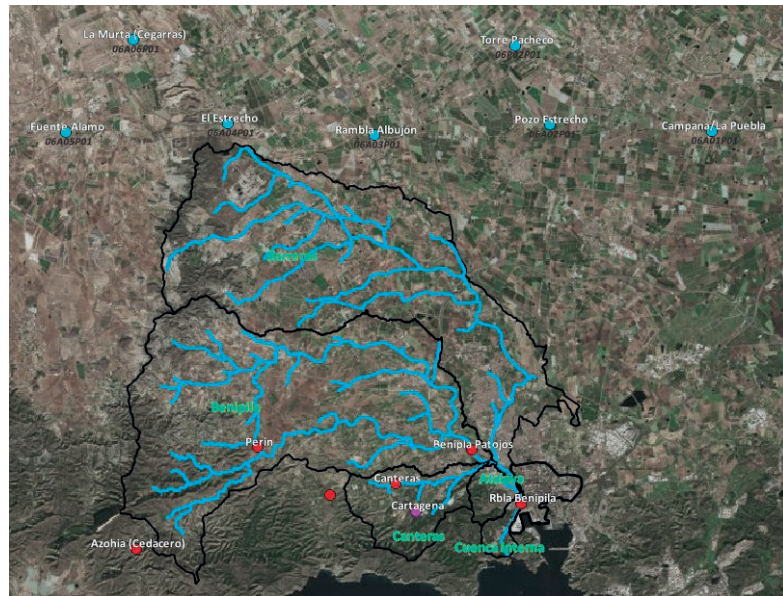


Figura 1 | Cuenca de estudio y pluviómetros seleccionados de la red del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS).

Información de partida

Se ha utilizado el modelo digital del terreno (MDT) disponible del centro de descargas del instituto geográfico nacional con una resolución de 2×2 m. En concreto, se han descargado las hojas 0.77-2, 0977-3, 0955-3 y 0955-4, datadas del año 2015 a la actualidad.

Las cuencas y los cauces que aparecen en la Tabla 1 se han delimitado a través de las herramientas de procesamiento espacial que ofrecen QGIS y HEC-HMS a partir del modelo digital del terreno mencionado anteriormente.

En cuanto a los datos de precipitación, se han utilizado los pluviómetros disponibles en el visor del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). El análisis se efectúa bajo las condiciones meteorológicas correspondientes a los hietogramas de varios eventos significativos de los últimos años registrados en los pluviómetros del entorno (Figura 1). La interpolación espacial de la lluvia se ha efectuado mediante el método de polígonos propuesto por Thiessen (1911). Además, los siguientes pluviómetros cuentan con un medidor de caudal para calibrar los resultados de los modelos:

- 06A15P01 – Rambla de Benipila,
- 06A12P01 – Canteras, y
- 06A11P01 – Benipila (Patojos).

Los eventos considerados en el estudio son los siguientes:

- 19 abril 2019,
- 20 marzo 2020, y
- 23 mayo 2023.

Puesto que resulta difícil establecer un período de retorno único dada la extensión de la cuenca de estudio y la variabilidad de precipitaciones en el espacio, de acuerdo con la precipitación máxima diaria registrada, se ha estimado que dichos escenarios

eventos tienen un período de retorno de entre 10 y 25 años para el evento de abril de 2019; entre 20 y 50 años para el evento de marzo de 2020; y entre 10 y 15 años para el episodio de lluvias de mayo de 2023, en función del pluviómetro considerado.

Por otro lado, se ha calculado la lluvia de diseño para un período de retorno de 100 años realizando un análisis de la precipitación máxima diaria correspondiente a dicho período. Dado que sólo 3 de los pluviómetros seleccionados contaban con series históricas de precipitación suficientemente extensas (26 años) para aplicar un análisis estadístico, para los pluviómetros más recientes se ha optado por utilizar la información de precipitación máxima diaria obtenida del documento *Máximas Lluvias Diarias de la España Peninsular*, del Ministerio de Fomento (1999). Una vez obtenida la precipitación máxima diaria, se ha procedido a crear el hietograma de diseño utilizando el método de los bloques alternos. Dicho hietograma aplicado a cada pluviómetro de la cuenca proporcionará un modelo hidrológico para período de retorno de 100 años.

