

Comparación de los modelos hecras 1D y 2D para la simulación de ríos urbanos



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 20/ Edición N.40
Julio - diciembre de 2023
Reia4005 pp. 1-14

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Ríos, J. D.
Comparación de los modelos hecras 1D y 2D para la simulación de ríos urbanos
Revista EIA, 20(40), Reia4005.
pp. 1-14.
<https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1661>

✉ Autor de correspondencia:

Ríos, J. D.(Juan Daniel).
Docente
Ingeniero civil y magister en ingeniería recursos hidráulicos
Universidad Cooperativa de Colombia
Sede Medellín
Correo electrónico:
juan.riosar@campusucc.edu.co

Recibido: 02-12-2022
Aceptado: 15-05-2023
Disponible online: 01-06-2023

✉ JUAN DANIEL RÍOS¹

1. Universidad Cooperativa de Colombia Sede Medellín

Resumen

En este trabajo de investigación se realiza un análisis comparativo entre los resultados de velocidad de flujo y profundidad del agua obtenidos mediante la implementación de dos conocidos software de uso libre, el HEC-RAS 4.1 versión unidimensional y el HEC-RAS 6.0 versión bidimensional. La simulación hidráulica se realizó en un tramo recto y de geometría trapecial uniforme del canal del río Medellín donde se contaba con topobatimetría y caudales de diseño. Los resultados preliminares obtenidos con el modelo HEC-RAS 6.0 versión bidimensional sugieren que para tramos rectos y uniformes los resultados de la simulación son bastantes similares a los obtenidos con el HEC-RAS 4.1 versión unidimensional.

Se concluye que la elaboración de ambos tipos de modelos exige un grado de experiencia importante, sin embargo, el modelo unidimensional arroja valores de las variables hidráulicas sin un grado de esfuerzo y coste computacional tan alto, sin embargo, es evidente que para efectos de manchas de inundación y definición de profundidades es más conveniente el uso del modelo bidimensional pues permite obtener profundidades mayores.

Palabras clave: HEC-RAS 1D y 2D, Ríos urbanos, Simulación hidráulica.

Comparison of 1D and 2D hecras models for the simulation of urban rivers

Abstract

In this research work, a comparative analysis is carried out between the results of flow velocity and water depth obtained through the implementation of two well-known free-use software, the HEC-RAS 4.1 one-dimensional version and the HEC-RAS 6.0 two-dimensional version. The hydraulic simulation was carried out in a straight section with a uniform trapezoidal geometry of the Medellín river channel where topo-bathymetry and design flows were available. The preliminary results obtained with the HEC-RAS 6.0 two-dimensional version suggest that for straight and uniform sections the simulation results are quite similar to those obtained with the HEC-RAS 4.1 one-dimensional version.

It is concluded that the elaboration of both types of models requires a significant degree of experience, however, the one-dimensional model yields values of the hydraulic variables without such a high degree of effort and computational cost, however, it is evident that for the effects of stains of flooding and definition of depths, the use of the two-dimensional model is more convenient since it allows obtaining greater depths.

Keywords: HEC-RAS 1D and 2D, Urban rivers, Hydraulic simulation.

1. Introducción

El desarrollo urbano y la necesidad de espacio para infraestructura ha confinado muchos ríos y limitado su posibilidad de divagación, entre ellos el río Medellín, razón por la cual el único grado de libertad disponible para este es la vertical, generado así procesos de erosión y socavación que resultan a largo plazo en modificaciones de la pendiente longitudinal del canal (Mosselman, 2020). Dicha situación ha generado la necesidad de evaluar el comportamiento hidráulico del canal y de obras de mitigación para diferentes escenarios hidrológicos (Universidad Nacional, 2013).

