



Simulación hidráulica de inundaciones: propuesta metodológica basada HEC-RAS 2D y SWE

Hydraulic flood simulation: methodological proposal based on HEC-RAS 2D and SWE

Evangelina Avila Aceves ^{1,2} ✉, Wenseslao Plata Rocha ^{1,2}, Sergio Alberto Monjardin Armenta ^{1,2}, Jesús Gabriel Rangel Peraza ³, Lidia Yadira Pérez Aguilar ^{2,4}, Yedid Guadalupe Zambrano Medina ^{2,5}

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Circuito Interior Oriente SN, Cd Universitaria, 80040. Culiacán, Sinaloa, México.

² Laboratorio Nacional CONAHCyT de Tecnologías de la Información Geoespacial para los Sistemas Socioecológicos Resilientes (LaNCTIGeSSR), clave 89. Cerro de Coatepec, Ciudad Universitaria, 50110 Toluca de Lerdo, Mexico.

³ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Culiacán, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Juan de Dios Batíz 310. Col. Guadalupe, 80220. Culiacán, Sinaloa, México.

⁴ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Informática Culiacán. Circuito Interior Oriente SN, Cd Universitaria, 80040. Culiacán, Sinaloa, México.

⁵ Estancia posdoctoral en el Posgrado en Tecnologías Agrícolas Limpias, Instituto de Ciencias y la Facultad de Ciencias Químicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla de Zaragoza, 72570, Puebla, México.

Resumen

Las recientes inundaciones que han ocurrido en diversas regiones de México han causado pérdidas económicas significativas. En regiones en desarrollo, la modelación de escenarios para alerta temprana se encuentra limitada por la inconsistencia espacio-temporal de los datos hidrométricos e hidrológicos. Combinar modelos hidrológicos, sistemas de información geográfica y simulación hidráulica es un enfoque clave para analizar y predecir eventos de inundación especialmente en cuencas no aforadas. Este trabajo presenta la combinación de modelo hidrológico con simulación hidráulica tradicional, combinada con modelo hidráulico mediante ecuaciones de aguas poco profundas (SWE, por sus siglas en inglés). El desempeño del modelo se evaluó con R^2 (0.927), NSE (0.678), RMSE (2.1) y PBIAS (12.06), $F^{(2)}$ (0.710) indicando un rendimiento aceptable del modelo.

Palabras clave: simulación de inundaciones, HEC-RAS, modelado geoespacial, modelo hidrológico, simulación hidráulica.

Abstract

The recent floods that have occurred in various regions of Mexico have caused significant economic losses. In developing regions, scenario modeling for early warning is limited by the spatial-temporal inconsistency of hydrometric and hydrological data. Combining hydrological models, geographic information systems, and hydraulic simulation is a key approach to analyzing and predicting flood events, especially in ungauged basins. This paper presents the combination of a hydrological model with traditional hydraulic simulation, combined with a hydraulic model using shallow water equations (SWE). The performance of the model was evaluated using R^2 (0.927), NSE (0.678), RMSE (2.1), PBIAS (12.06), and $F^{(2)}$ (0.710) indicating acceptable performance of the model.

Keywords: flood simulation, HEC-RAS, geospatial modeling, hydrological model, hydraulic simulation.

Introducción

Las inundaciones son fenómenos naturales altamente destructivos que pueden causar graves daños en la infraestructura de ciudades, medio ambiente y a la vida humana (Liu y Pontius, 2021; Hu y Demir, 2021; Ku, 2021; Corapci y Ozdemir, 2024). Las ciudades son las más propensas a sufrir inundaciones como consecuencia de la continua urbanización (Mustafa *et al.*, 2023), cambio de uso de suelo, y aumento en la extensión de coberturas impermeables

Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 25 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto 2026

✉ Autor para correspondencia

Evangelina Avila-Aceves

evangelinaavila.facite@uas.edu.mx

Como citar

Avila-Aceves E, Plata-Rocha W, Monjardín-Armenta SA, Rangel-Peraza JG, Pérez-Aguilar LY, Zambrano-Medina YG (2026). Simulación hidráulica de inundaciones: propuesta metodológica basada HEC-RAS 2D y SWE. *Ciencia Nicolaita* 97:41-50. doi:[10.35830/cn.vi97.925](https://doi.org/10.35830/cn.vi97.925)

(Tanouchi *et al.*, 2019).

En los últimos años, diversas regiones de México y el mundo se han visto afectadas por inundaciones repentinas que se han vuelto en un fenómeno habitual durante la temporada de lluvias producidos por eventos hidrometeorológicos extremos, que se han intensificado por el cambio climático, así pues, modelar escenarios de inundación y elaborar mapas de riesgo pueden ayudar a la comunidad científica y expertos en clima, para la gestión de inundaciones futuras (Mustafa *et al.*, 2023).

Evaluar los riesgos ante inundaciones e identificar aquellas zonas susceptibles se encuentran principalmente en función de la modelación de los fenómenos de inundación (Ghimire, 2013). Así, los modelos hidrológicos son una herramienta valiosa que ayuda a describir el comportamiento hidrológico de las cuencas, y con los avances en herramientas de observación terrestre y Sistemas de Información Geográfica (SIG), dan espacio a mejoras metodológicas y aplicaciones hidrológicas en contextos geoespaciales (Pandey *et al.*, 2024).

La simulación hidráulica de ríos es una herramienta para la simulación de escenarios de inundación por desbordamiento. Ésta puede ser en una o dos dimensiones, así, la simulación hidráulica unidimensional permite conocer la velocidad del flujo y la altura de calado sobre el eje del río y sus posibles desbordamientos (Milašinović *et al.*, 2020; Pathan *et al.*, 2022). En cambio, la simulación 2D permite analizar el flujo en los ejes x, y, haciéndose más efectivo en las llanuras aluviales (Oubennaceur *et al.*, 2019; Barbero *et al.*, 2022; Karim *et al.*, 2021).

La propuesta de un acoplamiento 1D-2D ofrece los beneficios de ambos enfoques de simulación, no obstante, esta configuración sólo es efectiva donde los márgenes del río sean planicies aluviales (Prawirakusuma *et al.*, 2022). Estas configuraciones (1D, 2D o el acoplamiento 1D-2D) requieren hidrogramas de caudal para poder ejecutarse. En cuencas no aforadas, estos caudales deben obtenerse mediante un modelo hidrológico, que permite estimar los valores hidráulicos necesarios para su simulación (Finaud-Guyot *et al.*, 2011; Adeogun *et al.*, 2015; Noh *et al.*, 2018).

Otra propuesta de simulación de inundaciones es por modelo hidrológico-hidráulico integrado, también llamada simulación hidráulica basada en lluvia en rejilla (RoG por sus siglas en inglés) (Jamali *et al.*, 2021) que, por medio de las ecuaciones de aguas poco profundas (SWE por sus siglas en inglés) resuelve la parte hidrológica, mientras que la simulación hidráulica se realiza ingresando sólo datos pluviométricos como la variable hidrológica-hidráulica en el sistema (Ratia *et al.*, 2014; Costabile y Costanzo, 2021).