Como método de infiltración, se ha optado por el número de curva (CN) del *Soil Conservation Service* (SCS), ampliamente utilizado y aceptado en España. Los valores de CN han sido obtenidos de la aplicación Mapa de caudales máximos en régimen natural, CAUMAX (CEDEX, 2009), de la que se ha extraído de una capa ráster de tamaño de píxel de 500×500 metros con la información del umbral de escorrentía (P_0).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en estudios previos (Molina, 2023) donde la condición de humedad de antecedente promedio o CN_{II} parece ser una situación muy conservadora en la cuenca semiárida analizada, para este estudio se ha considerado la condición de humedad antecedente de suelo seca, o CN_I , asociada a la condición de humedad antecedente de suelo promedio según la siguiente ecuación:

$$CN_I = AMC I = \frac{4.2 \cdot CN_{II}}{10 - 0.058 \cdot CN_{II}} \quad (1)$$

Según las fórmulas propuestas por Hawkins *et al.* (1985) y NRCS (2004), el número de curva asociado a la condición de humedad antecedente de suelo promedio CN_{II} se obtiene de la información ráster del umbral de escorrentía a partir de:

$$CN_{II} = AMC II = \frac{25400}{254 + \frac{P_0}{0.2}} \quad (2)$$

Finalmente, el número de Manning de los modelos se ha determinado a partir de la capa de usos del suelo del proyecto Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE), disponible en el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Cada tipo de suelo se ha asociado a un número de Manning siguiendo lo establecido en el Anejo V de la *Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Zonas Inundables* publicada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011).

Descripción de los programas utilizados

En el estudio se comparan tres programas de código libre:

- Iber (versión 3.1), desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, GEAMA, de la Universidad de la Coruña y el Instituto FLUMEN de la Universitat Politècnica de Catalunya. Es un modelo numérico que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales en lámina libre (también denominadas de aguas someras o *shallow waters*) en ríos y estuarios. El modelo puede aplicarse a una amplia variedad de casos, como dinámica fluvial, simulaciones de rotura de presas, análisis de zonas inundables, o transporte de sedimentos. Desde la versión 2.1, lanzada en enero de 2014, el programa permite realizar estudios hidrológicos con capas ráster de lluvias (Cea y Bladé, 2015). En la versión 3.1.0, lanzada en diciembre de 2021, el módulo de procesos hidrológicos ha sido reestructurado y mejorado, permitiendo que los hietogramas puedan implementarse de forma aislada, como polígonos de Thiessen o como capas ráster (Iberaulla, 2021). Por su parte, las pérdidas pueden implementarse manualmente, a través de un mapa ráster o por zonas.
- HEC-RAS (versión 6.3.1). *River Analysis System* (RAS) es un modelo de flujo en lámina libre de libre distribución desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* (HEC) del *US Army Corps of Engineers* (USACE). Se caracteriza

por su capacidad de cálculo en modelos de flujo en lámina libre. El programa permite considerar diferentes componentes de análisis hidráulico, que incluyen simulación de flujo en régimen estacionario y no estacionario, cálculos de transporte de sedimentos, y modelado de transporte de temperatura, y calidad del agua (Brunner, 2020, 2022). Desde la versión 5.0, lanzada en febrero de 2016, el programa permite la modelización hidráulica bidimensional (2D), cuyo enfoque es ampliamente utilizado en los estudios de zonas inundables actuales. Desde la versión 6.0, lanzada en mayo de 2021, el programa incluye la posibilidad de realizar estudios de modelización hidrológica bidimensional (2D).

- HEC-HMS (versión 4.9) *Hydrologic Modeling System* (HMS) es un modelo hidrológico de libre distribución desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* (HEC) del *US Army Corps of Engineers*, conocido por su uso en modelización agregada y semidistribuida. Dichos modelos se dividen en superficies generadoras de hidrogramas (subcuencas) y sistemas hidrológicos por los que circulan dichos hidrogramas (cauces, embalses). Desde la versión 4.7, lanzada en diciembre de 2020, el programa permite además realizar modelización de bidimensional (2D) como método de transformación lluvia-escurrentía, utilizando ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento. El modelo se ha considerado en su versión semidistribuida, dividiendo la cuenca drenante en varias subcuencas. Los modelos matemáticos son determinísticos, no estocásticos, lo que implica que las condiciones de la cuenca, las condiciones iniciales y los parámetros del cálculo son conocidos.

Características generales de los programas

El estudio busca determinar las diferencias en los resultados obtenidos por los diferentes programas, así como la fuente de dichas discrepancias, por lo que se han utilizado los mismos datos de entrada en todos los modelos. Con el objetivo de plantear una metodología que sea aplicable en cuencas no aforadas, los modelos no han sido calibrados frente a ningún evento registrado en la cuenca. De este modo, se puede tener una estimación de la incertidumbre de cada modelo a igualdad de variables de entrada y ante la falta de medidas de campo.

La geometría de los modelos bidimensionales comprende una malla de tamaño variable según la zona de estudio. En ambos modelos, para la zona que abarca el núcleo urbano de la ciudad de Cartagena se ha seleccionado una malla de 5×5 metros. Las motas de la rambla se han delimitado con una malla de 1 m, y para el resto del dominio se ha seleccionado una malla con celdas de 18 m de lado.

Como condiciones iniciales de los modelos bidimensionales, se ha considerado por defecto el estado de calado cero en todo el dominio, por lo que la capacidad de infiltración se corresponde a la asignada según el número de curva correspondiente. En cuanto a las condiciones de contorno de salida se ha establecido una condición supercrítica en la salida a través del muelle del puerto de la ciudad (escalón o grada sobre el nivel del mar sin barrera perimetral), y en la salida a través de la Rambla de Benipila se ha indicado una condición subcrítica de 0.22 m de calado, teniendo en cuenta la cota de pleamar media viva equinoccial.