En Colombia, los análisis hidráulicos son realizados típicamente empleando modelos unidimensionales como el HEC-RAS 4.1 (Brunner, 2010), el cual es apropiado para canales con geometrías regulares y homogéneas donde la variación transversal de las variables hidráulicas puede considerarse despreciable, sin embargo, la necesidad de mejorar el entendimiento de la dinámica del flujo alrededor de estructuras (Farias et al., 2020; Le et al., 2018), el mapeo de zonas de inundación (Dasallas et al., 2019; Huțanu et al.,

2020; Ghimire et al., 2022; Malik y Pal, 2021; Moya Quiroga et al., 2016; Namara et al., 2022; Rangari, et al., 2019; Shustikova et al., 2019; Tamiru y Dinka, 2021) y la creciente capacidad y velocidad de los equipos de cómputo, han impulsado la migración hacia modelos bidimensionales como el HEC-RAS 6.0 (Brunner, 2020), el IBER (Bladé et al., 2014), el OPEN TELEMAC (Hervouet, 2007), el DELFT3D (Deltares, 2022) o el MIKE 21 (DHI, 2023).

Además, la posibilidad de acoplar a los modelos hidrodinámicos computacionales módulos robustos de transporte de sedimentos y evolución morfodinámica (Gibson et al., 2017; Villaret et al., 2013), ha permitido comprender mejor el efecto de las intervenciones humanas sobre los sistemas fluviales, sin embargo, pocos trabajos han analizado y comparado los resultados de los modelos 1D y 2D usados para fines de diseño de obras, es más común observar trabajos relacionados a la evaluación de puentes (Ardiclioglu et al., 2022; Espinoza Vigil y Booker, 2023; Mehta y Yadav, 2020).

En el presente estudio se comparan los resultados obtenidos con las distintas versiones del modelo hidráulico HEC-RAS, el HEC-RAS 4.1 versión unidimensional y el HEC-RAS 6.0 versión bidimensional con el fin de identificar las ventajas y desventajas que presentan estos para la modelación hidráulica y diseño de obras en corrientes urbanas altamente antropizadas y desnaturalizadas.

2. Zona de Estudio

El valle de Aburrá donde se localiza la ciudad de Medellín es un valle interandino localizado al noroccidente de Colombia (Figura 1 y Figura 2) con elevaciones entre 1300 y 2800 m s. n. m., el cual hoy en día se encuentra densamente habitado (con cerca de 4 millones de habitantes) y donde las laderas son objeto de constante desarrollo debido a la necesidad de unidades habitacionales. El valle se caracteriza por una ladera oriental de mayor pendiente que la ladera occidental y los drenajes en ambas laderas tributan sus aguas y sedimentos al denominado río Aburrá – Medellín.

El tramo específico de análisis se encuentra en el norte del valle de Aburrá en vecindad de la estación Acevedo del Metro (Figura 1 y Figura 2), tiene una longitud aproximada de 400 m y una pendiente promedio del 0.7 %.

Figura 1. Localización del tramo de estudio en el río Medellín.

