

XXXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA MEDELLÍN-COLOMBIA OCTUBRE 01-04 2024

La Rugosidad de la Vegetación en Modelos Hidrodinámicos Fluviales: Análisis Comparativo del Río Piave

Verónica HERRERA GÓMEZ¹, Giovanni RAVAZZANI¹, Marco MANCINI¹

¹ Politecnico di Milano, Italia

email: lisdeyveronica.herrera@polimi.it

email: giovanni.ravazzani@polimi.it

email: marco.mancini@polimi.it

RESUMEN

Este estudio examina el desempeño de tres modelos hidrodinámicos, tanto 1D como 2D, en la simulación de niveles de agua durante eventos de inundación que impactan las llanuras aluviales y su vegetación. Se compararon dos modelos que integran ecuaciones para la rugosidad de la vegetación arbórea, como RiverFlood (in house model) y Telemac, con Hec-Ras, un modelo que determina la rugosidad global mediante procesos de calibración. El análisis se centró en la inundación del río Piave ocurrida en octubre de 2018, utilizando datos registrados en estaciones hidrométricas. Los resultados indican que, aunque RiverFlood y Telemac proporcionaron mejores estimaciones del nivel máximo de inundación, tendieron a sobreestimar los niveles durante la mayor parte del evento. Por otro lado, Hec-Ras, empleando su herramienta de calibración automática, subestimó significativamente el nivel máximo de inundación, pero logró un mejor ajuste en la curva de los niveles de agua registrados, presentando un menor error cuadrático medio (RMSE). En contraste, la calibración manual de Hec-Ras produjo resultados menos satisfactorios.

1. Introducción

Los estudios de propagación de inundaciones son fundamentales para la delimitación de zonas inundables y el desarrollo de estrategias efectivas de reducción y mitigación del riesgo. Una estimación precisa de la magnitud y la dinámica temporal de las inundaciones es crucial para anticipar desbordamientos y evaluar posibles medidas de protección en sectores clave como la población, la infraestructura y la agricultura (Moel et al. 2009).

Entre las metodologías más utilizadas en estos estudios se encuentran los modelos computacionales, que permiten simular caudales y niveles de inundación a partir de datos como la geometría del río, modelos digitales del terreno, y las características morfológicas, hidrológicas e hidráulicas de la zona de estudio. La modelización de la propagación de flujos de inundación puede abordarse principalmente mediante dos enfoques: el enrutamiento hidráulico y el hidrológico.

El enrutamiento hidráulico se basa en la solución numérica de las ecuaciones diferenciales de Saint-Venant (conservación de masa y momento), y es empleado por modelos como Hec-Ras (desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU.) y Telemac-2D (desarrollado por el Consorcio TELEMAT-MASCARET), que resuelven el sistema de ecuaciones en una o dos dimensiones. Aunque estos modelos son ampliamente reconocidos y confiables, pueden presentar problemas de inestabilidad numérica en escenarios con geometrías complejas, así como requerir una alta capacidad computacional y tiempo de cálculo.

Por otro lado, el enrutamiento hidrológico se basa en la ecuación de conservación de masa y emplea relaciones empíricas para vincular el caudal de salida de un volumen de control con el volumen almacenado en él. Un

modelo ampliamente utilizado en este enfoque es Muskingum-Cunge (Cunge, 1969). Este tipo de enrutamiento es preferido en pronósticos de inundaciones en tiempo real debido a su simplicidad, estabilidad y baja demanda computacional. Sin embargo, presenta limitaciones para abordar efectos de remanso o discontinuidades en la superficie del agua provocadas por irregularidades en la geometría del río.

En el contexto de la hidráulica fluvial, la vegetación desempeña un papel crucial, ya que está presente en los lechos de los ríos, a lo largo de sus orillas y en las llanuras aluviales. La vegetación puede incrementar la resistencia al flujo y reducir la capacidad de transporte, influyendo en los perfiles de velocidad y los niveles de agua (Yen, 2002), lo que aumentaría el riesgo de inundaciones. Las llanuras aluviales suelen albergar una variedad de vegetación, incluyendo árboles, arbustos, matorrales, plantas herbáceas, y cultivos agrícolas, lo que complica la modelización (Box et al., 2021).

La resistencia al flujo debido a la vegetación ha sido objeto de numerosos estudios teóricos y experimentales en las últimas décadas (D'Ippolito, 2021) y, en años recientes se han realizado esfuerzos significativos para integrar estos hallazgos en los modelos hidrodinámicos. Dado que la vegetación afecta considerablemente las condiciones de flujo tanto en situaciones ordinarias como durante eventos de inundación, su modelado es esencial para predecir con precisión los niveles de agua y mitigar los riesgos hidráulicos asociados.

Este estudio tiene como objetivo comparar el desempeño de los modelos hidrodinámicos RiverFlood (1D) y Telemac (2D), que integran la modelización de la rugosidad de la vegetación arbórea, con Hec-Ras, un modelo que determina la rugosidad global mediante procesos de calibración. Las simulaciones se llevaron a cabo para predecir los niveles de agua del río Piave durante un evento de inundación que impactó la vegetación de las llanuras aluviales. Además, este trabajo busca comparar y validar los resultados del modelo unidimensional RiverFlood, desarrollado internamente, con los de un modelo bidimensional más robusto, Telemac-2D.