Abdessamed y Abderrazak (2019), simularon inundaciones con HEC-RAS 1D, a partir de flujos modelados

hidrológicamente en HEC-HMS para un área de red de arroyos, con secciones transversales delineadas para la simulación 1D. Hamouda *et al.*, (2024) simuló inundaciones a partir de modelo hidrológico-hidráulico integrado con las ecuaciones SWE creando un mapa para validar el índice geomórfico de inundaciones. Mientras que, Ennouini *et al.*, (2024) simuló inundaciones pluviométricas en una red utilizando hietogramas pluviométricos en diferentes periodos de retorno.

A nivel regional, Avila-Aceves *et al.*, (2023) analizaron y evaluaron tres modelos hidrogramas unitarios sintéticos, encontrando mejor desempeño en los modelos SCS-CN y Snyder en comparación con el hidrograma de Témez. Mientras que Sanhouse-García *et al.*, (2021) cartografiaron las zonas propensas a inundación a partir de la orden de arroyos de la cuenca del río Culiacán, destacando que debido a la transformación antropogénica del paisaje y las obras hidráulicas como el drenaje y alcantarillado resultan insuficiente.

A pesar de la alta aplicabilidad y diversidad en los modelos de simulación de inundaciones, aún existe deficiencia en la literatura que evalúe la precisión de simulaciones combinadas de modelos hidrológico-hidráulico tradicional con RoG de manera para la misma zona de estudio. El objetivo principal de este estudio es evaluar la simulación de inundaciones a partir de modelado hidrológico en HEC-HMS que alimenta la simulación hidráulica 2D en HEC-RAS combinada con RoG para los ríos de la ciudad de Culiacán Sinaloa.

Área de estudio

Culiacán, ciudad capital del estado de Sinaloa, México, localizada entre 24°42' y 24°54' de latitud norte y 107°19' y 107°30' de longitud oeste (**Figura 1**). Cuenta con una superficie aproximada de 15,731 km² y una población aproximada de un millón de habitantes. Presenta un clima semiseco y cálido, con lluvias en verano de junio a octubre y mínimas lluvias en invierno.

La cuenca del río Culiacán tiene 875 km de longitud de parteaguas, convirtiéndola en la segunda cuenca hidrográfica más importante de la Región Hidrológica No. 10. La longitud del río Culiacán es de 89.12 km y una pendiente longitudinal de 0.09 % (INEGI, 2019). La mitad de la ciudad pertenece a la cuenca del río Culiacán donde los afluentes de los ríos Humaya y Tamazula confluyen y crean el río Culiacán en el centro de la ciudad. Sin embargo, los escurrimientos de una fracción de la ciudad portan a este sistema de ríos, debido a que el sector sur de la ciudad pertenece a una cuenca arreica (**Figura 1**).

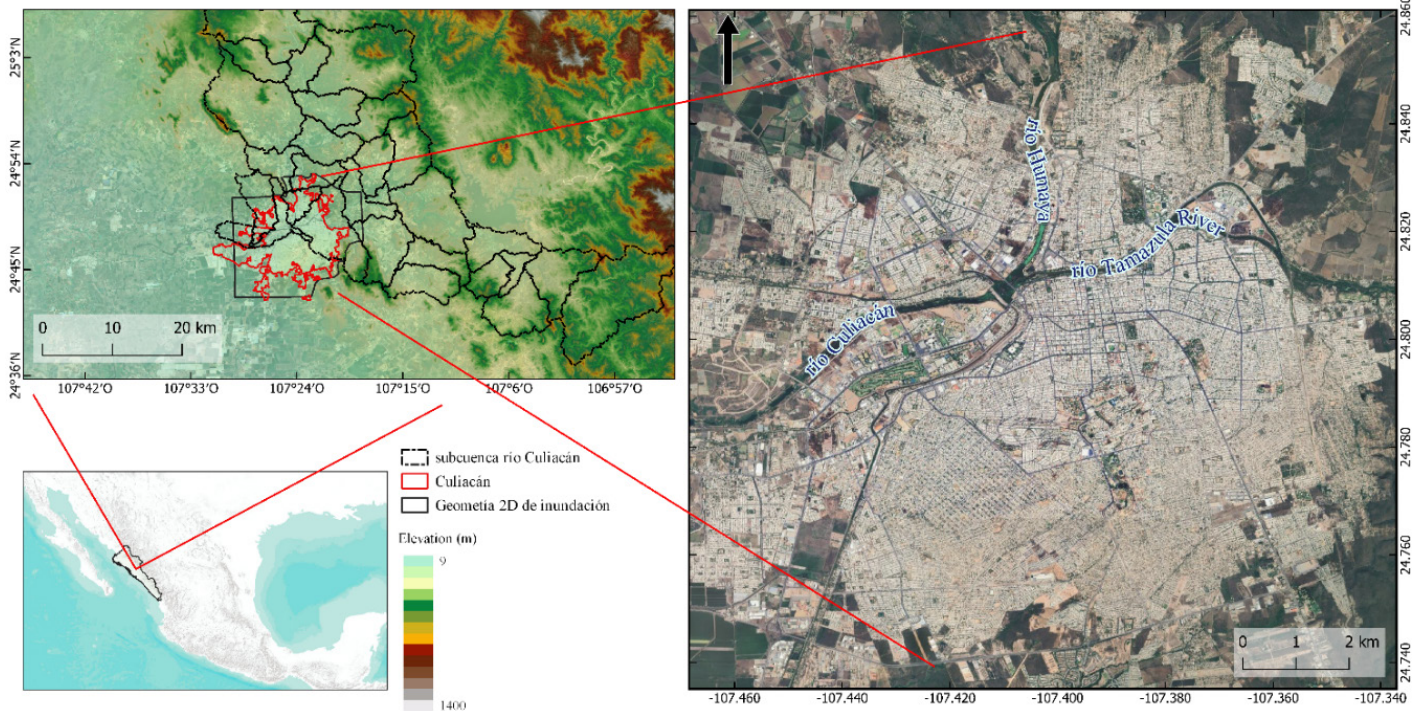


Figura 1. Localización del área de estudio.

Materiales y métodos

El flujo de trabajo para la evaluación de las combinaciones del modelo hidrológico con la simulación hidráulica 2D tradicional y combinada con RoG se muestra en la **Figura 2**. La modelación hidrológica se realizó en HEC-HMS bajo los métodos de transformación lluvia-escorrentía con los métodos de SCS y Snyder que previamente se evaluaron para la ciudad de Culiacán en (Avila- Aceves *et al.*, 2023) y que presentaron mejores ajustes para la cuenca del río Culiacán.

