

MODELO DE AGUAS SOMERAS PARA EL ESTUDIO DE ZONAS FLUVIALES DE LA PROVINCIA DE SANTA FE

SHALLOW WATER MODEL FOR THE STUDY OF RIVER AREAS IN THE PROVINCE OF SANTA FE

Lucía Morandi^a, Pablo A. Kler^{a,b} y Laura Battaglia^{a,b}

^a*Grupo de Investigación en Métodos Numéricos en Ingeniería (GIMNI)
UTN FRSF - Lavaise 610, Santa Fe, Argentina - e-mail: lmorandi@frsf.utn.edu.ar*

^b*Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC) - UNL/CONICET
Predio CONICET Santa Fe, Colectora Ruta Nac 168, Km 472, Paraje El Pozo, Santa Fe, Argentina
e-mail: (kler,lbattaglia)@cimec.unl.edu.ar - <http://www.cimec.santafe-conicet.gov.ar>*

Palabras clave: modelo de aguas someras, elementos finitos, Arroyo Monje, Telemac-2D.

Resumen. El territorio de la Provincia de Santa Fe se caracteriza, especialmente al este, por la presencia de sistemas que trasladan el agua de origen pluvial al Río Paraná. En este trabajo se propone el análisis de un tramo del Arroyo Monje, en las cercanías de su confluencia con el Río Coronda, a la altura de la localidad homónima, donde el cauce intercepta vías de comunicación troncales y eventualmente produce anegamientos en zonas bajas para eventos de lluvias intensas. El análisis se llevará a cabo empleando el software de código abierto Telemac-2D, que resuelve las ecuaciones de aguas someras transitorias a través del análisis por método de elementos finitos, con la capacidad de reproducir diferentes condiciones de contorno y considerar tanto la topografía como la heterogeneidad de los terrenos afectados. Se espera que los resultados obtenidos con la simulación hidrológica del cauce sean consistentes con los medidos en eventos recientes.

Keywords: shallow waters model, finite elements, Monje River, Telemac-2D.

Abstract. The territory of the Province of Santa Fe, particularly in its eastern sector, is characterized by drainage systems that convey rainwater toward the Paraná River. This study focuses on a reach of the Monje River, near its confluence with the Coronda River and adjacent to the town of the same name, where the stream intercepts main communication routes and occasionally causes flooding in low-lying areas during heavy rainfall events. The analysis will be carried out using the open-source software Telemac-2D, which solves transient shallow water equations through finite element analysis, with the ability to reproduce different boundary conditions and consider both, the topography and the heterogeneity of the affected terrain. The results obtained from the hydrological simulation of the channel are expected to be consistent with observed streamflow data from recent events.

1. INTRODUCCIÓN

Ante el notable aumento en la cantidad de inundaciones a nivel mundial ([CRED, 2024](#)), ha crecido significativamente el interés por el estudio de este fenómeno. Su comprensión y prevención es esencial para las autoridades y organismos encargados de la gestión de los recursos hídricos, quienes promueven la modelación de crecidas de ríos como herramienta para mitigar sus impactos ([Pérez, 2010](#)).

En este contexto, los modelos numéricos unidimensionales (1D) comúnmente utilizados, presentan restricciones en escenarios complejos, como lo son los sistemas cauce-planicie de ríos de llanura, caracterizados por valles aluviales con morfología irregular, y atravesados por múltiples cursos secundarios, vegetación abundante y albardones costeros. En estos casos, la simplificación unidimensional limita la capacidad de representar con exactitud el comportamiento real del flujo, especialmente en simulaciones de gran escala espacial y temporal. Actualmente, el desarrollo tecnológico ha puesto a disponibilidad numerosos modelos en dos dimensiones (2DH) para la simulación de inundaciones, cuya aplicación requiere como insumo fundamental información detallada de la topografía del área estudiada.

En Argentina ya se han aplicado modelos bidimensionales para representar con mayor precisión ríos de llanura. Por ejemplo, [Giampieri et al. \(2003\)](#) simulaban numéricamente la extraordinaria crecida del río Salado, empleando Telemac-2D para reproducir la propagación de ondas tras el ingreso de agua a la ciudad de Santa Fe. Más recientemente, [Peruzzo et al. \(2018\)](#) aplicaron Telemac-2D al tramo inferior del río Paraná, utilizando una malla triangular irregular y validando niveles, velocidades y partición de caudales con datos hidrométricos.