2. Metodología

2.1. Modelos hidrodinámicos

En este estudio, se emplearon dos modelos hidrodinámicos unidimensionales (1D), Hec-Ras y RiverFlood, junto con el modelo bidimensional (2D) Telemac, para evaluar el efecto de la rugosidad de la vegetación en los niveles de agua del río durante un evento de inundación. Los niveles de agua simulados por estos modelos se compararon con mediciones obtenidas de estaciones hidrométricas en campo.

Hec-Ras (Hydrological Engineering Center - River Analysis System) es un software ampliamente utilizado en ingeniería hidráulica e hidrología, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). Este software permite modelar el flujo de agua en sistemas fluviales tanto en régimen permanente como en régimen no permanente, y puede aplicarse en modelos 1D y 2D. Hec-Ras resuelve numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales de Saint-Venant para calcular la distribución del flujo en el tiempo y en el espacio. Estas ecuaciones representan la conservación de masa (continuidad) y la conservación del momentum (movimiento), expresadas en el caso de modelos 1D como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2)$$

donde Q es el caudal [L^3T^{-1}], A es el área de la sección transversal [L^2], x es la distancia a lo largo del canal [L], t es el tiempo [T], h es la profundidad del flujo [L], g es la aceleración debida a la gravedad [LT^{-2}], S_0 es la pendiente del lecho del canal [LL^{-1}] y S_f es la pendiente de fricción [LL^{-1}].

RiverFlood es un modelo unidimensional simplificado desarrollado en Fortran 90 por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA) del Politecnico di Milano (Ravazzani et al., 2024). Este modelo está diseñado para simular el flujo de agua en ríos, resolviendo numéricamente el flujo permanente y no permanente. Su estructura combina dos métodos bien establecidos: el método Muskingum-Cunge (Cunge, 1969) y el método PAB (*Parabolic and Backwater*) (Todini and Bossi, 1986).

El método Muskingum-Cunge es una adaptación avanzada del método Muskingum original, diseñado para estimar la propagación del flujo de inundación. Esta versión mejorada incluye parámetros hidráulicos como la pendiente del canal, la celeridad de la onda de flujo y la geometría de la sección transversal, lo que permite

una estimación más precisa del comportamiento del flujo a lo largo del río. Se basa en la ecuación de continuidad y una relación entre el flujo de entrada, el flujo de salida y el almacenamiento en un tramo de canal. No obstante, una de sus principales limitaciones es su efectividad en escenarios donde las condiciones aguas abajo influyen significativamente en el flujo, ya que está diseñado principalmente para flujos influenciados por condiciones aguas arriba.

Para superar esta limitación, se ha incorporado el método PAB. Este método permite actualizar los parámetros de Muskingum-Cunge (caudal, velocidad, pendiente del lecho del río) en cada paso temporal, utilizando un perfil de flujo permanente dentro de una geometría de sección transversal arbitraria y considerando también las condiciones aguas abajo. El método PAB se basa en la aplicación sucesiva de ecuaciones parabólicas localmente linealizadas y el cálculo del perfil de remanso en estado estacionario.

La actualización de los parámetros se realiza resolviendo la ecuación de conservación de la energía (Ec. (3)) en cada paso temporal, utilizando los parámetros definidos para cada sección del río. El método PAB simplifica la ecuación de conservación del momentum mediante una aproximación parabólica, lo que permite representar el comportamiento del flujo en términos de ondas difusivas, omitiendo los términos inerciales de aceleración local y convectiva (primer y segundo términos en la Ec. (2)). Se ha demostrado que esta simplificación es suficientemente precisa en ríos de llanura donde se cumpla la condición: $\partial h / \partial s = S_0 - S_f \cong 10^{-3}$ (Cappelare, 1997).

$$z_2 + h_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = z_1 + h_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_t \quad (3)$$

donde z es la elevación del lecho [L], V es la velocidad [LT^{-1}], y h_t es la pérdida total de energía entre dos secciones. Esta pérdida de energía incluye tanto pérdidas por fricción, causadas por la rugosidad, como pérdidas locales debido a fenómenos de contracción y expansión del flujo.

RiverFlood cumple con los estándares europeos para la escritura y documentación de código Fortran 90 intercambiable y con FORD (2024), un generador automático de documentación para programas Fortran modernos. RiverFlood se distribuye bajo la licencia GNU/GPL v3.

Telemac-2D es un modelo bidimensional desarrollado por el Departamento de Investigación y Desarrollo de Electricidad de Francia (EDF) que simula el flujo en superficie libre en condiciones permanentes y no permanentes. Telemac-2D resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en dos dimensiones espaciales:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Ecuaciones de momentum:

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (6)$$

donde u, v son las velocidades [LT^{-1}] en las direcciones x y y , respectivamente; x, y , son las coordenadas espaciales horizontales; S_{0x} y S_{0y} son las pendiente del lecho [LL^{-1}] en direcciones x y y ; y S_{fx} y S_{fy} son las pendientes de fricción [LL^{-1}] en direcciones x y y .