Modelo hidrológico en HEC-HMS

Un modelo hidrológico es la representación matemática del proceso lluvia-escorrentía sobre una determinada porción del territorio. En este estudio utilizó la herramienta HEC-HMS, un modelo hidrológico de base física y semidistribuido, que incluye algoritmos de calibración automática y una extensión de ArcGIS (HEC-geoHMS) (Laouacheria y Mansouri, 2015). Se emplearon datos pluviométricos de 6 estaciones climatológicas (ID: 25015, 25033, 25081, 25102, 25121, 10082) con las cuales se utilizaron los métodos de transformación SCS-CN (P-SCS) y Snyder (P-SND) para simular hidráulicamente los caudales de la depresión tropical 19-E del 2018, conforme está reportado en Plata-Rocha *et al.*, (2025).

Simulación hidráulica 2D tradicional combinada con RoG

HEC-RAS 6.3.1 tiene entre sus herramientas, la simulación RoG. Esta característica implementa una versión 2D del método de lluvia sobre rejilla, resolviendo la ecuación de aguas poco profundas SWE, transformando directamente la intensidad de la lluvia y la infiltración en condiciones de contorno a través de toda la rejilla computacional (Ratia *et al.*, 2014; Ennouini *et al.*, 2024).

Para la simulación 2D en HEC-RAS, se incluyeron tres elementos en el componente SIG (RAS Mapper) de HEC-RAS: i) el terreno (DEM), ii) la geometría de cómputo (geometry 2D), y iii) el uso o cobertura de suelo (land cover). El DEM establece las elevaciones y los cambios de flujo entre una celda y otra. La geometría determina la malla y las celdas computacionales, mientras que el mapa de la cobertura de suelo proporciona indirectamente los coeficientes de rugosidad de Manning para determinar la resistencia de la superficie al flujo de agua.

Se estableció la geometría 2D (**Figura 3**) con una malla de 10 x 10 m en los cauces de ríos, arroyos y canales, así como una malla de 30 x 30 m para la zona urbana de la ciudad. Esta discretización espacial se definió con el objetivo de mantener el número de Courant dentro de los rangos de estabilidad numérica ($\text{Courant} \leq 1$), considerando que los hietogramas de precipitación disponibles presentan un intervalo temporal diario, lo cual limita el uso de pasos de tiempo hidráulicos excesivamente pequeños,

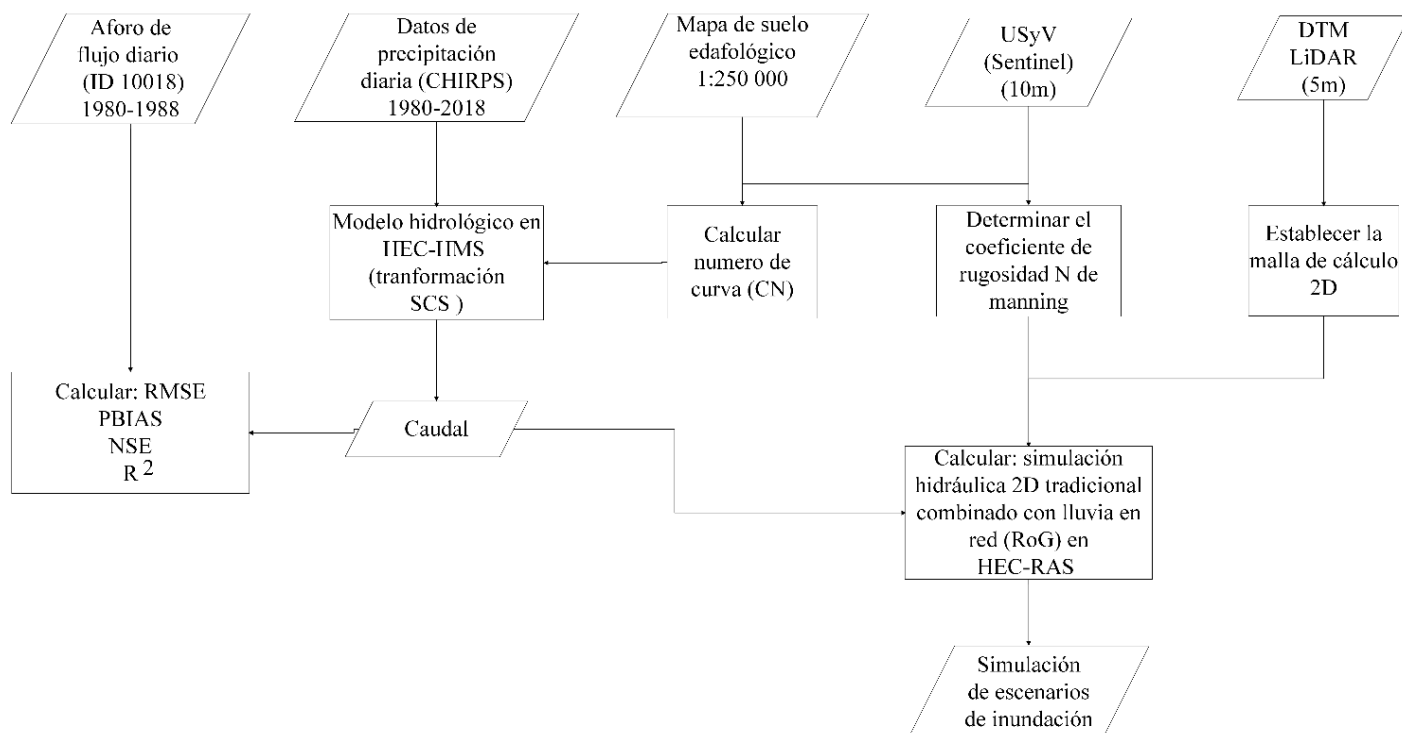


Figura 2. Esquema metodológico.