A nivel local adquiere relevancia el caso del Arroyo Monje, en la provincia de Santa Fe. Este curso de agua, cuya cuenca representada en la Figura 1 presenta una morfología compleja y una alta densidad de cursos secundarios, ha despertado el interés tanto del gobierno provincial como del Instituto Nacional del Agua. La planificación y gestión de los recursos hídricos en esta región, alineada con los objetivos del Plan Hídrico Provincial, requieren la aplicación de modelos numéricos avanzados que permitan estimar con precisión las velocidades del flujo y los niveles de agua, de manera de mitigar los impactos de posibles inundaciones sobre las comunidades locales y estimar tiempos de residencia del agua en zonas anegadas.

La cuenca del Arroyo Monje ya ha sido objeto de estudios hidrológicos e hidráulicos específicos. Como antecedente reciente se puede citar el *Estudio Integral Hidrológico Hidráulico de la Cuenca Del Arroyo Monje*, generado a partir del convenio firmado entre el Instituto Nacional del Agua, y el Ministerio de Infraestructura, Servicio Públicos y Hábitat de la Provincia de Santa Fe ([Mazzón et al., 2023](#)).

En esta oportunidad, se propone analizar las descargas del tramo final del Arroyo Monje, delineado en rojo en la Fig. 1, entre la Autopista Santa Fe - Rosario y su desembocadura en el Río Coronda. A fin de evaluar la extensión de zonas anegadas en el marco de escenarios con afectación de vías de circulación troncales de la Provincia, se toma como referencia información del estudio antes citado ([Mazzón et al., 2023](#)).

Este trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la Sec. 2 se resumen los métodos empleados para resolver numéricamente el problema, incluyendo criterios de delimitación del dominio de cálculo; la Sec. 3 describe las características salientes del modelo numérico; en la Sec. 4 se presentan los resultados más representativos para el escenario propuesto; por último, en la Sec. 5 se resumen las conclusiones.

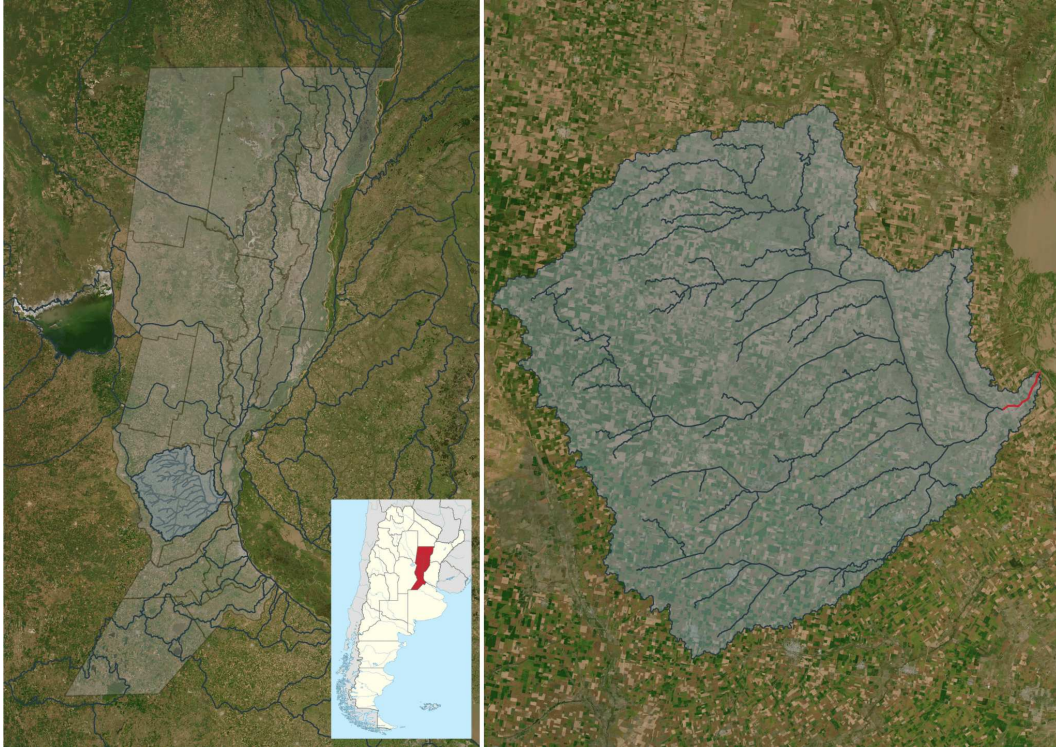


Figura 1: Ubicación general de la cuenca del Arroyo Monje. A la derecha, en rojo, se destaca el tramo final que se analiza en este trabajo.