Telemac-2D aplica métodos de elementos finitos o de volumen finito para resolver las Ecs. (4)-(6).

Rugosidad de la vegetación

La vegetación en un sistema fluvial introduce una resistencia adicional al flujo, la cual se evalúa generalmente en función del tipo de vegetación, ya sea flexible o rígida (aquella que no se flexiona con la corriente), y de las condiciones de flujo en relación con la vegetación, es decir, si la vegetación está sumergida o no (emergente). Como es sabido, en el caso de vegetación emergente, la rugosidad hidráulica aumenta con la profundidad del agua y se incrementa con una mayor densidad de vegetación.

En las últimas décadas, numerosos investigadores han propuesto diversas ecuaciones para estimar la rugosidad producida por diferentes tipos de vegetación en diversas condiciones de flujo. Una de las ecuaciones más conocidas para vegetación rígida es la propuesta por Baptist et al. (2007). Estos autores derivaron una ecuación mediante programación genética para estimar el coeficiente de Chézy de la vegetación:

$$C = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{C_b^2} + \frac{(C_D m D h_v)}{2g}}} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln\left(\frac{h}{h_v}\right) \quad (7)$$

donde C es el coeficiente de Chézy [$L^{1/2}T^{-1}$], C_b es el coeficiente de Chézy aplicado al suelo desnudo (*bare soil*) [$L^{1/2}T^{-1}$], C_D es el coeficiente de arrastre [-], m es la densidad [# plantas L^{-2}], D es el diámetro del tronco [L], h_v es la altura de la vegetación [L], κ es la constante de Von Karman ($\kappa = 0.41$) y h es la profundidad del flujo [L].

Considerando los datos disponibles, en este estudio se utilizó la ecuación propuesta por Baptist para evaluar la rugosidad producida por los árboles presentes en las llanuras aluviales durante el evento de inundación en un tramo del río.

La ecuación (7) ha sido implementada en los modelos hidrodinámicos RiverFlood y Telemac-2D. Dado que en el modelo Hec-Ras actualmente no es posible integrar una ecuación específica para la rugosidad de la vegetación, se optó por realizar una calibración manual y automática para encontrar los valores de rugosidad globales que mejor se ajusten a los niveles de agua observados en campo.

2.2. Área de estudio

El río Piave se ubica en la región del Véneto, al noreste de Italia. Nace en los Alpes orientales y fluye hasta desembocar en el mar Adriático. Con una longitud aproximada de 220 km y una cuenca hidrográfica de 4130 km², el análisis de este estudio se enfocó en el curso inferior del río, específicamente en la llanura Véneto. El tramo evaluado abarca 30 km de longitud y cubre un área de 14 km².

En este tramo del río, se encuentran tres estaciones hidrométricas, gestionadas por la Agencia Regional para la Prevención y Protección Ambiental del Véneto (ARPAV), ubicadas cerca de los municipios Ponte di Piave, San Donà di Piave y Eraclea (Fig. 1a).

El área de estudio se caracteriza por su terreno llano, con un ancho de río que varía entre 60 y 100 m, y pendientes menores al 0.1%. El lecho del río está compuesto por materiales granulares permeables, como arena y grava. La morfología del río presenta meandros en los primeros 20 km, seguido de un tramo rectilíneo en los últimos 10 km. La vegetación ribereña y de las llanuras aluviales está formada principalmente por especies arbóreas, arbustos, viñedos y cultivos (Fig. 1b - 1c).