Para la configuración del modelo semidistribuido, se ha optado por la división del modelo en 25 subcuencas (área de drenaje de 3.5 km²), a cada una de las cuales se les ha asignado sus correspondientes parámetros hidrológicos medios. En estudios previos se comprobó que las diferencias en el valor de caudal pico eran inferiores al 5% al considerar subcuencas de 5 km² y de 3.5 km², por lo que se concluyó que el número de divisiones en subcuencas era adecuado, teniendo en cuenta las características del programa (Burillo, 2023). Al igual que los modelos bidimensionales, la infiltración se ha calculado con el método de transformación del SCS (*Soil Conservation Service*). La Tabla 2 recopila la información sobre el número de curva obtenido para cada subcuenca en el modelo semidistribuido:


Existen diversas fórmulas empíricas que proporcionan el valor del tiempo de concentración, t_c . En España la expresión más utilizada es la propuesta por Témez (1987), que expresa t_c en horas de la siguiente forma:

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{J^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (3)$$

siendo L la longitud del cauce principal en km y J la pendiente media del cauce principal en m/m.

En cuanto al método de propagación del hidrograma, se ha elegido el método de tiempo de retardo o *Lag time*, t_{lag} , que tiene en cuenta el tiempo de concentración de cada subcuenca. Es el modelo más sencillo de los disponibles en HEC-HMS. El método no incluye los procesos de atenuación o difusión, siendo el más adecuado para tramos cortos con un tiempo de recorrido predecible que no varía con las condiciones cambiantes (USACE, 2016a, 2016b). Se realizó un análisis de sensibilidad de la influencia de este parámetro sobre los resultados del modelo. Considerando el caudal punta obtenido en la desembocadura de la rambla, un $t_{lag} = 0.35 t_c$ (Témez, 1987) tiende a obtener un caudal punta ligeramente superior (en torno a un 5%) que al emplear un t_{lag} igual al 70% del tiempo de concentración. Tras una serie de comprobaciones, se adoptó el 60% del tiempo de concentración como criterio para el tiempo de retardo en todas las subcuencas, consiguiendo una ligera mayor similitud en el tiempo al pico al analizar el conjunto de todos los puntos aforados y episodios históricos calculados en la cuenca (Burillo, 2023).

Tabla 2 | Número de curva calculado para cada subcuenca.



Nombre de la subcuenca	Nombre de la subcuenca		Nombre de la subcuenca	Nombre de la subcuenca	
	CN _I	CN _{II}		CN _I	CN _{II}
s1	60.3	77.7	s14	55.7	74.8
s2	60.5	77.9	s15	56.5	75.5
s3	53.7	73.3	s16	55.4	74.3
s4	57.3	75.7	s17	57.7	76.4
s5	51.3	71.7	s18	79.2	88.4
s6	54.2	73.7	s19	57.2	75.7
s7	54.2	73.7	s20	53.7	73.3
s8	56.1	75.0	s21	65.6	80.8
s9	57.8	76.2	s22	57.5	76.2
s10	57.4	75.6	s23	67.7	82.5
s11	54.0	73.5	s24	50.4	71.0
s12	59.3	76.9	s25	65.4	80.1
s13	57.2	75.7			

Se han analizado los tres eventos de lluvia real mencionados a partir de los registros de los aforos del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS), permitiendo comparar los hidrogramas generados con los datos reales en las cuencas de estudio para analizar la adecuación de los modelos. Asimismo, se ha analizado un evento sintético de un mayor período de retorno calculado a partir de dichos pluviómetros.

No se realizó ningún tipo de calibración previa respecto al caudal pico o volumen de escorrentía, utilizando las metodologías y los datos disponibles en libre acceso comentados previamente, comparando los caudales pico de los hidrogramas obtenidos con los hidrogramas aforados. De este modo, se puede estimar los resultados que se tendrían con cada programa en cuencas no aforadas.

En HEC-RAS se ha utilizado como esquema de resolución las ecuaciones de onda difusa, que constituyen la simplificación de las de aguas someras y reducen considerablemente el tiempo computacional. En Iber se han utilizado las ecuaciones de aguas someras con un esquema de primer orden.

En cuanto a las condiciones internas de los modelos bidimensionales, se han incluido los puentes y obras de drenaje transversal (*culverts*) pertinentes en las simulaciones bidimensionales. En total, se han tenido en cuenta 12 puentes y obras de drenaje transversal, cuya geometría ha sido evaluada tras varias visitas a campo. En el modelo semidistribuido de HEC-HMS no se han considerado este tipo de condiciones internas siguiendo la recomendación de la *Guía Metodológica para el desarrollo del*

Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables publicada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011), que indica:

“En concreto, se propone descartar aquellas presas que cumplan al menos una de las dos condiciones siguientes:

- El porcentaje de cuenca controlada por el embalse es menor del 10% de la cuenca vertiente al tramo de estudio.
- El volumen útil del embalse es menor del 10% del volumen de avenida en la zona de estudio para el periodo de retorno de 10 años.”