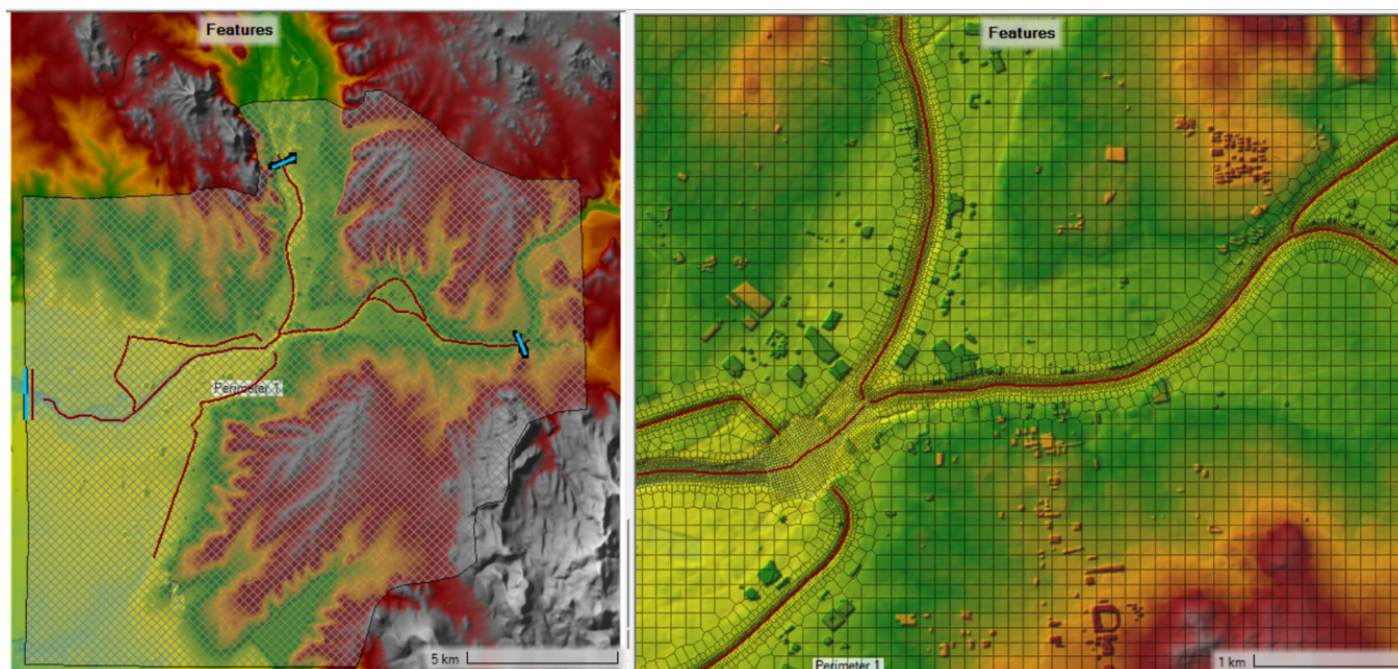


Figura 3. Malla de cómputo para la simulación hidráulica.

aun cuando los hidrogramas generados con HEC-HMS se obtuvieron con resolución horaria.

Asimismo, dado que el DEM empleado tiene una resolución espacial de 5 m, se estableció que las zonas de refinamiento de malla (ríos, arroyos y canales) garantizaran al menos dos pixeles del DEM por celda, con el fin de

preservar adecuadamente la representación del relieve y minimizar errores topográficos en la simulación.

Las condiciones de flujo (Figura 4a) se obtuvieron a partir de los hidrogramas generados (Figura 4b) para los ríos Humaya y Tamazula modelados en HEC-HMS mediante los métodos de SCS y Snyder. A la simulación

RoG se asignó un hietograma de precipitación media diaria a la malla de simulación 2D (**Figura 4c**), por último, se establecieron en la malla las condiciones de contorno de salida aguas abajo.

Calibración y validación del modelo hidrológico

El modelo hidrológico fue calibrado y validado utilizando los registros hidrométricos históricos de la estación hidrométrica «Puente Sudpacífico» (ID 10018), la cual presenta registros en el periodo de 1980 a 1988. Por lo tanto, el modelo se calibró utilizando datos de 1980-1985 y posteriormente se validó con datos de 1986-1988. Este proceso se apoyó en un conjunto de datos de precipitación

diaria a largo plazo que abarcaba desde 1980 hasta 2018.

Se utilizaron cuatro indicadores de bondad de ajuste para evaluar el rendimiento del modelo: error cuadrático medio (RMSE), error porcentual medio del modelo (PBIAS), índice de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (NSE) y coeficiente de determinación (R^2). Se considera que un modelo hidrológico tiene un ajuste perfecto cuando RMSE y PBIAS son 0, y NSE y R^2 son 1. En este estudio, el rendimiento del modelo se consideró satisfactorio si el RMSE se situaba entre 10 y 20 y el PBIAS entre $\pm 30\%$. Los valores positivos y negativos de PBIAS reflejan subestimación y sobrestimación, respectivamente (Moriassi *et al.*, 2007).

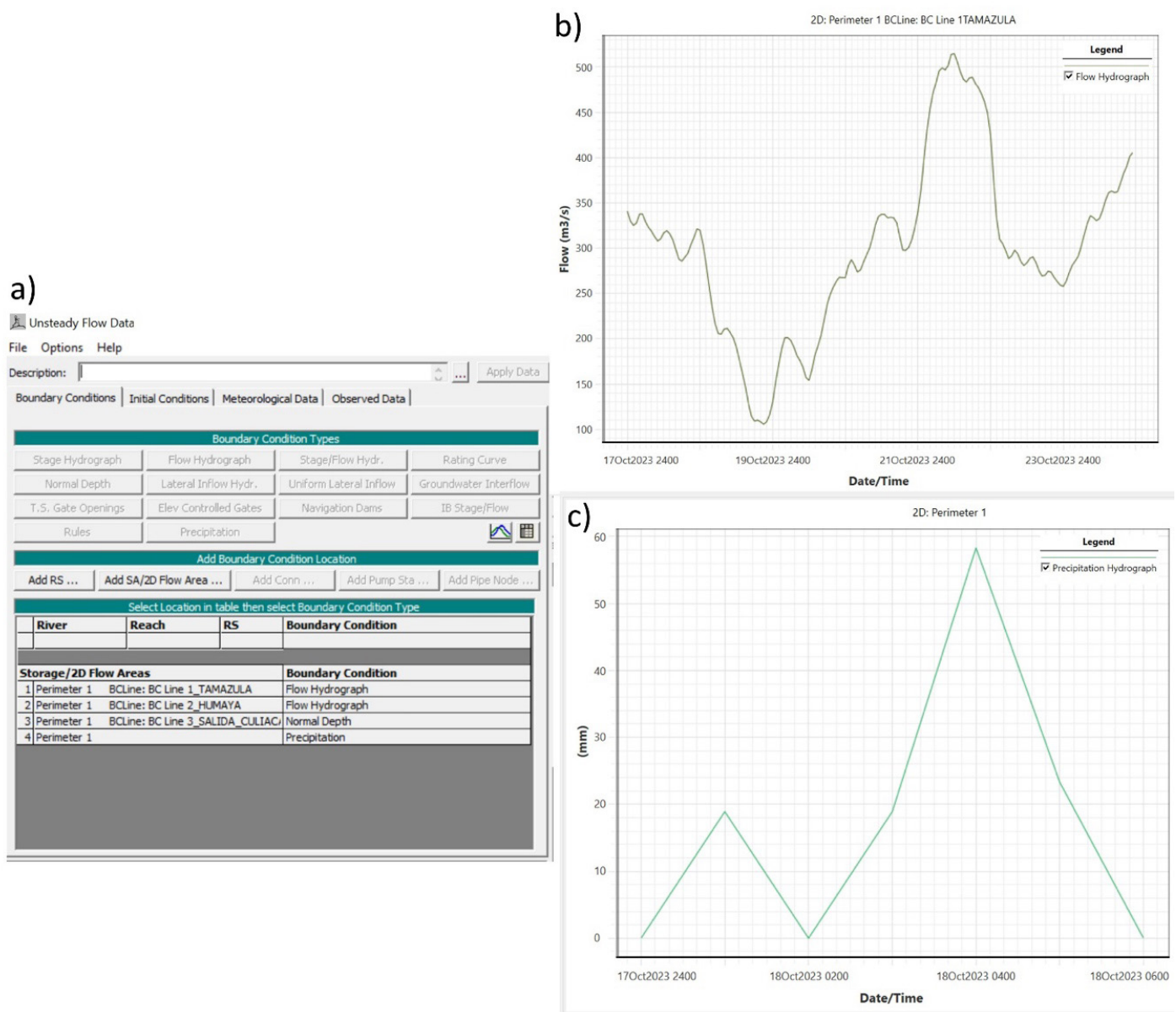


Figura 4. Datos de flujo para la simulación combinada en a) HEC-RAS empleando el b) hidrograma de los ríos y c) el hietograma de precipitación para toda la malla.