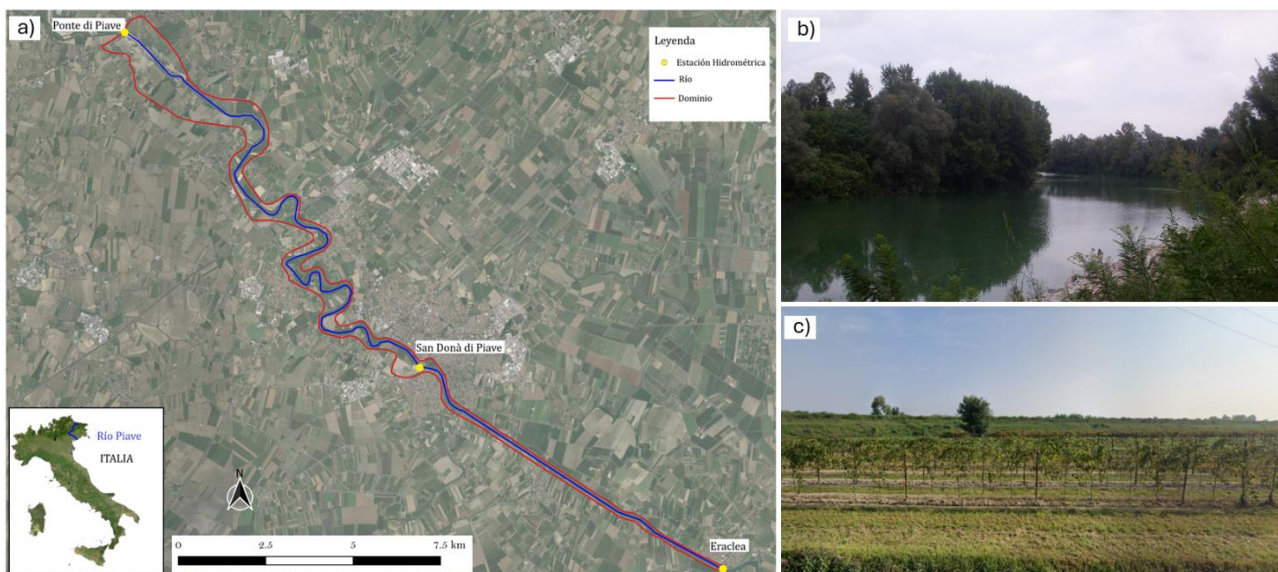


Figura. 1. a) Área de estudio del río Piave y localización de estaciones hidrométricas. b) Vegetación arbórea. c) Viñedos.

2.3. Evento de inundación

El caso de estudio se centró en la inundación del río Piave ocurrida entre el 29 y 31 de octubre de 2018, asociada al evento meteorológico conocido como la “tormenta Vaia”. Este fenómeno causó daños considerables en la región, ya que las precipitaciones extremas, junto con fuertes vientos, generaron uno de los caudales más altos registrados en la historia del río.

Durante este evento, la estación hidrométrica de Ponte di Piave registró dos picos de caudal, alcanzando valores de 1200 y 2064 m³/s, según la curva de calibración de caudales de ARPAV. La Figura 2 presenta algunas fotografías del evento.



Figura. 2. Fotografías del evento de inundación (cortesía: <https://www.vigilfuoco.tv/veneto/venezia/venezia/sorvolo-elicottero>).

2.4. Datos de entrada de los modelos hidrodinámicos

Geometría fluvial

El perfil del lecho del río y las secciones transversales fueron obtenidos mediante un levantamiento batimétrico y un modelo digital del terreno (MDT) con una resolución de 2 m x 2 m, realizado por la Autoridad del Distrito de los Alpes Orientales. Estos datos también se emplearon para construir la malla computacional del modelo bidimensional.

Vegetación

La vegetación ribereña en el área de estudio está compuesta principalmente por un mosaico de áreas forestales y agrícolas. Los parámetros relacionados con la vegetación forestal se obtuvieron de una campaña de campo realizada en 2020 y de un análisis de datos LiDAR del mismo año, llevado a cabo por el Departamento de Territorio y Sistemas Agroforestales (TESAF) de la Universidad de Padua (Herrera et al, 2023). En las parcelas estudiadas se registraron parámetros como especies de árboles, diámetro del tronco y altura del árbol, lo que permitió calcular un volumen de madera local. Estos valores se utilizaron para entrenar un algoritmo de clasificación que identifica las tipologías forestales predominantes a partir de imágenes aéreas. Además, se desarrollaron modelos lineales específicos para espacializar el diámetro promedio y la densidad de la masa forestal (número promedio de árboles por hectárea) utilizando las nubes de puntos LiDAR de alta densidad. Este procedimiento resultó en la producción de mapas ráster con un tamaño de celda de 20 m × 20 m, que contienen datos sobre la densidad y el diámetro de la vegetación. La Figura 3 muestra un ejemplo de estos mapas.

El análisis de este estudio se enfoca exclusivamente en la vegetación arbórea. Para las zonas con viñedos y cultivos, se seleccionó un valor de Manning de la literatura, equivalente a 0.035 s m^{-1/3}.

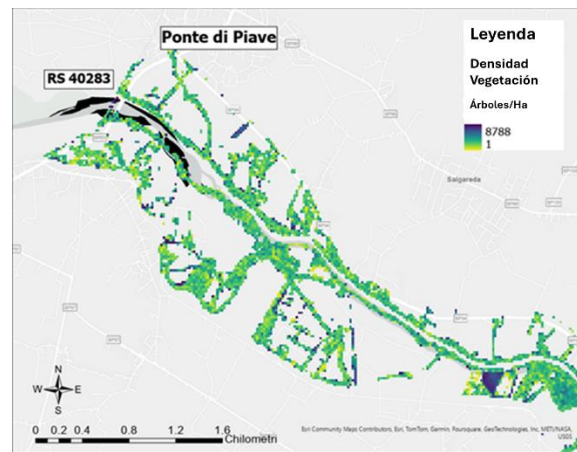


Figura. 3. Mapa ráster de la densidad arbórea.

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se definieron a partir de los datos registrados por las estaciones hidrométricas y la curva de calibración de caudal. Para la condición de aguas arriba se empleó el hidrograma de caudal de la estación Ponte di Piave (Fig. 4a). En cuanto a la condición de aguas abajo, se usaron los niveles de agua medidos en la estación Eraclea (Fig. 4b).