Los resultados fueron evaluados mediante el análisis de los hidrogramas extraídos en varias secciones de control de las diferentes cuencas. En la Figura 2 se muestra un esquema con la localización de las secciones de control. Algunas de las secciones transversales coinciden con la localización de medidores de caudal, lo que permite comparar los caudales simulados con los caudales aforados de cada evento.

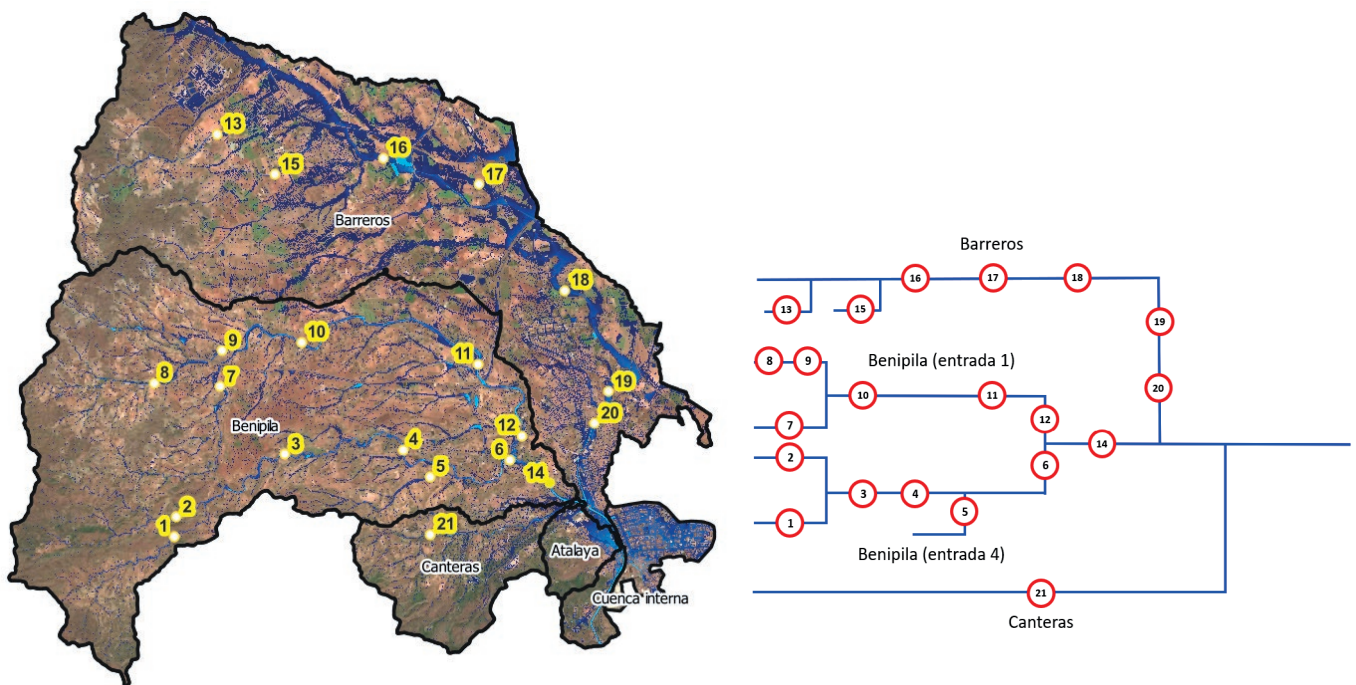


Figura 2 | Mapa y esquema de la localización de las secciones de control consideradas en el modelo hidrológico.

A pesar de que se definieron los mismos puentes y obras de drenaje transversal en ambos modelos bidimensionales, se observaron diferencias en los caudales pico obtenidos en ambos modelos bidimensionales. Una posible explicación reside en que el modelo digital del terreno presentaba ciertas zonas afectadas por obras lineales y otras obstrucciones que impedían la continuidad en la ruta del flujo. En la Figura 3 se han indicado los puntos conflictivos que presentaban mayores diferencias entre modelos, generalmente coincidiendo con el cruce de un obstáculo o la presencia de una obra lineal que alteraba el MDT.

A este efecto, se han realizado modificaciones en los programas bidimensionales, de acuerdo a las herramientas disponibles, para lograr un mayor acuerdo entre los resultados. Por un lado, se han modificado ciertas partes del modelo digital del terreno, corrigiendo el valor de conjuntos píxeles que actuaban como una barrera para el flujo. En los puntos donde dicha operación resultaba más complicada, se ha modificado la malla directamente sobre el modelo bidimensional, dándole un determinado valor o creando líneas de rotura para adecuarla a los obstáculos. En la Figura 3 se indican los puntos donde se han introducido las estructuras internas en los modelos bidimensionales, así como los puntos conflictivos donde los hidrogramas y calados divergen más de un modelo a otro.