2. METODOLOGÍA

2.1. Ecuaciones de gobierno

Se utilizó el módulo hidrodinámico bidimensional integrado verticalmente de código abierto Telemac-2D del Sistema de Modelado [Telemac-Mascaret \(2025\)](#), que resuelve las ecuaciones de Saint Venant para aguas poco profundas mediante el método de elementos finitos ([Hervouet, 2007](#)). La ecuación de continuidad es

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla h + h \nabla \cdot \mathbf{u} = S_h \quad (1)$$

donde u, v son las componentes de velocidad en las direcciones horizontales x e y , respectivamente, h es la profundidad y S_h es un término fuente o sumidero, mientras que la ecuación de momentum en x es:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h \nu_t \nabla u) \quad (2)$$

y en y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h \nu_t \nabla v) \quad (3)$$

donde los parámetros involucrados son la aceleración de la gravedad g , la elevación del fondo Z , el coeficiente ν_t de difusión de momentum y las componentes horizontales de términos fuente S_x, S_y . Estos últimos consideran efectos de fricción de fondo, los efectos del viento, u otros que pudieran influir en el escurrimiento.

2.2. Delimitación de la zona analizada

La cuenca del arroyo Monje forma parte de la llanura pampeana del centro-sur de la provincia de Santa Fe, comprendida entre las coordenadas $31^{\circ}53'$ y $32^{\circ}50'$ de latitud sur y $60^{\circ}53'$ y $60^{\circ}00'$ de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 7.132 km². Presenta un elevado grado de intervención antrópica mediante rutas, caminos rurales y canales, que constituyen un factor determinante en el comportamiento de los escurrimientos (Barrera et al., 2023).

El propio Arroyo Monje se ve interrumpido por la Autopista AP01, la Ruta Nacional N° 11 y el ramal Ferrocarril línea Belgrano, por lo que conocer su comportamiento hidráulico frente a eventos excepcionales resulta de interés para la toma de decisiones y gestión del territorio.

El dominio de simulación fue definido suponiendo abarcar la totalidad del terreno potencialmente afectado por eventos de inundación registrados en noviembre de 2018. Como criterio de delimitación se adoptó la cota IGN 20 m, obtenida a partir de curvas de nivel del Servicio Cartográfico Nacional, extraídas de visualizador ArgenMap (Instituto Geográfico Nacional, 2025) que permiten abarcar zonas considerablemente anegadas durante el evento mencionado (Del Prete et al., 2023). Además se observaron los resultados de Spais et al. (2023), donde el sector afectado por el desborde tiene un ancho aproximado de 2000 metros. En función de ello, se optó por extender el dominio buscando garantizar que la modelación abarque la totalidad de la zona susceptible de inundación.

En sentido longitudinal, la extensión representada en la Figura 2 abarca diez perfiles transversales relevados sobre el cauce del Arroyo Monje, que se distribuyen en puntos estratégicos desde aproximadamente 1000 m aguas arriba del puente de la Autopista Santa Fe – Rosario, hasta la desembocadura en el Río Coronda en el sector denominado La Boca de Monje (Mazón et al., 2023).



Figura 2: Dominio de análisis

3. MODELO NUMÉRICO

3.1. Dominio de cálculo y discretización

La topografía del cauce se obtuvo mediante interpolación en Ras Mapper ([GRASS Development Team, 2025](#)) de los diez perfiles transversales del Arroyo Monje. Por su parte, las elevaciones correspondientes a la zona de inundación se extrajeron del modelo de elevación digital AW3D ([Japan Aerospace Exploration Agency \(JAXA\), NTT DATA, RESTEC, 2025](#)), de libre acceso y con resolución espacial de 30 metros.

Ambas capas fueron integradas en Ras Mapper para conformar el modelo completo del área de estudio, sobre el cual se efectuó el pre-procesamiento de los datos geométricos empleando los softwares abiertos [QGIS.org \(2024\)](#) y Blue Kenue ([National Research Council - Canada, 2024](#)).