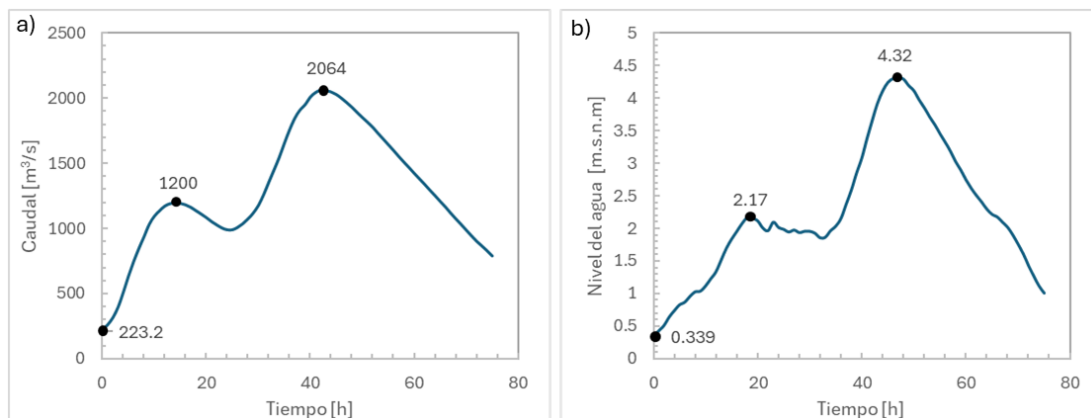


Figura. 4. Condiciones de frontera: **a)** hidrograma de la estación hidrométrica Ponte di Piave. **b)** Niveles de agua medidos en la estación hidrométrica Eraclea.

Para implementar el modelo Hec-Ras, se utilizaron el perfil longitudinal y las secciones transversales del río, junto con las condiciones de frontera del evento analizado y las rugosidades del lecho del río. Debido a que Hec-Ras no permite la integración directa de una ecuación específica para la rugosidad de la vegetación, se realizó una calibración manual y automática para determinar los valores adecuados de rugosidad que reprodujeran los niveles de agua observados en la estación hidrométrica intermedia. Es importante mencionar que, en la calibración manual con Hec-Ras, los valores de rugosidad se mantienen constantes y no varían con los niveles de agua durante el evento de inundación.

Para el modelo RiverFlood, se emplearon los archivos de geometría generados por Hec-Ras, que incluyen datos sobre las secciones transversales del río, la ubicación de las bancas, la distancia entre secciones, así como los coeficientes de rugosidad y pérdidas. RiverFlood permite seleccionar el tipo de análisis, ya sea en condiciones de flujo permanente o no permanente; en este estudio, se usó el análisis de flujo no permanente. Las condiciones de frontera se pueden configurar utilizando la profundidad normal, la profundidad crítica o una altura de agua conocida, mientras que el caudal puede introducirse como un valor constante o mediante un hidrograma; siendo este último el usado en este caso. Riverflood incluye tres ecuaciones para estimar la rugosidad de la vegetación arbórea, entre ellas la ecuación de Baptist. El programa lee parámetros como la densidad de la vegetación y los diámetros de los árboles obtenidos de los mapas ráster, como el mostrado en

la Figura 3. De este modo, la rugosidad se calcula en función de las características de la vegetación y la altura del agua, permitiendo que estos valores sean dinámicos y varíen con el nivel del agua y el tiempo.

En cuanto al modelo Telemac-2D, su implementación comenzó con la construcción de una malla computacional basada en el modelo digital del terreno (MDT). La malla generada consistió en una cuadrícula triangular no estructurada, compuesta por 106778 elementos y 54490 nodos, con una resolución de 10 m en el canal principal del río y 25 m en las llanuras aluviales. Los datos de vegetación obtenidos de los mapas ráster se clasificaron en 11 zonas distintas, lo que permitió la creación de un mapa de rugosidad zonificado con diferentes diámetros y densidades de árboles. La versión V8pr2 de Telemac-2D incorpora ocho fórmulas de la literatura para evaluar la rugosidad de la vegetación. Inicialmente, se realizó una simulación en estado permanente para definir el paso de tiempo necesario para alcanzar la estabilidad y convergencia del modelo. Posteriormente, el modelo se simuló bajo condiciones de flujo no permanente, utilizando la ecuación de Baptist. Se pueden encontrar más detalles sobre la construcción e implementación del modelo bidimensional en Herrera et al., 2024.

3. Resultados y discusión

En este estudio, los niveles de agua registrados durante el evento de inundación en la estación hidrométrica San Donà di Piave se utilizaron para validar la implementación de la ecuación de rugosidad de la vegetación en los modelos 1D y 2D, así como para calibrar las rugosidades en Hec-Ras. Se seleccionó esta estación por su distancia adecuada respecto a las condiciones de frontera, lo que la convierte en un punto ideal para la comparación y ajuste de los modelos.

Para la calibración manual, se efectuaron múltiples simulaciones en las que se ajustaron manualmente los coeficientes de rugosidad de Manning, tanto para el lecho del río (n_b) como para las llanuras (n_f), con el fin de alinear los niveles de agua simulados con los medidos. Los valores iniciales de rugosidad se obtuvieron de la literatura y se discretizaron por tramos a lo largo del río. En la simulación con mejor ajuste, los valores finales de rugosidades oscilaron entre 0.02 y 0.03 $s\ m^{-1/3}$ para n_b , y entre 0.10 y 0.40 $s\ m^{-1/3}$ para n_f .