La validación de la extensión de la inundación se realizó comparando el mapa de inundación simulado con una máscara de agua derivada de imágenes Sentinel-2 para la depresión tropical 19-E, ocurrido en septiembre de 2017, mismo evento que se simuló en HEC-RAS para su validación. Se empleó la metodología sugerida por Podest y McCartney (2019) para descargar y aplicar estas máscaras de agua a partir de las imágenes Sentinel-2, las cuales posteriormente, se compararon con las extensiones de inundación simuladas por los modelos hidrológicos P-SCS y P-SND. Para esta comparación se empleó la fracción de rendimiento del modelo ($F^{(2)}$) de la ecuación 1, ya que evalúa la precisión de la simulación de la inundación a través de la presencia y ausencia de agua tanto en los resultados simulados como en los datos observados píxel a píxel.

$$F^{(2)} = \frac{P_{i_{obs}} \cap P_{mod}}{P_{i_{obs}} \cup P_{mod}} \quad (1)$$

Donde P_i es un píxel tanto del modelo (mod) como de los datos observados (obs). Los valores de $F^{(2)}$ oscilan entre 0 y 1, donde los valores más cercanos a 1 indican que el modelo representa correctamente las zonas de inundación.

Resultados

Modelo hidrológico en HEC-HMS

Culiacán experimenta una única estación lluviosa anual, con precipitaciones máximas diarias que fluctúan entre 70 y 100 mm. Cuatro eventos superaron los 150 mm, incluidos el huracán Manuel (2013, >250 mm) y la depresión tropical 19-E (2018, 170 mm).

Se aplicaron los métodos de transformación lluvia-escurrentía SCS-CN (P-SCS) e hidrograma de Snyder (P-SND) para la modelación hidrológica en la cuenca del Río Culiacán. Los resultados reportaron variaciones anuales en los hidrogramas diarios desde el 1 de enero de 1980 hasta el 31 de enero de 2018. Esto coincide con la presencia de una única estación lluviosa anual en la zona de estudio, entre los meses de junio y octubre. Los caudales máximos anuales oscilaron entre 500 y 1250 m³s⁻¹ en el punto de aforo, donde convergen los caudales de los ríos Tamazula y Humaya. Las mayores precipitaciones ocurrieron durante el huracán Manuel, que afectó al estado de Sinaloa en septiembre de 2013. Sin embargo, la ausencia de datos de la estación de aforo, así como altura de inundación e imágenes de radar de ese evento meteorológico impide la comparación con los resultados del modelo. Por

lo tanto, se seleccionó la segunda gran tormenta ocurrida en la zona de estudio más reciente, la Depresión Tropical DT 19-E.

Simulación hidráulica 2D tradicional combinada con RoG

La **Figura 5a** muestra el modelo P-SCS en simulación hidráulica 2D tradicional combinada con RoG. Las mayores profundidades se presentaron en los ríos Tamazula y Humaya en los límites del área urbana. Los resultados de la simulación demuestran que se convierten en afluentes, con profundidades de agua que van desde un centímetro hasta más de 1.5 metros. El carácter intermitente de estos cursos de agua, a menudo inactivos salvo en caso de fuertes lluvias, hace que se subestime su capacidad erosiva, lo que ocasiona diversos problemas a la población.

La **figura 5b** muestra modelo P-SND en simulación hidráulica 2D tradicional combinada con RoG. La inundación de las calles osciló entre 1 y 30 centímetros, alcanzando más de 1.5 metros en avenidas y superando los 3 metros en canales y desagües. Los ríos Tamazula y Humaya alcanzaron profundidades máximas superiores a 10.4 metros, correspondientes a las profundidades máximas de los cauces.

En contraste, la **figura 5c** y **5d** refleja el modelo hidro-lógico-hidráulico 2D tradicional a partir de los métodos de transformación de SCS y Snyder respectivamente. En ambos escenarios se observa cómo la extensión de inundación se limita sobre los cauces de los ríos Humaya, Tamazula y Culiacán. Sin embargo, la simulación hidráulica a partir del hidrograma de Snyder muestra mayor área de desbordamientos al sur de la ciudad sobre el río Culiacán en comparación con el escenario de inundación con el hidrograma de SCS. Las profundidades de inundación sobre los afluentes principales los presentan alturas similares que nuestra propuesta combinada para cada hidrograma modelado (SCS y Snyder).

El escenario de inundación simulado exclusivamente con lluvia en red RoG (**figura 5e**) presenta una extensión de inundación sobre toda la malla de simulación, es decir, sobre la zona urbana. Sin embargo, las profundidades sobre los cauces principales fueron significativamente menores (0.40 a 0.80 m sobre los cauces principales) en comparación con la simulación hidráulica 2D tradicional.

Validación del modelo hidrológico

La **Tabla 1** muestra las métricas de validación de los hidrogramas sintéticos de los modelos HMS. Para el modelo P-SCS, los resultados fueron 0.927 para R^2 , 0.678 para NSE, 2.1 para RMSE y 12.06 para PBIAS. En cambio, el modelo P-SND mostró una precisión de simulación redu-