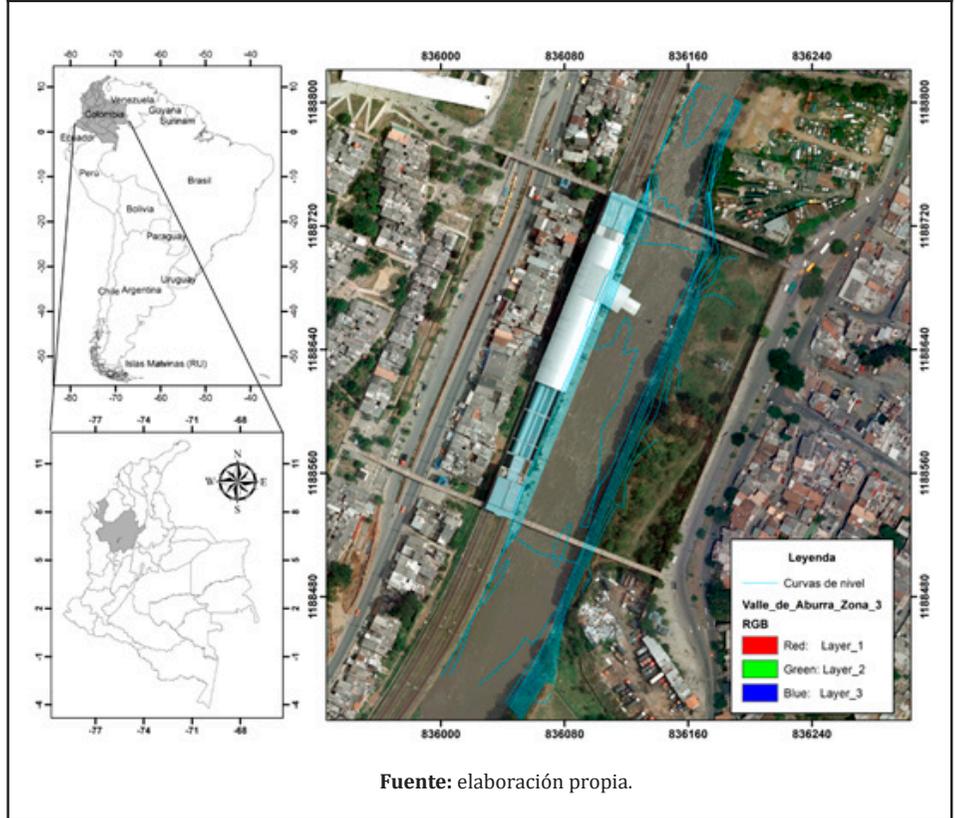


Figura 2. Aspecto del tramo de estudio en el río Medellín.



3. Metodología y Datos

3.1. Modelos hidráulicos

El modelo HEC-RAS (River Analysis System), desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros Militares de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center - HEC) permite al usuario realizar cálculos de variables hidráulicas como niveles (H), velocidades (V), pendiente de la línea de energía (S), esfuerzos cortantes (τ), cálculos de transporte de sedimentos y simulaciones de calidad de agua.

La ecuación gobernante en el modelo unidimensional (HEC-RAS 4.1) es la ecuación de conservación de la energía, en la cual las “pérdidas” de energía por fricción se calculan empleando la ecuación de Manning, y las pérdidas locales por contracción y expansión del flujo, se calculan como una fracción del cambio en la cabeza de velocidad entre dos secciones consecutivas. Entre una sección y otra, se resuelve la ecuación de la energía (Bernoulli), para obtener las alturas del flujo:

$$z_1 + y_1 + (\alpha V_1^2)/2g = z_2 + y_2 + (\alpha V_2^2)/2g + h_e$$

Donde y son las profundidades de agua en las secciones transversales 1 y 2, z son las cotas de terreno en las secciones transversales 1 y 2, V son las velocidades promedio en las secciones transversales 1 y 2, g es la aceleración de la gravedad, α es el coeficiente de Coriolis y h_e es la pérdida de carga entre las dos secciones consecutivas 1 y 2. Por su parte, la ecuación de Manning se usa en su forma habitual:

$$Q = 1/n A R_h^{2/3} S_0^{1/2}$$

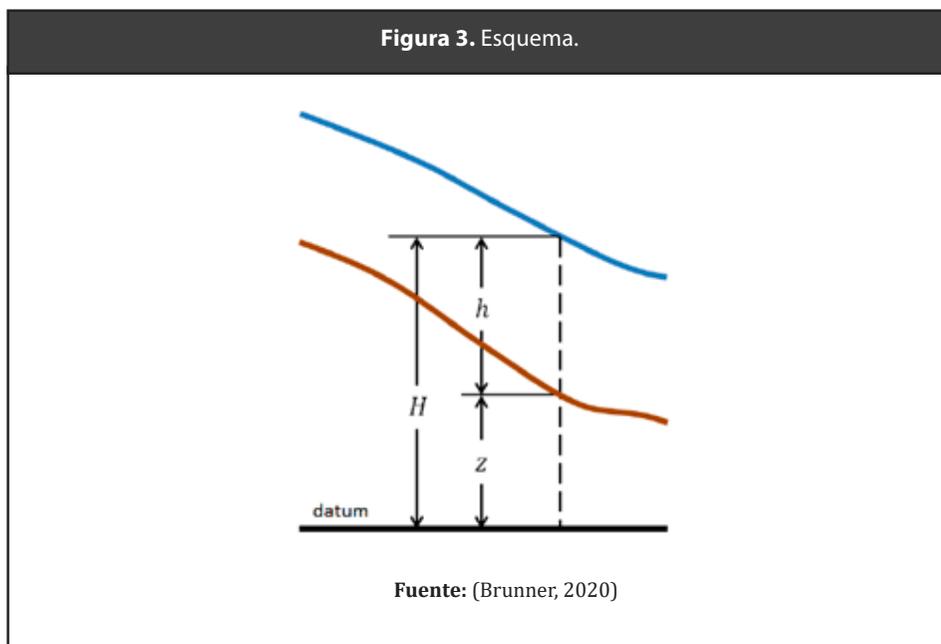
Dónde: Q es el caudal (m^3/s), A es el área mojada de la sección (m^2), R_h es el radio hidráulico de la sección (m) y S_0 es la pendiente de terreno (m/m).