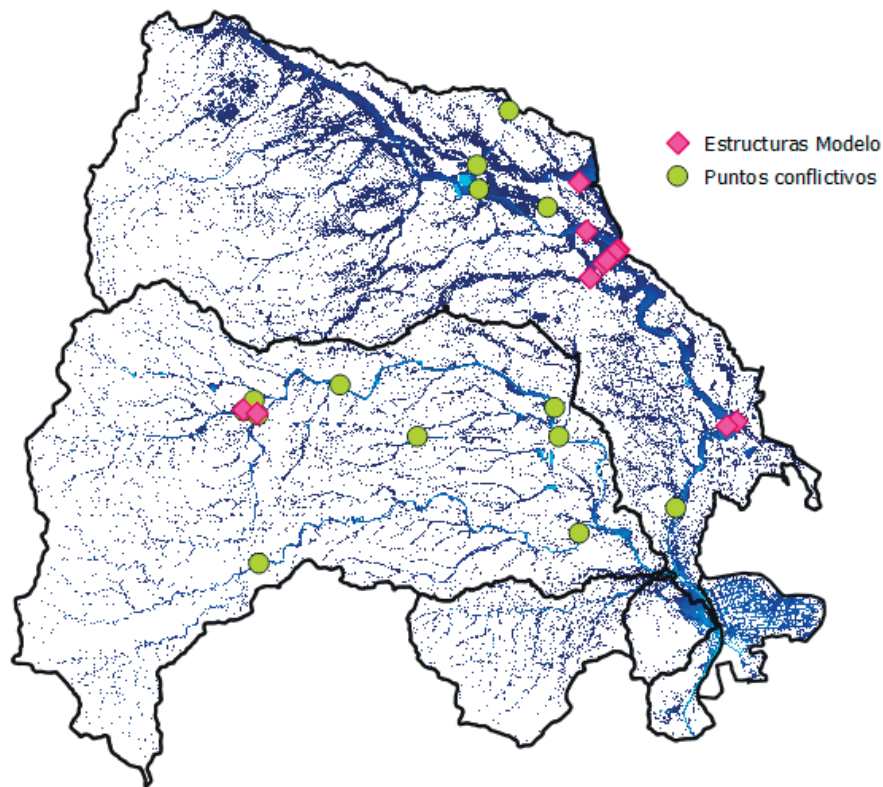


Figura 3 | Mapa de la situación de puentes y obras de drenaje transversal (rojo) y puntos de divergencia de los resultados entre modelos (verde).

RESULTADOS

En las Figuras 4-6 se representan algunas de las secciones transversales analizadas, situadas en diferentes cuencas y coincidentes con dos de las estaciones de medida de caudales. Como se ha comentado anteriormente, los eventos han sido analizados en Iber, HEC-RAS y HEC-HMS para la condición de infiltración de humedad antecedente seca (CN_1).

Los hidrogramas de Iber (bidimensional) son los que más se aproximan a los eventos registrados en el aforo de la Rambla de Benipila para dicha condición de humedad antecedente seca, aunque en ocasiones pueden quedar por debajo del caudal pico registrado.

Los resultados obtenidos con HEC-RAS (bidimensional) muestran mayores caudales pico, y se aproximan más a los eventos registrados en el aforo de la Rambla de Canteras, cuyo caudal pico es un orden de magnitud inferior al valor obtenido en el aforo de la Rambla de Benipila.

En general, los resultados obtenidos del modelo semidistribuido HEC-HMS tienden a generar caudales pico excesivamente elevados (incluso de diferente orden de magnitud), por lo que dicho programa con las características especificadas no resulta el más adecuado para la cuenca de estudio en zonas semiáridas.