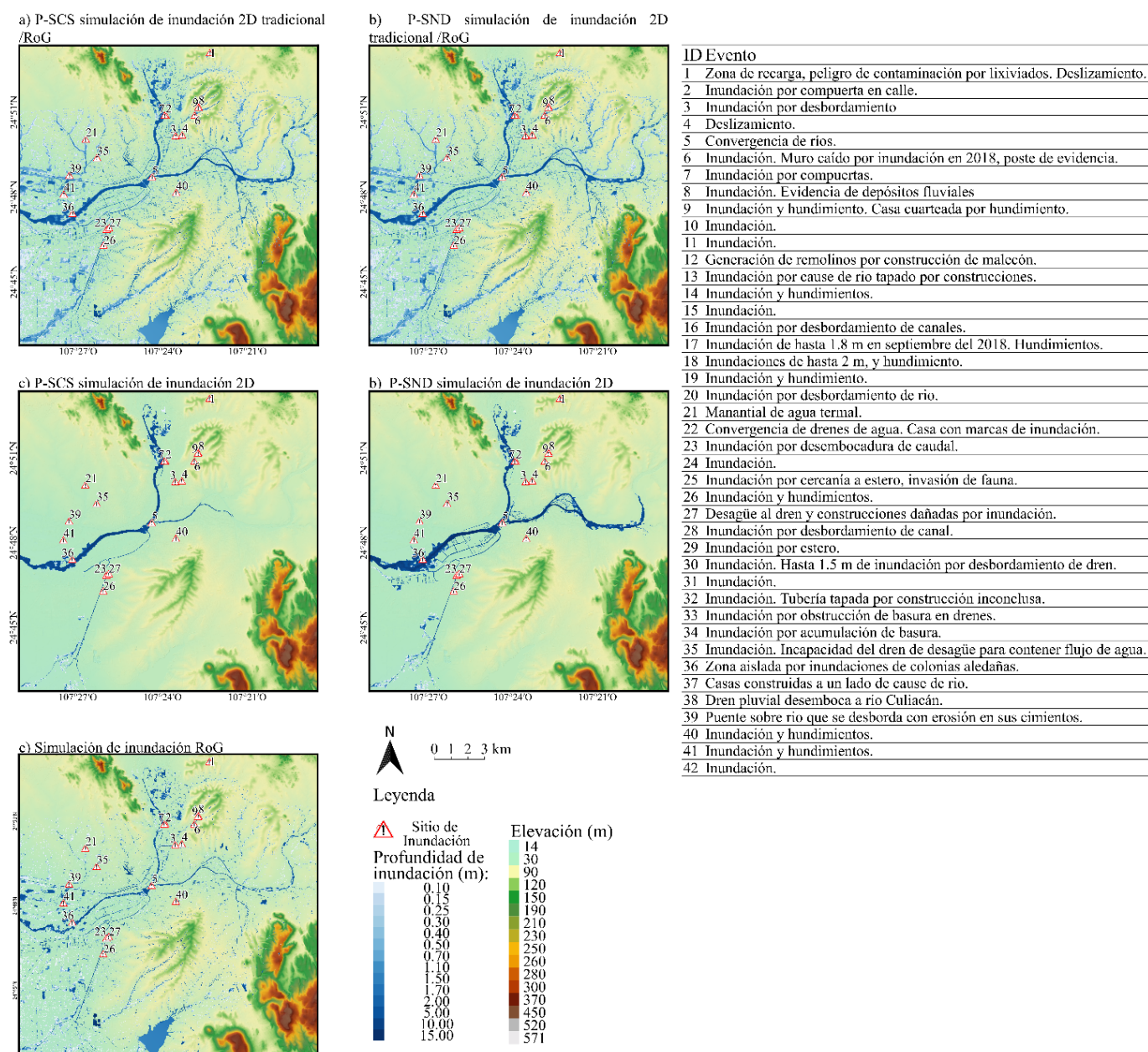


Figura 5. Simulaciones hidráulicas tradicional combinada con RoG en HEC- RAS; **a)** con hidrograma del modelo hidrológico P-SCS; **b)** con hidrograma del modelo hidrológico P-SND.

cida, con valores de 0.865 para R^2 , 0.75 para NSE, 2.3 para RMSE y 23.84 para PBIAS.

La comparación de los indicadores de bondad de ajuste muestra que P-SCS tiene un mejor ajuste sobre P-SND. Sin embargo, el modelo P-SND muestra una mejor eficiencia NSE. Esta situación es importante, debido a que NSE es el indicador de eficiencia en modelos hidrológicos de varios estudios (Gomes Calixto *et al.*, 2020; Janabi *et al.*, 2021; Kachholz y Tränckner, 2021; Fadhliani *et al.*, 2021; Burnama *et al.*, 2023). Adicionalmente, aunque el modelo P-SCS muestra un mejor ajuste, el PBIAS indica una tendencia a sobreestimar la inundación. Los resultados

coinciden con los valores presentados en otros estudios (Loi *et al.*, 2019; Kastridis *et al.*, 2020; Dhanapala *et al.*, 2022).

La precisión de las simulaciones hidráulicas de inundaciones (P-SCS y P-SND) se evaluó con $F^{(2)}$ (Tabla 2), donde en ambos modelos propuestos mostraron resultados similares ($F^{(2)} = 0.7101$ y 0.7108 , respectivamente), lo que indica diferencias insignificantes en la extensión prevista de las inundaciones.

Los escenarios generados con la simulación hidráulica 2D tradicional o usando sólo RoG, mostraron valores de $F^{(2)}$ menores que los obtenidos con nuestra propuesta. Esto

Tabla 1. Indicadores de ajuste para evaluar el rendimiento de los modelos.

Model	NSE	PBIAS	R2	RMSE Syd DEV	F(2)
P-SCS	0.678	12.06%	0.927	2.1	0.7101
P-SND	0.745	23.84%	0.865	2.3	0.7108

Tabla 2. Indicador F(2) de evaluación de la extensión de inundación simulado

MODELO COMBINADO		F(2)
a)	P-SCS Simulación de inundación 2D Tradicional / RoG	0.7101
b)	P-SND Simulación de inundación 2D Tradicional / RoG	0.7108
c)	P-SCS Simulación de inundación 2D Tradicional	0.7020
d)	P-SND Simulación de inundación 2D Tradicional	0.7021
e)	Simulación de inundación RoG	0.601

confirma que los modelos hidrológico-hidráulicos que combinan la simulación hidráulica tradicional con RoG ofrecen un mejor desempeño.

Discusión

Este estudio desarrolló y validó con éxito un marco de modelización integrado para simular una inundación compleja en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, a través de un enfoque que combina hidrogramas aguas arriba con una simulación RoG, la cual mostró con precisión las amenazas duales de inundaciones fluviales y pluviales. Los resultados demuestran que si bien los métodos hidrológicos P-SCS y P-SND producen hidrogramas similares, sus impactos hidráulicos difieren dentro del sistema fluvial.

La capacidad del modelo se confirmó a través del NSE en el cual, el modelo Snyder reportó ser el de mejor ajuste, no obstante, en PBIAS, R^2 y RMSE el hidrograma de SCS-CN presentó un desempeño aceptable con menor error y sesgo, por lo que mejor se ajusta para la cuenca del río Culiacán. La simulación hidráulica final mostró una gran precisión espacial, con una puntuación $F^{(2)}$ de aproximadamente 0,71. Esto confirma la capacidad del modelo para representar el riesgo de inundación de manera físicamente más realista para captar la doble amenaza de las inundaciones fluviales y pluviales. Comprobando su eficiencia con las metodologías tradicionales, es decir, simulación hidráulica 2D y RoG por separado.

La importancia de este método de modelización radica en su capacidad para simular la interacción dinámica entre

los diferentes factores que provocan las inundaciones en un único paso computacional. Este enfoque representa las vías urbanas y los arroyos intermitentes que recogen la escorrentía local y la transportan a los canales fluviales principales, que crecen por los caudales provenientes aguas arriba que la simulación hidráulica 2D tradicional no es posible obtenerse. Esta modelización podría utilizarse para identificar las zonas de alto riesgo en las que interactúan las aguas fluviales y pluviales.