La calibración automática empleó un proceso iterativo en el cual se ajustaron factores multiplicativos sobre los coeficientes de Manning previamente introducidos. Este proceso dividió el hidrograma en zonas de flujo según diferentes intervalos de caudal, generando un factor de rugosidad para cada zona. La calibración continuó hasta que el error máximo en relación con los niveles medidos estuviera por debajo de una tolerancia definida o hasta alcanzar un número máximo de iteraciones. Los valores finales obtenidos tras la calibración automática con mejor ajuste variaron entre 0.017 y 0.035 $s\ m^{-1/3}$ para n_b , y entre 0.03 y 0.06 $s\ m^{-1/3}$ para n_f .

Las Figuras 5a y 5b muestran las simulaciones con mejor desempeño obtenidas a partir de las calibraciones manual y automática, respectivamente. Además, las Figuras 5c y 5d ilustran los resultados de las simulaciones realizadas con los modelos RiverFlood y Telemac-2D. La Tabla 1 presenta una comparación de las diferentes simulaciones realizadas en este estudio, evaluadas a través de métricas de error.

En general, los resultados mostrados en la Figura 5 indican que, a excepción de la simulación con calibración automática, que estimó con precisión el tiempo del primer pico y de manera aceptable su nivel (con una diferencia de 0.2 m), las demás simulaciones sobreestimaron el primer pico en aproximadamente 1 m y presentaron un retardo de 2 horas. En cuanto al segundo pico, las simulaciones con Hec-Ras fueron menos precisas en comparación con los modelos RiverFlood y Telemac. En particular, las calibraciones subestimaron los niveles de agua en un 4.7% y 11%, lo que equivale a diferencias de 0.7 m y 1.7 m respecto a los valores observados, siendo la calibración automática la que mostró el mayor error. Por otro lado, el modelo Telemac presentó el menor error en la estimación del nivel de agua para el segundo pico, con una diferencia de 6 cm respecto al dato observado.

En cuanto a la correspondencia con la curva de las mediciones, la calibración automática mostró un mejor ajuste entre los niveles simulados y observados a lo largo de todo el evento, lo que se tradujo en un RMSE más bajo en comparación con las demás simulaciones. Además, esta calibración logró una mayor precisión en la predicción del tiempo de los dos picos de flujo.

Para facilitar la comparación, la Figura 6 ilustra todos los resultados en un único diagrama.

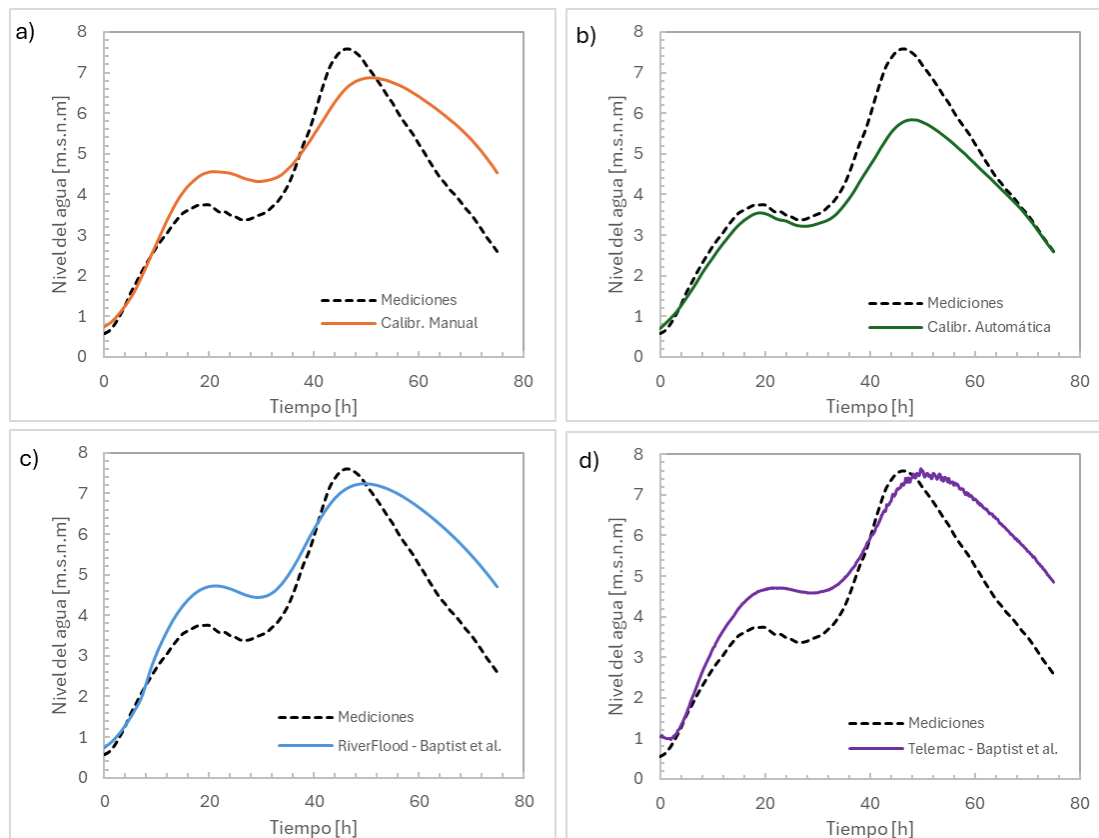


Figura. 5. Comparación entre los niveles de agua simulados y los valores observados en la estación San Donà di Piave durante el evento de inundación: **a)** Hec-Ras con calibración manual, **b)** Hec-Ras con calibración automática, **c)** RiverFlood, y **d)** Telemac-2D.