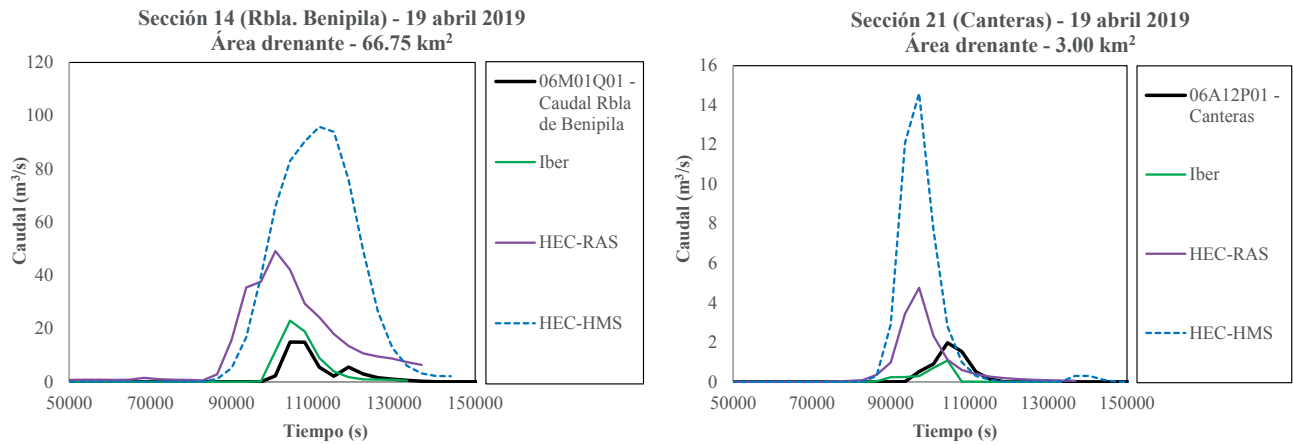


Figura 4 | Hidrograma aforado y simulados en HEC-RAS, Iber y HEC-HMS para las secciones de control 14 y 21 en el episodio de lluvia del 19 de abril de 2019.

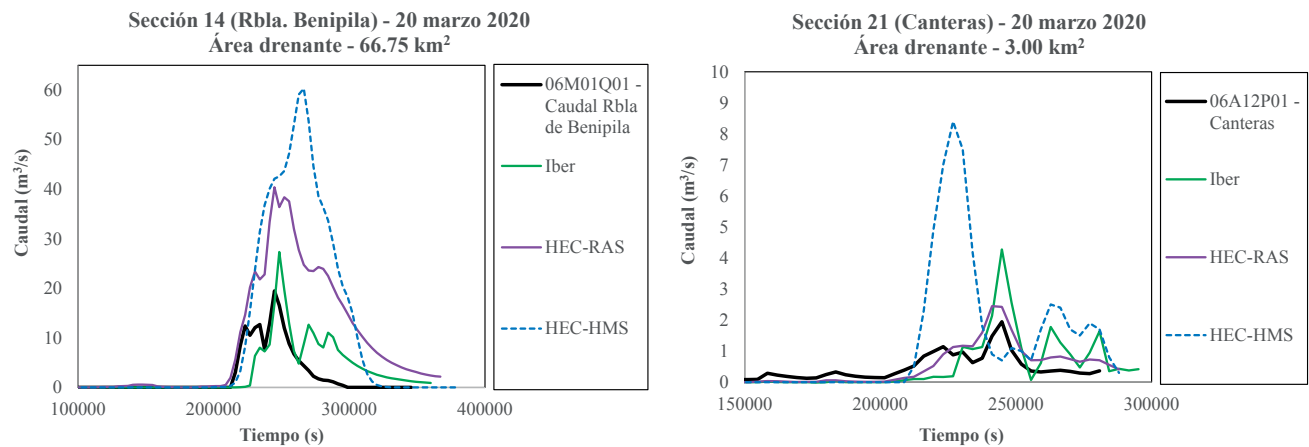


Figura 5 | Hidrograma aforado y simulados en HEC-RAS, Iber y HEC-HMS para las secciones de control 14 y 21 en el episodio de lluvia del 20 de marzo de 2020.

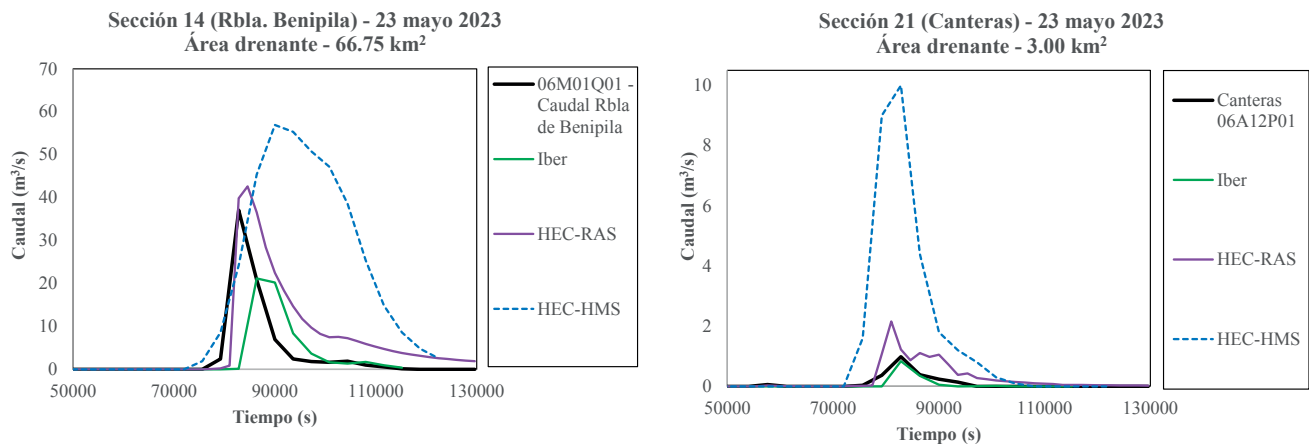


Figura 6 | Hidrograma aforado y simulados en HEC-RAS, Iber y HEC-HMS para las secciones de control 14 y 21 en el episodio de lluvia del 23 de mayo de 2023.