Por otro lado, el modelo bidimensional (HEC-RAS 6.0), cuenta con un solucionador de flujo 2D que utiliza un algoritmo de volumen finito implícito. El algoritmo de solución implícita permite pasos de tiempo computacional más grandes que los métodos explícitos y el enfoque de volumen finito proporciona una medida de estabilidad y robustez mejoradas sobre las técnicas tradicionales de diferencias finitas y elementos finitos (Brunner et al., 2015). Las ecuaciones gobernantes en:

Conservación de masa:

$$\partial H/\partial t + \partial(hu)/\partial x + \partial(hv)/\partial y + q = 0$$

Donde u y v son las componentes de la velocidad en las direcciones x , y , respectivamente; H es la altura desde un nivel de referencia hasta la lámina de agua; h es la profundidad de la lámina de agua, medida desde el fondo del canal y q es el término fuente o sumidero (entrada o salida de agua del canal).



Conservación de momentum:

Cuando las escalas de longitud horizontal son mucho más grandes que la escala de longitud vertical, la conservación del volumen implica que la velocidad vertical es pequeña y la ecuación del momento vertical de Navier-Stokes se puede utilizar para justificar que la presión es casi hidrostática. Además, en ausencia de gradientes de presión baroclínica (densidad variable), fuertes fuerzas de viento y presión no hidrostática, es adecuada una versión promediada verticalmente de la ecuación de momentum. Los términos de velocidad vertical y derivada vertical pueden despreciarse con seguridad (tanto en ecuaciones de masa como de momento). De esta forma se obtienen las ecuaciones de aguas poco profundas:

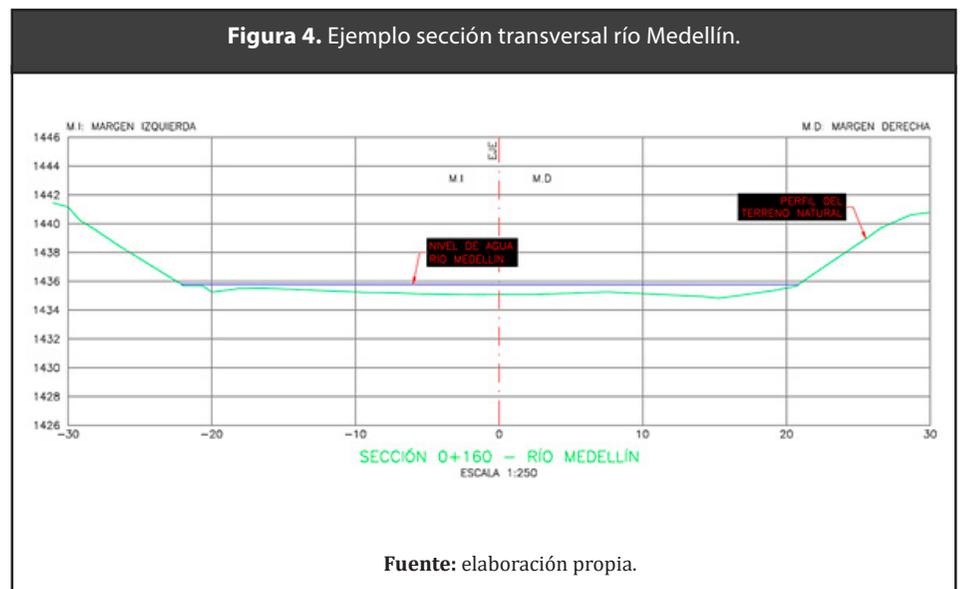
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (V_{xx} h \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} (V_{yy} h \frac{\partial u}{\partial y}) - C_f u + fv + \tau_{s,x} / \rho h$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (V_{xx} h \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} (V_{yy} h \frac{\partial v}{\partial y}) - C_f v + fu + \tau_{s,y} / \rho h$$