En la zona del cauce, la malla se refinó para representar con mayor detalle la geometría hidráulica, mientras que en la planicie de inundación se emplearon elementos de mayor tamaño, con triángulos regulares. Con el propósito de analizar la sensibilidad de la geometría, del refinamiento de la malla y de los coeficientes de rugosidad de Manning sobre el comportamiento hidráulico del cauce, se construyeron las dos mallas de la Figura 3.

En la malla 1, la delimitación del cauce se realizó mediante un proceso de integración entre la cota leída en los perfiles transversales relevados y la interpretación de imágenes satelitales, lo que permitió obtener una definición más ajustada de las márgenes. Al cauce se le asignó un coeficiente de Manning $n = 0.04$, mientras que a la superficie restante se le atribuyó un valor $n = 0.30$, representativo de áreas con mayor rugosidad superficial y cobertura heterogénea.

La delimitación del cauce en la Malla 2 se simplificó considerando exclusivamente el ancho de los perfiles relevados, y asignando de manera uniforme $n = 0.04$ a todo el sector. El valor $n = 0.30$ se aplicó únicamente a las áreas externas, obtenidas a partir del MED.

La Malla 1 está compuesta por 1987567 nodos y 3965909 elementos triangulares lineales, mientras que la Malla 2 posee un menor grado de refinamiento, con un total de 54726 nodos y 107986 elementos similares a los de la Malla 1.

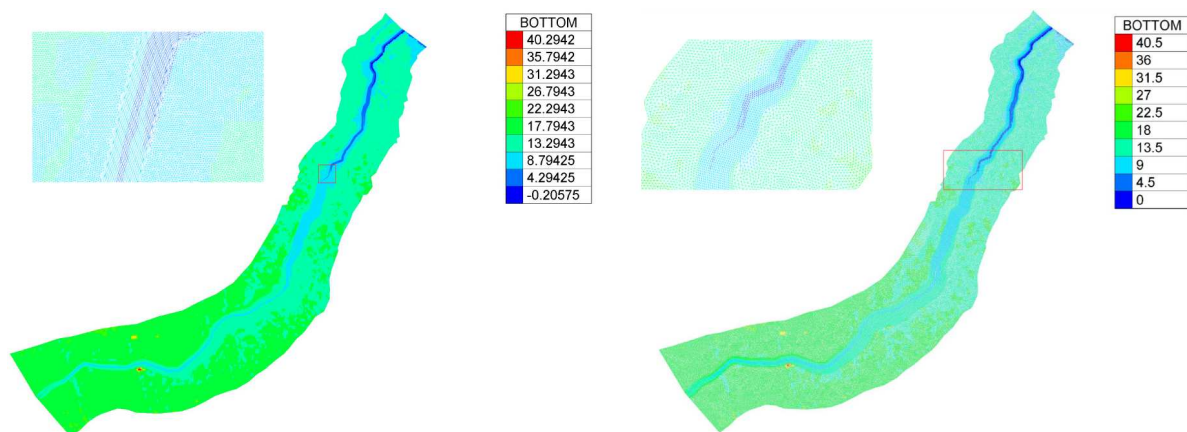


Figura 3: Lado derecho: Malla 1; Lado izquierdo: Malla 2. En ambos casos, se representa la cota de fondo.

3.2. Condiciones de borde e iniciales

Para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant fue necesario establecer condiciones de borde adecuadas en las secciones de entrada y salida del cauce.

En el contorno aguas arriba se adoptó como condición de borde una frontera abierta con caudal prescrito variable en el tiempo y altura prescrita. En este caso, se impuso un caudal pico de 645 m³/s, correspondiente al aforo registrado en la sección de la autopista durante el evento de crecida del 16 de noviembre de 2018, cuya información se encuentra disponible en el sitio del [SNIH \(2025\)](#). La condición se complementó con la cota máxima del pelo de agua observada ese mismo día, equivalente a 21.53 m IGN. En la sección aguas abajo de descarga del sistema, se aplicó como condición una altura prescrita de 12 metros.

La condición inicial en la simulación con la Malla 1 consistió en un escenario de cauce parcialmente lleno, estableciendo una profundidad inicial de 0.01 metros. Mientras que para la Malla 2 se utilizó como estado inicial una simulación previa.

Los coeficientes mencionados en la sección 3.1 para representar la influencia de la rugosidad del terreno a través de la ley de fricción de Manning provienen de parámetros empleados en casos similares de la literatura.