Dadas las diferencias observadas entre los dos modelos bidimensionales, se han realizado modificaciones en los puntos marcados de la Figura 3 del MDT para intentar reducir dichas diferencias. En la Figura 7 se muestran los resultados tras las modificaciones realizadas al aplicar una lluvia sintética de 100 años de periodo de retorno.

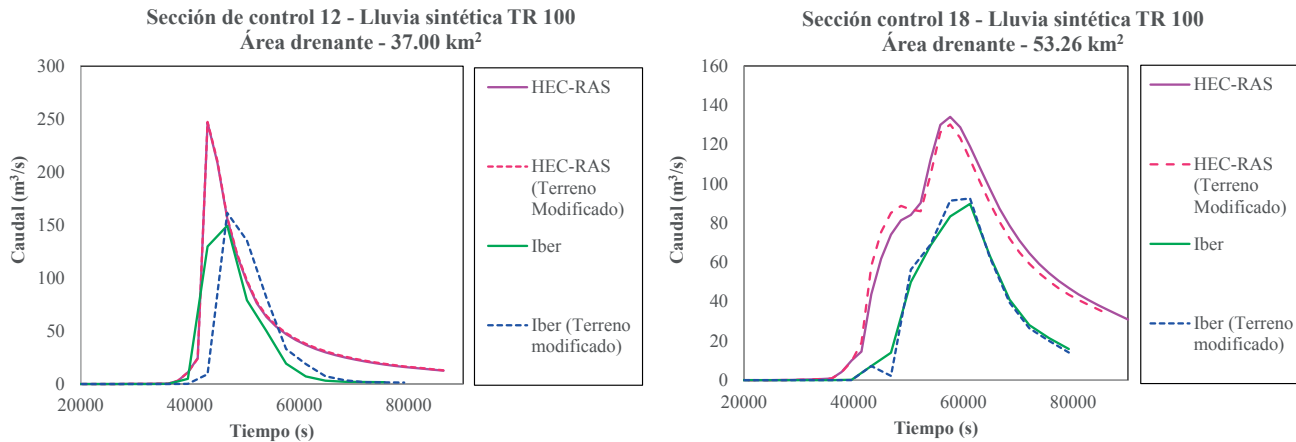


Figura 7 | Hidrogramas simulados en HEC-RAS e Iber para las secciones de control 12 y 18 (localizadas en Benipila y Barreros, respectivamente) para una lluvia sintética de periodo de retorno de 100 años.

Como se puede comprobar en la Figura 7, los programas tienden a generar el mismo hidrograma, con ligeros cambios de forma, mientras que existen grandes diferencias de caudal pico entre Iber y HEC-RAS, que resultan más acusadas al tratarse de un período de retorno mayor. La modificación de la topografía parece tener poca influencia al tratarse de puntos localizados en una cuenca considerable con un tamaño de malla relativamente grande y sin elementos que provoquen grandes almacenamientos de agua.

CONCLUSIONES

Para la cuenca de estudio y la hipótesis de infiltración elegida (humedad antecedente seca CN_1), el programa que más se acerca a la realidad es Iber, si bien HEC-RAS queda del lado de la seguridad al arrojar mayores valores de caudales pico. Puesto que los datos de lluvia y el método de interpolación (polígonos de Thiessen) permanecen constantes, las mayores diferencias de un modelo con respecto a otro parecen estar relacionadas con la forma en que ambos modelos resuelven las ecuaciones 2D de Saint-Venant. Por ejemplo, Iber considera un mallado basado en elementos 2D triangulares o rectangulares, cuya densidad puede adaptarse según las necesidades de la zona de cálculo. Dentro de cada elemento, el terreno se representa como una plana de pendiente constante, controlándose las diferencias con el Modelo Digital del Terreno a través del error cordal relativo (fijado en un máximo de un 10% en este estudio). HEC-RAS adopta un enfoque diferente, donde las celdas de cada elemento pueden tener hasta ocho lados. En cada celda se obtiene la elevación según la relación volumen/área que representa los detalles del terreno. Las caras de las celdas son secciones transversales detalladas, que se procesan según la elevación frente a área mojada, perímetro mojado y rugosidad. Este enfoque permite, a priori, utilizar tamaños de celda más grandes y seguir representando con precisión el terreno. El tamaño de la malla en HEC-RAS se puede adaptar creando distintos tamaños a través de líneas de rotura (*break lines*) o áreas de refinamiento. En ambos programas, los tamaños de celda empleados pueden considerarse muy pequeños para estudios hidrológicos semidistribuidos, pero resultan tamaños muy grandes considerando los valores habituales empleados en modelos bidimensionales fluviales. Por su parte, los esquemas de resolución y criterios de estabilidad empleados para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales, en derivadas parciales, hiperbólico y no-lineal, por lo que su aplicación a geometrías reales puede generar resultados ligeramente diferenciados. Las variaciones pueden estar también parcialmente generadas por el hecho de que los dos modelos bidimensionales cuentan con módulos hidrológicos que pueden generar variaciones en la infiltración y la escorrentía generada en eventos lluviosos a igualdad de datos de entrada en casos reales.