Donde u y v son las velocidades en las direcciones cartesianas, g es la aceleración de la gravedad, V_{xx} y V_{yy} son los coeficientes de viscosidad de remolino horizontal en las direcciones x e y , C_f es el coeficiente de fricción del fondo, τ_s es la tensión del viento en la superficie, h es la profundidad del agua, y f es el parámetro de Coriolis.

3.2. Información topo-batimétrica

Para el desarrollo del modelo unidimensional se contaba con 21 secciones transversales de topografía de detalle, en la Figura 4 se presenta una sección típica del tramo



Por otro lado, para el desarrollo del modelo bidimensional se creó un modelo digital de terreno (MDT) con una resolución espacial de 1.5 m, el cual representa adecuadamente el terreno del tramo de estudio.

3.3. Rugosidad y condiciones de borde

La rugosidad (Tabla 1) es un parámetro de entrada importante para cualquier modelo hidráulico, en esta caso tanto para el modelo unidimensional como para el bidimensional se asignaron los siguientes coeficientes de rugosidad en función del tipo de cobertura:

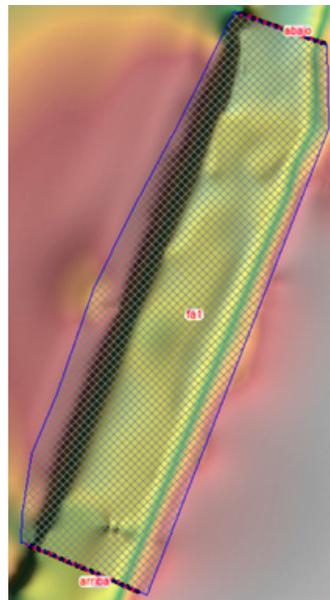
Tabla 1. Coeficientes de rugosidad.	
Sector	Valor n de Manning
Margen izquierda con placa de concreto	0,020
Canal con lecho natural en grava	0,053
Margen derecha con terreno natural	0,040

Por su parte, las condiciones de borde utilizadas corresponden a la profundidad crítica para aguas abajo y la profundidad normal asociada a la pendiente de terreno aguas arriba.

3.4. Malla computacional

La modelación en el HEC-RAS 2D opera utilizando la metodología de elementos finitos sobre una malla estructurada o no-estructurada, donde la forma de la celda puede ir desde 3 lados (triángulos) hasta máximo 8 lados (octágonos). En el presente estudio se usó una malla estructurada de forma rectangular.

Figura 6. Dominio y malla computacional.



3.5. Caudales de diseño

Los caudales empleados (Tabla 2) en el modelo unidimensional corresponden a los estimados con el método de características medias sugerido por RED RÍO - red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Medellín,

Tabla 2. Caudales de diseño

Tr (Años)	Q (m ³ /s)
1,4	151,65
2,33	191,89
5	238,00
10	275,55
25	323,01
50	358,21
100	393,15
100 mayorado por 1,4	550,41

4. Resultados

4.1. Versión unidimensional

Los resultados de la modelación unidimensional para el caudal de 100 años de periodo de retorno mayorado 40 % muestran un flujo subcrítico con profundidades variando entre 3,51 m y 4,74 m (Figura 7), con un valor medio de 4,26 m sin presentarse desborde en ninguna sección del modelo, por su parte, las velocidades variaron entre 2,71 m/s y 5,53 m/s (Tabla 2), velocidades admisibles para las placas de concreto que componen el canal trapecial del tramo de estudio. Además, no se observa la captura del efecto de la estructura de control de gradiente localizada al inicio del tramo.

Figura 7. Perfil de flujo obtenido de la simulación unidimensional.