Una de las principales debilidades del presente estudio es la calibración y validación del modelo hidrológico e hidráulico con el periodo temporal relativamente corto, condicionado por la disponibilidad de registros de aforo del río Culiacán, los cuales limitan al intervalo de 1980 a 1988. Esta restricción impidió la validación del modelo en un periodo más extenso y representativo de la variabilidad hidrológica de la cuenca, lo que podría influir en la robustez de los parámetros calibrados. No obstante, el periodo analizado corresponde a datos confiables y permitió una calibración consistente con la información pluviométrica disponible para el área de estudio.

En cuanto a la simulación hidráulica, al no tener disponible imagen de satélite Landsat o Sentinel en el día exacto de la inundación para crear la máscara de agua por el índice de agua normalizado (NDWI) o por las imágenes de radar, por tanto, se emplearon herramientas alternas como evaluar por medio de humedad topografía y comprobación fotográfica.

Conclusiones

Este estudio desarrolló, aplicó y validó un marco de modelización para caracterizar la compleja dinámica de inundaciones de la cuenca urbana de Culiacán, México. La investigación demuestra que, para las ciudades con intrincadas interacciones entre los principales ríos y densas redes de drenaje urbano, un enfoque combinado de simulación hidráulica 2D tradicional con RoG es beneficioso, al combinar los hidrogramas aguas arriba con la simulación RoG dentro de un sólo paso computacional en HEC-RAS, este trabajo proporciona una representación físicamente más realista de escenarios de inundación.

El modelo SCS mostró un mejor ajuste según PBIAS, RMSE y R^2 , a pesar de que hidrograma de Snyder presentó valor superior de NSE. La combinación de la modelización hidrológica e hidráulica tradicional con la simulación 2D-SWE en HEC-RAS 2D permitió visualizar la extensión de las inundaciones en calles y carreteras. El modelo también representó el caudal de los ríos y las inundaciones en las zonas de llanura, destacando áreas donde la orografía

irregular impide la formación de llanuras aluviales, dando lugar a una red de arroyos intermitentes que se activan con las lluvias.

Se identificaron zonas de alto riesgo, incluyendo ríos, canales, drenajes y diques, así como cruces y puentes. Tanto la profundidad como la velocidad del agua representaron un grave peligro para personas y bienes, ya que el agua puede arrastrar vehículos y personas. La red de arroyos intermitentes constituye un riesgo significativo debido a la falta de control, lo cual suele provocar inundaciones inesperadas y peligrosas durante las lluvias.

En trabajos futuros se propone emplear la combinación de datos pluviométricos y conjunto de datos de precipitación en rejilla como CHIPS para la modelación hidrológica y simulación de inundaciones, así como evaluar su desempeño en un enfoque por periodos de retorno.

Agradecimientos

Los autores extienden un agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo a través del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), así como a la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Referencias

Abdessamed D, Abderrazak B (2019). Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in rainfall-runoff modeling and evaluating floodplain inundation maps in arid environments: case study of Ain Sefra city, Ksour Mountain, SW of Algeria. *Environmental Earth Sciences* 78(19). doi:10.1007/s12665-019-8604-6

Adeogun AG, Daramola MO, Pathirana A (2015). Coupled 1D-2D hydrodynamic inundation model for sewer overflow: Influence of modeling parameters. *Water Science* 29(2):146–155. doi:10.1016/j.wsj.2015.12.001

Avila-Aceves E, Monjardin-Armenta SA, Plata-Rocha W, Zambrano-Medina YG (2023). A comparative assessment and geospatial simulation of three hydrological models in urban basins. *Open Geosciences* 15(1):1–14. doi:10.1515/geo-2022-0557

Barbero G, Costabile P, Costanzo C, Ferraro D, Petaccia G (2022). 2D hydrodynamic approach supporting evaluations of hydrological response in small watersheds: Implications for lag time estimation. *Journal of Hydrology* 610:127870. doi:10.1016/j.jhydrol.2022.127870

Burnama NS, Rohmat FIW, Farid M, Kuntoro AA, Kardhana H, Rohmat FIW, Wijayasari W (2023). The Utilization of Satellite Data and Machine Learning for Predicting the Inundation Height in the Majalaya Watershed. *Water* 15(17). doi:10.3390/w15173026

Chávez-Martínez O, Monjardin-Armenta SA, Rangel-Peraza JG, San-

house-García AJ, Dathan Z, Felix M (2024). Use of different vegetation indices for the evaluation of the kinetics of the cherry tomato (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) growth based on multispectral images by UAV. *Open Agriculture* 9:1–14. doi:10.1515/opag-2022-0357

Corapci F, Ozdemir H (2024). A new approach to flood susceptibility analysis of urbanised alluvial fans: the case of Bursa City (Türkiye). *Natural Hazards* 120:12909–12932. doi:10.1007/s11069-024-06723-w

Costabile P, Costanzo C (2021). A 2D-SWEs framework for efficient catchment-scale simulations: Hydrodynamic scaling properties of river networks and implications for non-uniform grids generation. *Journal of Hydrology* 599. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126306

Dhanapala L, Gunarathna MHJP, Kumari MKN, Ranagalage M, Sakai K, Meegastenna TJ (2022). Towards Coupling of 1D and 2D Models for Flood Simulation—A Case Study of Nilwala River Basin, Sri Lanka. *Hydrology* 9(2). doi:10.3390/hydrology9020017

Ennouini W, Fenocchi A, Petaccia G, Persi E, Sibilla S (2024). A complete methodology to assess hydraulic risk in small ungauged catchments based on HEC-RAS 2D Rain-On-Grid simulations. *Natural Hazards* 120(8):7381–7409. doi:10.1007/s11069-024-06515-2

Fadhliani, Zulkafli Z, Yusuf B, Nurhidayu S (2021). Assessment of streamflow simulation for a tropical forested catchment using dynamic topmodel—dynamic fluxes and connectivity for predictions of hydrology (Decipher) framework and generalized likelihood uncertainty estimation (glue). *Water (Switzerland)* 13(3):1-16. doi:10.3390/w13030317

Finaud-Guyot P, Delenne C, Guinot V, Llovel C (2011). 1D-2D coupling for river flow modeling. *Comptes Rendus - Mécanique* 339(4):226–234. doi:10.1016/j.crme.2011.02.001

Ghimire S (2013). Application of a 2D hydrodynamic model for assessing flood risk from extreme storm events. *Climate* 1(3):148–162. doi:10.3390/cli1030148

Gomes Calixto K, Wendland EC, Melo DDC (2020). Hydrologic performance assessment of regulated and alternative strategies for flood mitigation: a case study in São Paulo, Brazil. *Urban Water Journal* 17(5):481–489. doi:10.1080/1573062X.2020.1773509