Respecto a los resultados del modelo semidistribuido realizado en HEC-HMS, los resultados ponen de manifiesto la necesidad de aplicar un proceso de calibración y validación frente a eventos históricos aforados. Al considerar mayores simplificaciones para ajustarse a la realidad (por ejemplo, cuencas de tamaño del orden de kilómetros frente a los modelos bidimensionales que utilizan mallados del orden de metros), este tipo de modelos resulta más rápido en ejecutarse y es más flexible para realizar procesos de calibración. Los resultados ponen de manifiesto que los resultados obtenidos con cualquiera de los enfoques (modelos bidimensionales que requieren mayor capacidad y tiempo de cálculo, frente a modelos semidistribuidos que permiten una mayor velocidad de cálculo y capacidad de calibración gracias a una mayor simplificación del sistema hidrológico) depende de las necesidades de cada caso, datos disponibles (por ejemplo, existencia de eventos importantes aforados) y experiencia del modelador. Es necesario continuar analizando episodios de lluvia aforados para seguir ahondando en el mejor conocimiento de los diferentes modelos hidrológicos en zonas semiáridas. En futuros estudios sería recomendable barajar otras hipótesis de humedad antecedente (normal o húmeda), realizar una calibración previa, analizar la influencia del tamaño de las celdas de los modelos hidrológicos bidimensionales y subcuencas en los modelos semidistribuidos, así como del criterio en método de propagación en cauce en los modelos semidistribuidos, incluyendo su posible atenuación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Ayuntamiento de Cartagena a través del Convenio “Estudio de la cartografía de zonas inundables a partir de la simulación bidimensional de los desarrollos urbanos existentes, así como los del nuevo Plan General de Ordenación Urbana del término municipal de Cartagena”. Ref: 6862/21IMC-C.

REFERENCIAS

- Brunner, G.W. 2020. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 6.0 Beta*. US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.
- Brunner, G.W. 2022. *HEC-RAS 2D User's Manual. Version 6.2*. US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.
- Burillo, N. 2023. *Análisis hidrológico de las cuencas semiáridas de la rambla de Benipila y la rambla del Portús, situadas en el Término Municipal de Cartagena*. Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Cea, L., Bladé, E. 2015. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51, 5464-5486. <https://doi.org/10.1002/2014WR016547>
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). 2009. *Mapa de caudales máximos de avenida para la red fluvial de la España peninsular*. Informe Técnico para la Dirección General del Agua del MARM. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.
- Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). 2022. <https://centrodedescargas.cnig.es/>. Fecha de consulta: 2 de noviembre de 2021.
- Fraga, I., Cea, L., Puertas, J., Mosqueira, G., Quinteiro, B., Botana, S., Fernández, L., Salsón, S., Fernández-García, G., & Taboada, J. 2021. MERLIN: Una nueva herramienta para la predicción del riesgo de inundaciones en la demarcación hidrográfica Galicia-Costa. *Ingeniería Del Agua* 25(3), 215–227. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.15565>
- Hawkins, R. H., Hjelmfelt Jr, A. T., Zevenbergen, A.W. 1985. Runoff probability, storm depth, and curve numbers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 111(4), 330-340. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1985\)111:4\(330\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1985)111:4(330))
- Iberaula. 2014. *Iber. Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual de referencia hidráulico*. Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Iberaula. 2021. What's new on IBER 3.1.0. <https://www.iberaula.es/>. Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2021.

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 Fomento. 1999. *Máximas lluvias diarias en la España Peninsular*.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2011. *Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. ISBN: 978-84-491-1136-5.

Molina, P. 2023. *Análisis hidráulico e hidrológico de la rambla de Benipila, situada en el Término Municipal de Cartagena*. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Cartagena.

NRCS. 2004. *Estimation of direct runoff from storm rainfall. Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*, Chapter 10. Washington DC. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture.

Témez, J.R. 1987. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU).

Thiessen, A.H. 1911. Precipitation for large areas. *Monthly Weather Review*, 39(7), 1082–1084. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1911\)39%3C1082b:PAFLA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1911)39%3C1082b:PAFLA%3E2.0.CO;2)

U.S. Army Corps of Engineers. 2016a. *HEC-HMS User's Manual. Version 4.2*. US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.

U.S. Army Corps of Engineers. 2016b. *HEC-HMS Technical Reference Manual. Version 4.2*. US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.