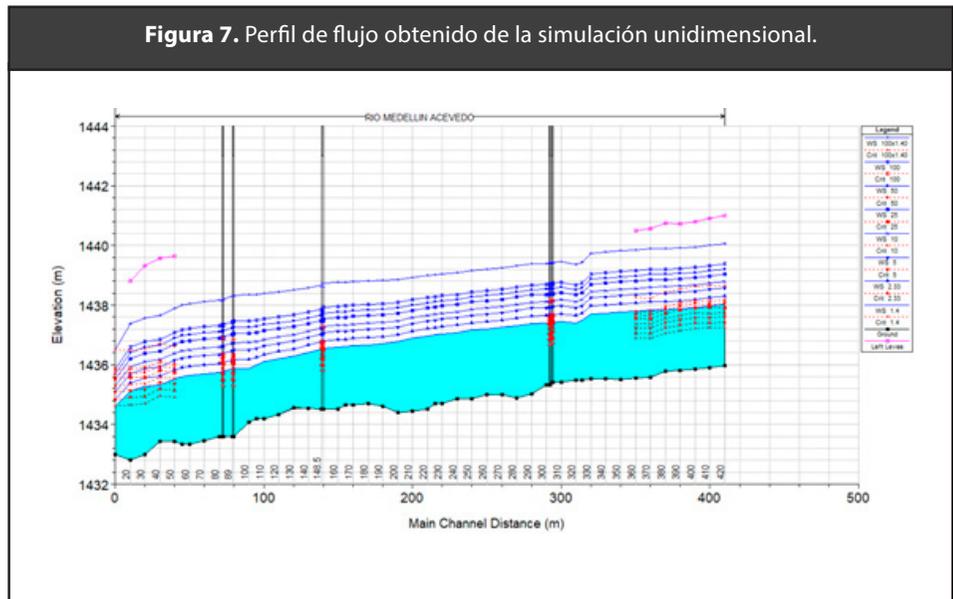


Tabla 3. Resumen variables hidráulicas de la simulación unidimensional.

	Velocidad (m/s)	Área (m ²)	Radio Hco (m)	Profundidad (m)	# Froude (adim)	Ancho (m)	Esfuerzo cortante (N/m ²)
Máximo	5,53	203,40	3,63	4,74	1,01	53,66	562,86
Medio	3,17	175,83	3,31	4,26	0,54	49,85	157,55
Mínimo	2,71	99,46	2,75	3,51	0,44	32,07	108,03

4.2. Versión bidimensional

Los resultados de la modelación bidimensional muestran profundidades mayores con un valor máximo de 5,95 m. (Figura 8 A) y velocidades más bajas con un máximo de 3,86 m/ s (Figura 8 B), también es evidente que las mayores velocidades se presentan en la orilla izquierda (Figura 8) y se captura el efecto de la obra de control de gradiente (azud) existente al inicio del tramo, siendo más evidente el aumento de velocidades en la caída (Figura 8 B)

Figura 8. Campos de profundidad (m) y velocidad (m/s) obtenidos de la simulación bidimensional.