Tabla 1. Comparación de los errores para los diferentes modelos.

Simulación	Error – 1 ^{er} pico [%]	Error – 2 ^{do} pico [%]	Retardo del 1 ^{er} pico [h]	Retardo del 2 ^{do} pico [h]	RMSE [m]
Calibr. Manual	7%	-4.7%	2	4	0.98
Calibr. Automática	-1.8%	-11.4%	0	2	0.77
RiverFlood-1D – Baptist	8.5%	-2.2%	2	4	1.08
Telemac-2D – Baptist	8.4%	0.4%	2.4	3.5	1.17

Los análisis realizados revelaron que la calibración manual no logró una combinación óptima de coeficientes de rugosidad que permitiera estimar con precisión el nivel máximo alcanzado durante el evento, además de mostrar sobreestimaciones significativas en los niveles del primer pico. Por otro lado, aunque la calibración automática mejoró notablemente el ajuste de la curva de niveles medidos en el tiempo, reduciendo el retraso de los picos y disminuyendo el RMSE, subestimó considerablemente tanto el pico máximo como los niveles de las fases ascendente y descendente del segundo pico del hidrograma. Esta limitación es crítica, ya que la predicción precisa de los niveles máximos de inundación es fundamental para las autoridades responsables de la gestión fluvial en la planificación de acciones de prevención y mitigación de riesgos.

La baja precisión de los resultados obtenidos con los modelos en Hec-Ras sugiere la necesidad de un modelo más robusto. Por ello, se profundizó en el análisis utilizando modelos 1D (RiverFlood) y 2D (Telemac) que incorporan expresiones para determinar la rugosidad inducida por la vegetación arbórea. Aunque estos modelos mejoraron la estimación del nivel alcanzado en el segundo pico, presentaron una sobreestimación para el resto del evento.

Un mejor rendimiento de los modelos RiverFlood y Telemac podría lograrse si se considerara la resistencia adicional al flujo causada por vegetación de sotobosque, como arbustos y árboles de mediana y baja altura. Este tipo de vegetación tiene un impacto mayor durante flujos bajos e intermedios, lo que podría explicar las diferencias observadas en el primer pico y en las fases intermedias del flujo, donde la vegetación del sotobosque puede estar parcial o totalmente sumergida. Además, la ecuación de rugosidad de vegetación empleada en este estudio, propuesta por Baptist et al., asume que los árboles son elementos rígidos que no se

deforman ni flexionan. Sin embargo, en el caso de árboles con diámetros pequeños, como algunos presentes en este estudio, estos pueden doblarse, lo que altera la sección transversal y afecta la fuerza de arrastre y, por ende, los coeficientes de rugosidad. Por lo tanto, dado que la vegetación ribereña es heterogénea, un análisis más robusto y completo debería incorporar metodologías que consideren la flexibilidad de las plantas y otros tipos de especies vegetales.

Como se muestra en la Figura 6, los resultados obtenidos con los modelos RiverFlood y Telemac son bastante similares, sin diferencias significativas entre ellos. La principal diferencia se observa en la predicción del segundo pico, que el modelo RiverFlood subestima en aproximadamente 30 cm. Esta similitud sugiere que los resultados del modelo unidimensional RiverFlood son consistentes con los del modelo bidimensional, con la ventaja adicional de que RiverFlood es más sencillo de implementar y requiere un menor costo computacional.

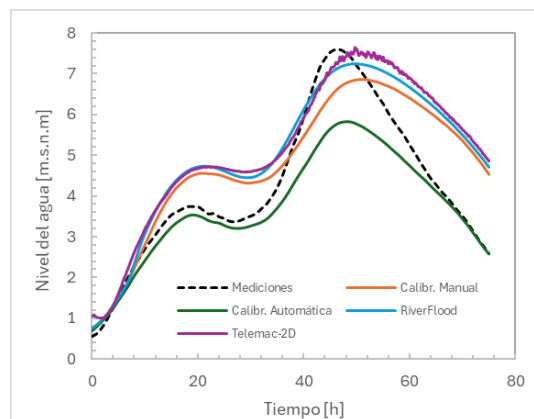


Figura 6. Comparación entre los niveles obtenidos con las simulaciones y los valores observados en la estación hidrométrica.

4. Conclusiones

Este trabajo se centró en la inundación del río Piave ocurrida en octubre de 2018, con el objetivo de comparar los resultados de simulaciones realizadas con modelos hidrodinámicos 1D y 2D. Se evaluaron modelos que integran expresiones para la rugosidad de la vegetación arbórea, como RiverFlood y Telemac, y modelos que determinan una rugosidad global mediante procesos de calibración, como Hec-Ras. El desempeño de las simulaciones se evaluó utilizando las mediciones de los niveles de agua registradas en la estación hidrométrica San Donà di Piave.