3.3. Parámetros de ejecución

Se definió un modelo de flujo estacionario en Telemac-2D. Para la discretización espacial, tanto de la velocidad como de la profundidad, se emplearon elementos finitos triangulares de interpolación lineal. El parámetro de compatibilidad del gradiente de superficie libre se fijó en 0.1, lo cual permite obtener resultados más realistas en comparación con el valor por defecto ([Hydro-Informatics, 2025](#)). Para el tratamiento del sistema lineal, se seleccionó la opción correspondiente a la ecuación de onda generalizada, que contribuye a suavizar los resultados y a reducir el tiempo de cálculo. En cuanto a los esquemas de advección, se empleó un esquema N distributivo con conservación de masa implementado específicamente para simulaciones con zonas de inundación.

Con la intención de representar un ciclo completo de escurrimiento y permitir la estabilización de las variables hidrodinámicas en el dominio se simuló el evento para la Malla 1 durante 86400 segundos, equivalentes a 24 horas reales.

En el caso de la Malla 2, se realizó una simulación inicial de 64000, utilizada únicamente para generar un estado hidráulicamente estable. A partir de ella, se ejecutó la simulación de interés, con una duración de 30000 segundos.

4. RESULTADOS

Finalizadas las simulaciones, se procedió al análisis de los resultados, considerando que, por la coincidencia entre el caudal de entrada y el de salida del dominio, se alcanzó un régimen de flujo estacionario. A su vez, el análisis de la evolución temporal no mostró variaciones relevantes entre sucesivos instantes de salida generados cada 2000 segundos.

Al visualizar con el Software [Salome \(2025\)](#) los resultados de profundidad de agua obtenidos para ambas simulaciones, se observó que en la zona de la Autopista Provincial AP01 existe anegamiento. La Figura 4 muestra los sectores donde la profundidad del flujo superficial es de al menos 10 centímetros. La Malla 1, con mayor grado de refinamiento espacial, reprodujo un anegamiento notablemente más extenso que la Malla 2.

Contrastando los resultados con lo presentado en el póster de [Spais et al. \(2023\)](#), se advirtió que las simulaciones llevadas a cabo con [Telemac-Mascaret \(2025\)](#) reprodujeron una menor afectación del valle de inundación durante el evento hidrológico del 16 de noviembre, ya que la extensión de las áreas anegadas resultó considerablemente más reducida que la reportada en dicho antecedente.

Por otro lado, las profundidades máximas se concentraron en la sección de descarga del dominio, alcanzando valores de 12.17 m en la simulación de la Malla 1 y 12.13 m metros en la correspondiente a la Malla 2.