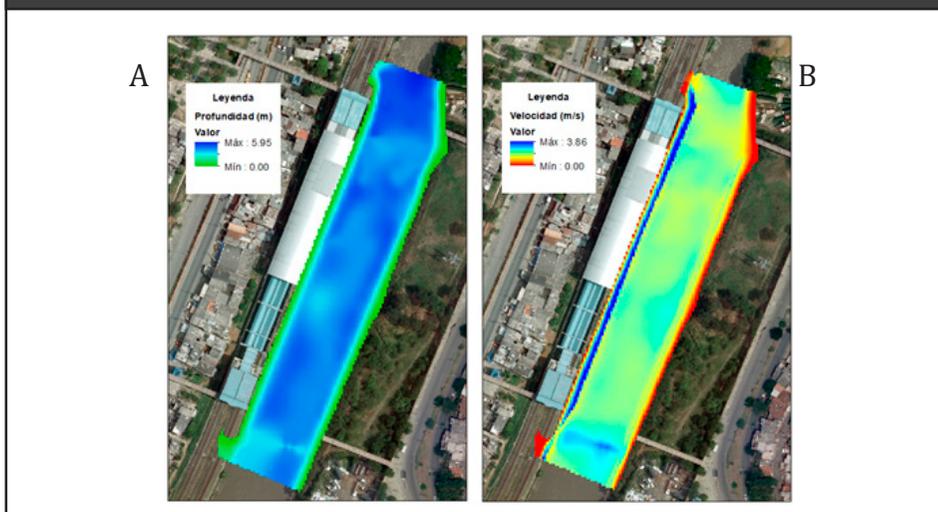
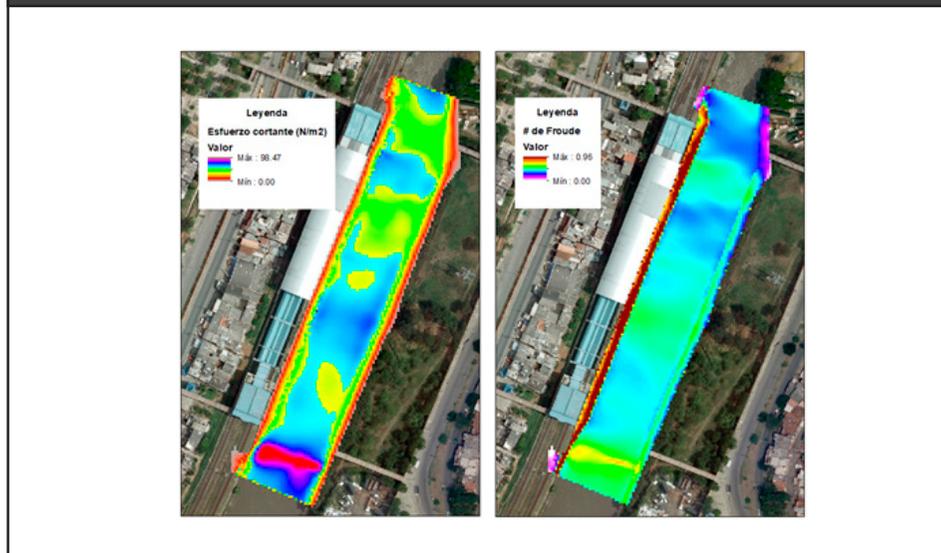


Figura 9. Campos de esfuerzo cortante (N/m²) y número de Froude (adim) obtenidos de la simulación bidimensional.



Por otro lado, se observa que el flujo presenta un comportamiento subcrítico (Figura 9) como el modelo unidimensional, sin embargo, es evidente que a la salida del tramo (Figura 8 y Figura 9, parte superior derecha) el flujo aumenta su velocidad y tiende al flujo crítico producto de la disminución del ancho de la sección.

5. Discusión

Al analizar los valores estimados de profundidad y velocidad es notable que la modelación bidimensional arroja valores mucho mayores profundidad con relación a la modelación unidimensional, sin embargo, parece ser compensado con una reducción en las velocidades, razón por la cual, con base en lo aquí identificado se recomienda el uso del modelo bidimensional para la estimación de profundidades como lo han realizado múltiples autores (Dasallas et al., 2019; Moya Quiroga et al., 2016; Namara et al., 2022; Rangari, et al., 2019), por el contrario, si se buscan son velocidades para diseño de obras se sugiere el uso del modelo unidimensional.

6. Conclusiones

Se concluye que la elaboración de ambos tipos de modelos exige un grado de experiencia importante, sin embargo, el modelo unidimensional arroja valores de las variables hidráulicas sin un grado de esfuerzo y coste computacional tan alto, sin embargo, es evidente que para efectos de manchas de inundación y definición de profundidades es más conveniente el uso del modelo bidimensional pues permite obtener profundidades mayores.

7. Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Cooperativa de Colombia sede Medellín por el tiempo y los recursos computacionales suministrados para el desarrollo de este trabajo.