Hamouda MA, Awadallah AG, Abdel-Maguid RH (2024). Extension of the Geomorphic Flood Index classifier to predict flood inundation maps for uncalibrated rainfall depths in arid regions. *Natural Hazards* 120(5):4633–4655. doi:10.1007/s11069-023-06393-0

Hu A, Demir I (2021). Real-Time Flood Mapping on Client-Side Web Systems Using HAND Model. *Hydrology* 8(65). doi:10.3390/hydrology8020065

INEGI (2019). *Informe técnico de la cuenca hidrológica Río Culiacán: humedales*. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825190934.pdf

Jamali B, Haghighat E, Ignjatovic A, Leitão JP, Deletic A (2021). Machine learning for accelerating 2D flood models: Potential and challenges. *Hydrological Processes* 35(4). doi:10.1002/hyp.14064

- Janabi FA, Ongdas N, Bernhofer C, Reyes Silva JD, Benisch J, Krebs P (2021). Assessment of topkapi-x applicability for flood events simulation in two small catchments in saxony. *Hydrology* 8(3). doi:10.3390/hydrology8030109
- Kachholz F, Tränckner J (2021). A model-based tool for assessing the impact of land use change scenarios on flood risk in small-scale river systems—part 1: Pre-processing of scenario based flood characteristics for the current state of land use. *Hydrology* 8(3). doi:10.3390/hydrology8030102
- Karim IR, Hassan ZF, Abdullah HH, Alwan IA (2021). 2d-hec-ras modeling of flood wave propagation in a semi-arid area due to dam overtopping failure. *Civil Engineering Journal (Iran)* 7(9):1501–1514. doi:10.28991/cej-2021-03091739
- Kastridis A, Kirkenidis C, Sapountzis M (2020). An integrated approach of flash flood analysis in ungauged Mediterranean watersheds using post-flood surveys and unmanned aerial vehicles. *Hydrological Processes* 34(25):4920–4939. doi:10.1002/hyp.13913
- Ku CA (2021). Simulating future land use exposure to extreme floods in metropolitan areas based on an integrated framework. *Urban Climate* 35:100738. doi:10.1016/j.uclim.2020.100738
- Laouacheria F, Mansouri R (2015). Comparison of WBNM and HEC-HMS for Runoff Hydrograph Prediction in a Small Urban Catchment. *Water Resources Management* 29(8):2485–2501. doi:10.1007/s11269-015-0953-7
- Liu Z, Pontius RG (2021). The total operating characteristic from stratified random sampling with an application to flood mapping. *Remote Sensing* 13(19). doi:10.3390/rs13193922
- Loi NK, Liem ND, Tu LH, Hong NT, Truong CD, Tram VNQ, Nhat TT, Anh TN, Jeong J (2019). Automated procedure of real-time flood forecasting in vu gia – thu bon river basin, vietnam by integrating swat and hec-ras models. *Journal of Water and Climate Change* 10(3):535–545. doi:10.2166/wcc.2018.015
- Milašinović M, Prodanović D, Zindović B, Rosić N, Milivojević N (2020). Control theory-based update of water levels in 1D hydrodynamic models. In Uijttewaall W, Franca MJ, Valero D, Chavarrias V, Ylla Arbós C, Schielen R, Crosato A (Eds.), *River Flow 2020 - Proceedings of the 10th Conference on Fluvial Hydraulics* (pp. 1122–1129). CRC Press/Balkema. doi:10.1201/b22619-157
- Moriassi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885–900.
- Mustafa A, Szydłowski M, Veysipanah M, Hameed HM (2023). GIS-based hydrodynamic modeling for urban flood mitigation in fast-growing regions: a case study of Erbil, Kurdistan Region of Iraq. *Scientific Reports* 13(1):1-18. doi:10.1038/s41598-023-36138-9
- Noh SJ, Lee JH, Lee S, Kawaike K, Seo DJ (2018). Hyper-resolution 1D-2D urban flood modelling using LiDAR data and hybrid parallelization. *Environmental Modelling and Software* 103:131–145. doi:10.1016/j.envsoft.2018.02.008
- Oubennaceur K, Chokmani K, Nastev M, Gauthier Y, Poulin J, Tanguy M, Raymond S, Lhissou R (2019). New sensitivity indices of a 2D flood inundation model using gauss quadrature sampling. *Geosciences (Switzerland)* 9(5). doi:10.3390/geosciences9050220
- Pandey BR, Knoblauch H, Zenz G (2024). Potential Dam Breach Flood Assessment with the 2D Diffusion and Full Dynamic Wave Equations Using a Hydrologic Engineering Center-River Analysis System. *Water* 16(2). doi:10.3390/w16020277
- Pathan AI, Agnihotri PG, Kalyan D, Frozan D, Salihi M, Zareer SA, Patel DP, Arshad M, Joseph S (2022). 1D HEC-RAS Modeling Using DEM Extracted River Geometry - A Case of Purna River; Navsari City; Gujarat, India. *Lecture Notes in Networks and Systems* 371:479–487. doi:10.1007/978-3-030-93247-3_47
- Plata-Rocha W, Avila-Aceves E, Monjardin-Armenta SA, Pérez-Aguilar LY, Rangel-Peraza JG, Zambrano-Medina YG (2025). Urban flood modeling using hydrograph and Rain-on-Grid approaches with HEC-HMS and HEC-RAS: A case study of the Culiacán River. *Journal of South American Earth Sciences* 165:105694. doi:10.1016/j.jsames.2025.105694
- Podest E, McCartney S (2019). *National Aeronautics and Space Administration SAR for Flood Mapping using Google Earth Engine* (Issue August, p. 52).
- Prawirakusuma A, Darsono SLW, Kuntoro AA (2022). Modeling of Flood Propagation in the Lower Citarum River Using a Coupled 1D-2D HEC-RAS Model. In: Lie HA, Sutrisna M, Prasetyo J, Hadikusumo BHW, Putranto LS (eds) *Proceedings of the Second International Conference of Construction, Infrastructure, and Materials, Singapore, 2022// 2022*. Springer Nature Singapore, pp 77–83. doi:10.1007/978-981-16-7949-0_7
- Ratia H, Murillo J, García-Navarro P (2014). Numerical modelling of bridges in 2D shallow water flow simulations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 75(4):250–272. doi:10.1002/fld.3892
- Sanhouse-García AJ, Rangel-Peraza JG, Rentería-Guevara SA, Bustos-Terrones YA, Mora-Félix ZD, Plata-Rocha W, Monjardin-Armenta SA (2021). Flood-Prone Area Delineation in Urban Subbasins Based on Stream Ordering: Culiacan Urban Basin as a Study Case. *Sustainability* 13:22. doi:10.3390/su132413513
- Tanouchi H, Olsson J, Lindström G, Kawamura A, Amaguchi H (2019). Improving urban runoff in multi-basin hydrological simulation by the HYPE model using EEA urban atlas: A case study in the Sege River basin. Sweden. *Hydrology* 6(1). doi:10.3390/hydrology6010028