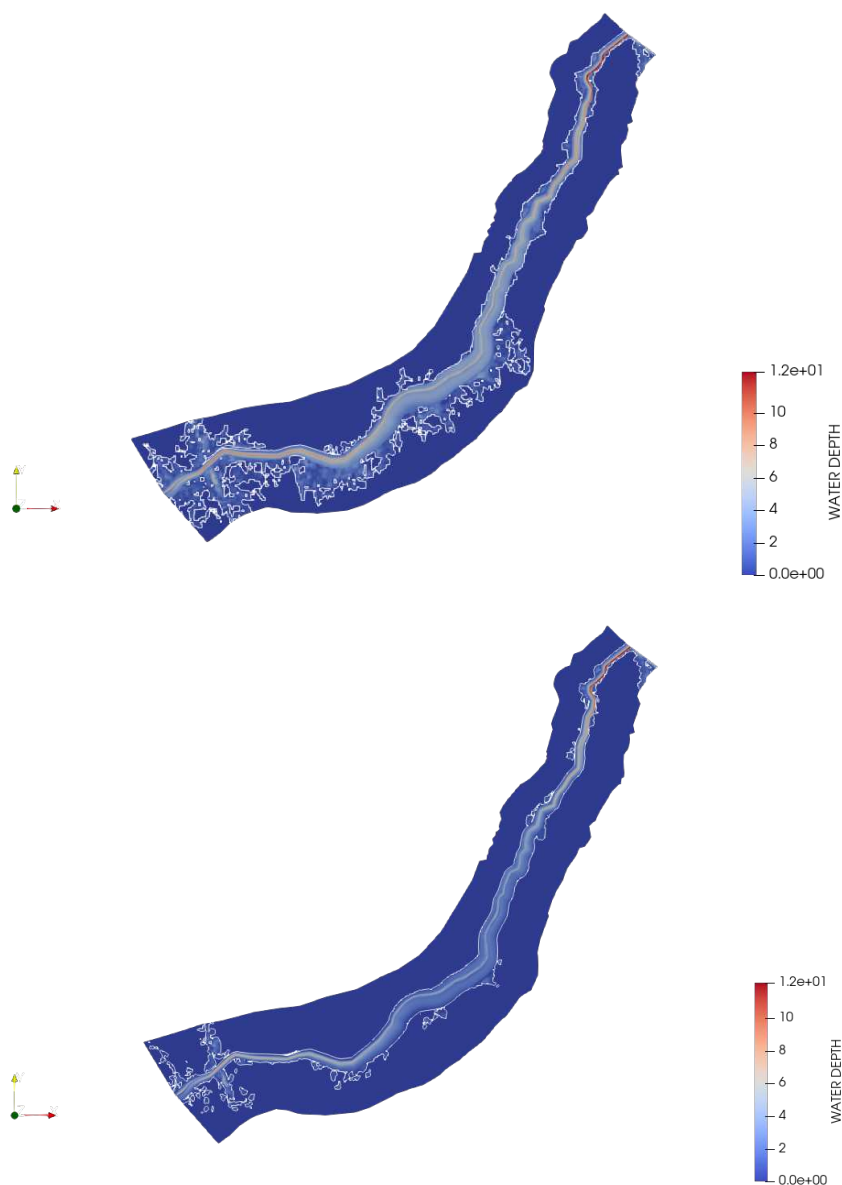


Figura 4: Profundidad de agua. Arriba: Malla 1. Abajo: Malla 2. Curvas de nivel para $h = 0.10\text{m}$ de profundidad de agua.

La Fig. 5 muestra la magnitud de la velocidad en el instante final de análisis. Se observó que la simulación con la Malla 2 presenta valores máximos concentrados de 3.00 m/s en la sección de ingreso del caudal. La velocidad en el tramo inicial, desde el perfil de ingreso y hasta 300 metros aguas abajo de la Ruta Nacional N°11 es de 2.50 m/s, mientras que en tramo restante del cauce principal se registraron magnitudes próximas a 2.00 m/s, incluso en la zona de descarga.

Por su parte, en la Malla 1 se registraron velocidades de ingreso sensiblemente superiores, del orden de 8.30 m/s. La velocidad promedio del cauce principal fue de 3.00 m/s, mientras que en el tramo final, donde la pendiente es más acentuada, se alcanzaron velocidades cercanas a

3.50 m/s, con máximos puntuales próximos a 4.50 m/s en la sección de descarga.

En la Figura 5 se aprecia que de la simulación con la Malla 1 se alcanzaron velocidades concentradas en valores más elevados, pero restringidos a un sector angosto, mientras que con la Malla 2 se obtuvieron magnitudes menores distribuidas en un ancho mayor. Dado que ambas configuraciones se apoyan en la misma topografía, la variación se atribuyó al coeficiente de Manning adoptado en cada caso.

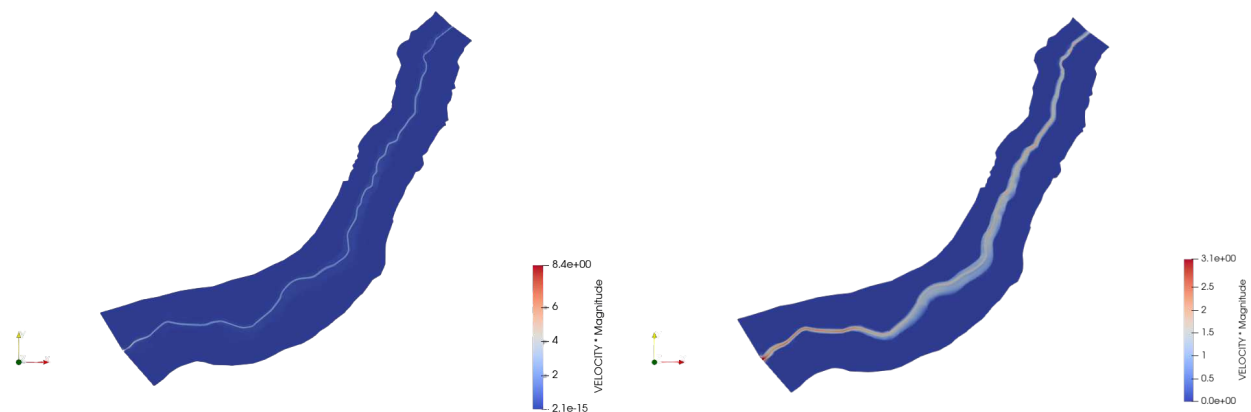


Figura 5: Magnitud de Velocidad. Lado derecho: Malla 1; Lado izquierdo: Malla 2.

