

## APLICACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO TELEMAC-2D EN UN TRAMO DEL RIO PARANÁ

### APPLICATION OF THE TELEMAC-2D HYDRODYNAMIC MODEL IN A REACH OF THE PARANÁ RIVER

Lucía C. Pairetti<sup>a,b</sup>, Luciano V. Casanova<sup>c</sup>, Florencia Peruzzo<sup>a,b</sup>, Gerardo A. Riccardi<sup>a,b</sup> y  
Pedro A. Basile<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>*Departamento de Hidráulica, Escuela de Ingeniería Civil, FCEIA, UNR, Riobamba 245 bis. 2000  
Rosario, Argentina, dtohidra@fceia.unr.edu.ar, <https://web.fceia.unr.edu.ar/es/>*

<sup>b</sup>*Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA, Riobamba 245 bis. 2000  
Rosario, Argentina, curiham@fceia.unr.edu.ar, <https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/es/>*

<sup>c</sup>*Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Rosario Argentina, Zeballos 1341. 2000  
Rosario, Argentina, <https://www.frro.utn.edu.ar/>*

**Palabras clave:** Ríos aluviales de llanura; río Paraná; modelación hidrodinámica bidimensional; Telemac-2D.

**Resumen.** Se presenta la aplicación del modelo matemático hidrodinámico bidimensional horizontal TELEMAC-2D en un tramo del río Paraná entre los km 452 (Puerto San Martín-PSM) y km 405 (Alvear-ALV). La modelación fue realizada en régimen de flujo permanente, determinándose profundidades y niveles de agua, velocidades en dos direcciones integradas en la vertical y caudales. La calibración del modelo consistió en el ajuste del coeficiente de rugosidad de Manning que aseguraba la mejor aproximación entre niveles hidrométricos observados y simulados en el km 416 (Rosario-ROS) y en km 452 (PSM) en los distintos escenarios. Los resultados fueron empleados en trabajos posteriores, como base hidrodinámica para la simulación de dispersión de contaminantes, ante diferentes alternativas de volcamiento de efluentes cloacales.

**Keywords:** Alluvial river; Paraná river; two-dimensional hydrodynamic mathematical model; Telemac-2D.

**Abstract.** The application of the two-dimensional horizontal hydrodynamic mathematical model TELEMAC-2D in the Paraná River between km 452 (Puerto San Martín-PSM) and km 405 (Alvear-ALV) is presented. The modeling was performed in a steady-state flow conditions. Depths, water levels, flow velocities in two directions integrated in the vertical and discharges were calculated from the simulations. The calibration of the model consisted of adjusting the Manning roughness coefficient that ensured the best approximation between observed and simulated water levels at km 416 (Rosario-ROS) and km 452 (PSM) in the different scenarios. The results were used in subsequent works as a hydrodynamic basis for the simulation of pollutant dispersion, in view of different dumping scenarios of sewage effluents.

## 1 INTRODUCCIÓN

El río Paraná es el sexto río más importante del mundo, el segundo en América del Sur y el curso de agua más significativo de Argentina. Esto se debe a su extensa longitud (4000 km) y a su amplia área de drenaje ( $2.6 \times 10^6$  km<sup>2</sup>). Constituye una vía de transporte fluvial, una fuente de abastecimiento de agua y es un sitio de esparcimiento. Por otro lado, también es receptor de efluentes pluviales y cloacales vertidos por las poblaciones situadas en sus márgenes, influyendo así en la calidad del agua.

Considerando que la modelación hidrodinámica constituye una herramienta sumamente útil para la planificación, gestión, explotación y conservación de los recursos hídricos, el presente estudio tiene como objetivo evaluar mediante la simulación numérica bidimensional diversas variables de flujo que presenta el tramo del río Paraná entre el km 452 y el km 405, el cual limita con las localidades comprendidas entre Puerto General San Martín y Alvear. La constitución del modelo se realizó en función de trabajos antecedentes de [Peruzzo et al. \(2017a, 2017b y 2018\)](#). Se seleccionaron diferentes escenarios de trabajo relacionados con distintos estados de permanencias de niveles hidrométricos del río y recurrencias de niveles hidrométricos mínimos anuales, de manera que los resultados obtenidos brinden una caracterización hidrodinámica del tramo que pueda ser utilizada posteriormente en trabajos profesionales de simulación de plumas de dispersión generadas por vertido de contaminantes en la costa del río Paraná en Rosario.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO

La zona en estudio, sobre la cual se constituyó el modelo hidrodinámico, abarca un tramo de 47 km del río Paraná desde la localidad de Puerto General San Martín aguas arriba (km 452 de la ruta de navegación Santa Fe-Océano) hasta Alvear aguas abajo (km 405 de la ruta de navegación Santa Fe-Océano), comprendiendo cauce principal e islas (ver [Figura 1](#)). El cauce principal en este tramo se desarrolla sobre la margen santafesina, caracterizándose con un ancho medio sin islas para el tramo completo de 1600 m ([FICH, 2004](#)).