8. Referencias

- Ardiclioglu, M., Hadi, A. M. W. M., Periku, E., & Kuriqi, A. (2022). Experimental and Numerical Investigation of Bridge Configuration Effect on Hydraulic Regime. *International Journal of Civil Engineering*, 20(8), 981–991. <https://doi.org/10.1007/s40999-022-00715-2>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 1–10.
- Brunner, G. W. (2010). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 4.1.*
- Brunner, G. W. (2020). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 6.0 Beta.*
- Brunner, G. W., Piper, S., Jensen, M., & Chacon, B. (2015). Combined 1D and 2D Hydraulic Modeling within HEC-RAS. *World Environmental and Water Resources Congress 2015*. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784479162.141>
- Dasallas, L., Kim, Y., & An, H. (2019). Case Study of HEC-RAS 1D–2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w11102048>
- Deltares. (2022). *Delft3D-FLOW, User Manual.*
- DHI. (2023). *MIKE 21 Flow Model FM.*
- Espinoza Vigil, A. J., & Booker, J. (2023). Hydrological Vulnerability Assessment of Riverine Bridges: The Bajo Grau Bridge Case Study. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w15050846>
- Farias, H. D., Domínguez Ruben, L., & Prieto Villarroya, y J. (2020). Análisis hidro-sedimentológico 2d del comportamiento de un campo de espigones para la protección de márgenes en un río meandriforme. *Ribagua*, 7(2), 43–55. <https://doi.org/10.1080/23863781.2021.1911609>
- Ghimire, E., Sharma, S., & Lamichhane, N. (2022). Evaluation of one-dimensional and two-dimensional HEC-RAS models to predict flood travel time and inundation area for flood warning system. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(1), 110–126. <https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1824621>

- Gibson, S., Sánchez, A., Piper, S., & Brunner, G. (2017, October 31). New One-Dimensional Sediment Features in HEC-RAS 5.0 and 5.1. *World Environmental and Water Resources Congress 2017*. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784480625.018>
- Hervouet, J. M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows, modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons.
- Huțanu, E., Mișu-Pintilie, A., Urzica, A., Paveluc, L. E., Stoleriu, C. C., & Grozavu, A. (2020). Using 1D HEC-RAS Modeling and LiDAR Data to Improve Flood Hazard Maps Accuracy: A Case Study from Jijia Floodplain (NE Romania). *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12061624>
- Le, T. B., Crosato, A., Mosselman, E., & Uijtewaal, W. S. J. (2018). On the stability of river bifurcations created by longitudinal training walls. Numerical investigation. *Advances in Water Resources*, *113*, 112–125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.01.012>
- Malik, S., & Pal, S. C. (2021). Potential flood frequency analysis and susceptibility mapping using CMIP5 of MIROC5 and HEC-RAS model: a case study of lower Dwarkeswar River, Eastern India. *SN Applied Sciences*, *3*(1), 31. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04104-z>
- Mehta, D. J., & Yadav, S. M. (2020). Analysis of scour depth in the case of parallel bridges using HEC-RAS. *Water Supply*, *20*(8), 3419–3432. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.255>
- Mosselman, E. (2020). Studies on River Training. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12113100>
- Moya Quiroga, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *Ribagua*, *3*(1), 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>
- Namara, W. G., Damisse, T. A., & Tufa, F. G. (2022). Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for Flood Inundation Mapping, the case of Awash Bello Flood Plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, *8*(2), 1449–1460. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01166-9>
- Rangari, V. A., Umamahesh, N. V., & Bhatt, C. M. (2019). Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D. *Modeling Earth Systems and Environment*, *5*(4), 1839–1851. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00641-8>
- Shustikova, I., Domeneghetti, A., Neal, J. C., Bates, P., & Castellarin, A. (2019). Comparing 2D capabilities of HEC-RAS and LISFLOOD-FP on complex topography. *Hydrological Sciences Journal*, *64*(14), 1769–1782. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1671982>
- Tamiru, H., & Dinka, M. O. (2021). Application of ANN and HEC-RAS model for flood inundation mapping in lower Baro Akobo River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *36*, 100855. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100855>
- Universidad Nacional. (2013). *Estudio de patología del canal del río Medellín entre la variante de Caldas y la desembocadura de la quebrada La García: Informe final revisado / (#000806553)*. Medellín.
- Villaret, C., Hervouet, J.-M., Kopmann, R., Merkel, U., & Davies, A. G. (2013). Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system. *Computers & Geosciences*, *53*, 105–113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.004>