Los perfiles de la Figura 6 representan la cota de fondo a lo largo del eje longitudinal del Arroyo Monje junto a la cota de la superficie libre de cada una de las mallas evaluadas. Se observó que la cota de la malla más refinada (Malla 1) se ubica sistemáticamente por encima de la correspondiente a la Malla 2. En algunos tramos, esta diferencia alcanzó hasta 2 metros, especialmente en la sección que atraviesa la Ruta Nacional N°11 y el Ferrocarril, donde la topografía y los obstáculos locales generan contracciones de flujo que elevan la cota del pelo de agua. Estas diferencias evidencian la influencia del refinamiento de la discretización en el resultado, siendo la malla más refinada la que provee resultados de mayor congruencia con otros resultados numéricos y observaciones de campo durante el evento de crecida. No obstante, en la sección de salida, la cota de superficie libre se aproximó a 12 metros en ambas mallas, consistente con la altura especificada como condición de borde.

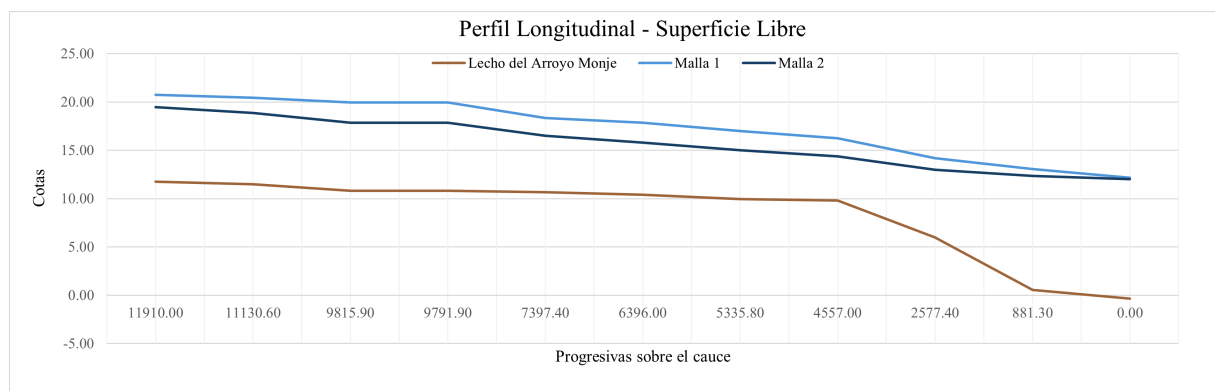


Figura 6: Perfiles Longitudinales arroyo Monje.

Finalmente, se analizó el número de Froude (Fr), parámetro adimensional que permite caracterizar el régimen de flujo a partir de la relación entre la velocidad media del agua, la profun-

didad y la incidencia de la gravedad. En la Malla 1, se registraron valores próximos a 0.90 en la sección de ingreso. El valor del número de Froude en la longitud total del cauce se aproximó a valores de 0.25 en las dos simulaciones.

Estos resultados indican que el flujo en ambos modelos se desarrolló bajo régimen subcrítico ($Fr < 1$). Ello implica que el control del flujo este dominado por la profundidad, de modo que las condiciones de nivel aguas abajo ejercen una influencia determinante sobre el tramo. La velocidad del flujo no constituye el factor predominante, sino que la dinámica queda condicionada por la interacción entre la geometría del cauce y las variaciones de tirante.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en ambas simulaciones indican que las condiciones hidrodinámicas se mantuvieron constantes a lo largo del período simulado, alcanzándose un estado estacionario para los intervalos de tiempo evaluados. La zona de mayor anegamiento coincide con la observada en estudios anteriores, aunque con menor extensión, lo que demuestra una correspondencia razonable con los análisis previos.