En este estudio, las calibraciones realizadas con Hec-Ras presentaron algunas limitaciones en la predicción de los niveles de agua durante el evento de inundación. Específicamente, la calibración manual de los coeficientes de rugosidad no logró estimar con precisión el nivel máximo de inundación, resultando en sobreestimaciones significativas durante el primer pico. Aunque la calibración automática mejoró el ajuste temporal y redujo el error cuadrático medio (RMSE), subestimó tanto el pico máximo como los niveles alrededor del segundo pico del hidrograma.

Los resultados obtenidos con las simulaciones en Hec-Ras sugieren la necesidad de un enfoque más robusto para manejar flujos complejos como este. Aunque los modelos RiverFlood y Telemac, que incorporan ecuaciones para la rugosidad de la vegetación arbórea, mostraron un mejor rendimiento en la estimación del nivel máximo, sobreestimaron los niveles en el resto del evento. Esta sobreestimación podría atribuirse a la necesidad de implementar ecuaciones adicionales que incluyan la resistencia causada por vegetación de sotobosque y que consideren la flexibilidad de la vegetación y su comportamiento bajo diferentes condiciones de flujo.

A pesar de que los modelos RiverFlood y Telemac arrojaron resultados similares en la simulación del evento de inundación, RiverFlood se destacó por su simplicidad de implementación y menor costo computacional, lo que lo convierte en una opción viable para la modelación de eventos de inundación en escenarios que requieran una buena aproximación de niveles máximos en un tiempo limitado.

Futuros estudios deberían integrar metodologías que consideren la flexibilidad de la vegetación y la diversidad de especies en la estimación de la rugosidad. Además, sería importante validar estos modelos en una amplia variedad de escenarios de inundación para mejorar la comprensión y gestión de riesgos asociados a eventos extremos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Tierras, Medio Ambiente, Agricultura y Bosques TESAF, la Universidad de Padua por proporcionar los datos de vegetación, y a la Agencia Regional para la Prevención y Protección Ambiental del Véneto (ARPAV) por facilitar los datos de las estaciones hidrométricas utilizadas en este estudio. También extendemos nuestro agradecimiento a Alessandro Prece por su valiosa colaboración en la elaboración de los modelos. Esta investigación ha sido financiada por el Proyecto ref. PNRR-CN AGRITECH-S3 y la Autoridad Distrital de los Alpes Orientales de Italia.

Referencias

- Baptist MJ, Babovic V, Uthurburu JR, Keijzer M, Uittenbogaard RE, Mynett A, Verwey A (2007) On inducing equations for vegetation resistance, *Journal of Hydraulic Research*, 45(4), 435–450. doi: [10.1080/00221686.2007.9521778](https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521778)
- Box W, Järvelä J, Västilä K (2021) Flow resistance of floodplain vegetation mixtures for modelling river flows, *Journal of Hydrology*, 601, 126593. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126593>.
- Cappelaere, B (1997) Accurate diffusive wave routing, *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(3), 174–181. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:3(174)
- Cunge JA (1969) On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method), *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205–230. doi: [10.1080/00221686909500264](https://doi.org/10.1080/00221686909500264)
- D’Ippolito A, Calomino F, Alfonsi G, Lauria A (2021) Flow resistance in open channel due to vegetation at reach scale: a review, *Water* 13(2):116. doi: [10.3390/w13020116](https://doi.org/10.3390/w13020116)
- FORD, FORtran Documenter, 2024. Automatic documentation generator for modern Fortran programs, <https://forddocs.readthedocs.io/en/latest/> visited 5/1/2024.
- Herrera Gómez V, Ravazzani G, Mancini M, Marchi N, Lingua E, Ferri M (2023) Monitoring discharge in vegetated floodplains: a case study of the Piave river, *Water* 15(19):3470. doi: [10.3390/w15193470](https://doi.org/10.3390/w15193470)
- Herrera Gómez V, Ramírez Franco L, Ravazzani G et al. (2024) Modeling arboreal vegetation-induced friction and its influence on river flooding using a two-dimensional model, *Environmental Fluid Mechanics* 24, 387–411. doi: [10.1007/s10652-024-09991-z](https://doi.org/10.1007/s10652-024-09991-z)
- Moel H, van Alphen J, and Aerts JCJH (2009) Flood maps in Europe – methods, availability and use, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 289–301. doi: [10.5194/nhess-9-289-2009](https://doi.org/10.5194/nhess-9-289-2009)
- Ravazzani G, Herrera Gomez V, Passoni G, and Mancini M (2024) RiverFlood-1D v 1.0: coupling parabolic and backwater (PAB) scheme and Muskingum-Cunge model for river flood routing, *Geoscientific Model Development (Submitted)*
- Todini E, Bossi A (1986) PAB (Parabolic and Backwater), an unconditionally stable flood routing scheme particularly suited for real time forecasting and control, *Journal of Hydraulic Research*, 24(5), 405–424. doi: [10.1080/00221688609499317](https://doi.org/10.1080/00221688609499317)
- Yen BC (2002) Open Channel Flow Resistance, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 20–39. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(20)