La Malla 1, de mayor refinamiento espacial, permite capturar con más detalle las irregularidades topográficas y las contracciones de flujo, evidenciando niveles de superficie libre y velocidades máximas superiores en sectores críticos, como la Autopista AP01, la Ruta Nacional N°11 y el Ferrocarril. Por su parte, la Malla 2 reproduce correctamente los patrones generales del flujo, pero con perfiles más suavizados y una menor capacidad para reflejar contracciones locales y gradientes hidráulicos puntuales.

Estos resultados ponen de manifiesto la sensibilidad de las simulaciones a la resolución de la malla: la discretización más fina de la Malla 1 se traduce en velocidades extremas más altas y niveles de superficie libre más elevados, mientras que la geometría suavizada de la Malla 2 y el coeficiente de fricción $n = 0.04$ aplicado a una mayor parte del dominio, tendieron a distribuir los escurrimientos de manera más homogénea, reduciendo las magnitudes máximas y produciendo perfiles longitudinales más suavizados, con diferencias menores entre la cota de fondo y la del pelo de agua.

La similitud de los valores finales en la sección de salida confirma la consistencia global de las simulaciones y respalda la validez de la condición de borde impuesta, información relevante para la evaluación del riesgo de inundación y la planificación de obras hidráulicas.

AGRADECIMIENTOS

Las actividades recibieron financiamiento a través del proyecto PID-UTN-10015. Los autores agradecen los recursos facilitados por CONICET y la UTN-FRSF, así como también al Ing. Gastón Petrolí por el asesoramiento en la selección del caso y el análisis de los resultados.

REFERENCIAS

- Barrera G., R.Mazzón, Prete P.D., Spais A., Chicherit Y., Scioli C., Collins J., y Charlón M. Análisis de la capacidad de regulación de superficies deprimidas - Cuenca del Arroyo Monje, Santa Fe. En XXVII Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2023. 2023.
- CRED. Em-dat: The emergency events database. <https://www.emdat.be/>, 2024.
- Del Prete P., Mazzón R., Barrera G., Spais A., Collins E., Scioli C., Collins J., y Charlón M. Análisis obras de paso cañada Carrizales - Monje. Cuenca del arroyo Monje, Santa Fe. En XXVII Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2023. 2023.

- Giampieri R.C., Tassi P.A., Rodriguez L.B., y Vionnet C.A. Numerical simulation of the extraordinary flood of the Salado River. En Mecánica Computacional, volumen XXII. 2003.
- GRASS Development Team. Ras mapper, módulo de visualización y análisis raster de GRASS GIS. <https://grass.osgeo.org/>, 2025.
- Hervouet J.M. Hydrodynamics of Free Surface Flows. Wiley, 2007.
- Hydro-Informatics. Telemac2d introduction. 2025. <https://hydro-informatics.com/numerics/telemac/telemac2d.html>.
- Instituto Geográfico Nacional. ArgenMap: Servicio Cartográfico Nacional. <https://www.ign.gob.ar/argenmap>, 2025.
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), NTT DATA, RESTEC. ALOS World 3D - 30m (AW3D30). <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>, 2025.
- Mazzón M., Spais A., Del Prete P., Maciel J., Collins E., y Bianchi M. Estudio integral hidrológico hidráulico cuenca del Arroyo Monje Región IV. Informe Técnico, Ministerio de Infraestructura, Servicios Públicos y Hábitat, Instituto Nacional del Agua, 2023.
- National Research Council - Canada. Blue Kenue: software tool for hydraulic modellers. 2024.
- Peruzzo F., Riccardi G., y Basile P.A. Implementación del modelo hidrodinámico bidimensional Telemac-2D en un tramo del Río Paraná inferior. En XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires, Argentina, 2018.
- Pérez L.B. Modelación matemática en el ámbito de la dinámica fluvial. CEDEX, 2010.
- QGIS.org. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.org>, 2024.
- Salome. Salome 9.12: Plataforma de pre y post-procesamiento para simulaciones numéricas. 2025. Versión 9.12.
- SNIH. Sistema Nacional de Información Hídrica. 2025.
- Spais A., Mazzón R., y Collins E. Aplicación de nuevas tecnologías a hidrología en cuencas de llanura cuenca del arroyo Monje, Santa Fe. En XXVII Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2023. 2023.
- Telemac-Mascaret. The TELEMAT-MASCARET modelling system. <https://www.opentelemac.org>, 2025.