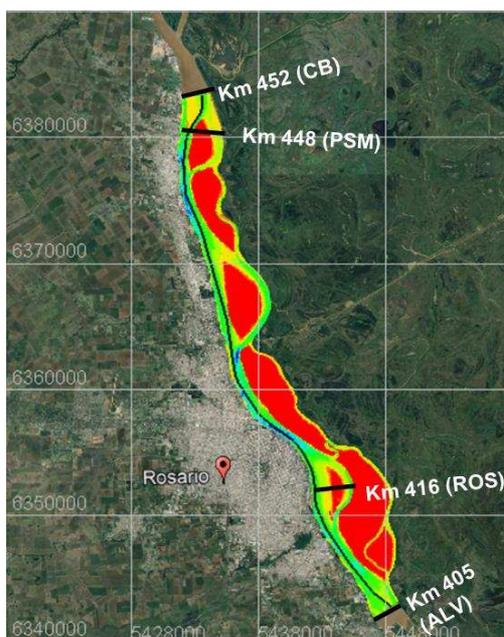


Figura 1: Tramo en estudio comprendido entre el km 405 y el km 452 con eje de canal de navegación.

El valle de inundación se desarrolla sobre la margen izquierda del río y el ancho del mismo

en esta zona varía entre 40 – 50 km. A macro-escala, el cauce principal muestra una configuración morfológica caracterizada por una sucesión de expansiones y contracciones, donde se observan islas vegetadas, interconectadas con tramos más estrechos y profundos en los cuales el río fluye por un cauce único. Los tramos estrechos del cauce tienen asociados cauces secundarios paralelos a sus trazas de dimensiones mucho menores.

En cuanto a la caracterización hidráulica del tramo, el caudal módulo anual de la serie 1905-2022 tiene un valor de 15830 m<sup>3</sup>/s (Basile y Riccardi, 2023). Durante la crecida extraordinaria de 1983, el caudal máximo fue de aproximadamente 60000 m<sup>3</sup>/s, con casi 30000 m<sup>3</sup>/s fluyendo en el cauce principal y el resto sobre la planicie de inundación (García et al., 2010) y un nivel hidrométrico máximo en Rosario (ROS, km 416) de 9,21 m IGN. El caudal mínimo registrado en PSM es aproximadamente 5700 m<sup>3</sup>/s (1944/1945) (Basile y Riccardi, 2023). La pendiente de la superficie libre entre PSM y ROS varía entre 1.4×10<sup>-5</sup> para aguas bajas y 4.3×10<sup>-5</sup> para aguas altas.

### 3 SISTEMA DE MODELACIÓN

#### 3.1 Telemac-2D y BlueKenue©

Se utilizó el módulo hidrodinámico bidimensional integrado en vertical TELEMAC-2D del Sistema de Modelado TELEMAC-MASCARET (Hervouet, 2000), siendo un modelo de calidad probada, libre disponibilidad y uso gratuito. Además, para realizar el pre y post procesamiento del modelo se utilizó la plataforma BlueKenue© (CHC, 2012). TELEMAC-2D resuelve las ecuaciones para aguas poco profundas bidimensionales en horizontal completas, mediante el método de elementos finitos sobre una malla triangular irregular. Dichas ecuaciones son (Lang et al., 2014):

Continuidad:

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

Momentum en dirección x:

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

Momentum en dirección y:

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

Donde: h es la profundidad de flujo (m); g es la aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>);  $\nu_t$  es la viscosidad de remolino (m<sup>2</sup>/s); Z es el nivel de la superficie libre (m)(IGN); t es el tiempo (s);  $S_h$  es una fuente o sumidero en la ecuación de continuidad (m/s);  $\vec{\nabla}$  es el gradiente; div es la divergencia; u y v,  $S_x$  (m/s<sup>2</sup>) y  $S_y$  son las velocidades medias en vertical (m/s) y las fuentes o sumideros (m/s<sup>2</sup>) en las ecuaciones de cantidad de movimiento en el sentido x e y respectivamente. Vale aclarar que h, u y v son las incógnitas. Los términos de las ecuaciones de momentum  $S_x$  y  $S_y$  representan otras fuerzas tales como la fuerza de Coriolis, la fricción en el fondo, la acción del viento, etc.

#### 3.2 Implementación del modelo

En el presente trabajo se hizo uso del modelo digital del fondo de cauce e islas centrales empleado en los trabajos de Basile et al. (2016) y Peruzzo et al. (2017a), que se constituyó a

partir de datos existentes recopilados de FICH (2004 y 2006) y de DNVN-DPI (2014). Dichos datos no contienen relevamiento topográfico de las islas por lo que se emplearon datos de superficie y terreno desde Google Earth ©. Por otro lado, para las crecidas con los máximos caudales aquí simulados, la evidencia empírica demuestra que no se alcanza una ocupación relevante de las islas centrales por lo que no se consideraron de importancia a los fines de este trabajo, los mecanismos de escurrimiento presentes en el interior de las islas centrales. El fondo del cauce principal es representado mediante una malla de elementos triangulares irregulares, que fue construida a través del software BlueKenue©, con una distancia máxima entre nodos igual a 50 metros (M50). La constitución M50 quedó conformada por 40712 nodos y 79501 elementos (Peruzzo et al., 2017a). Las simulaciones realizadas fueron en régimen permanente, imponiendo como condición de borde aguas arriba el caudal permanente en la sección entrante y como condición de borde aguas abajo cotas de agua uniformes en toda la sección de borde. El modelo fue calibrado y validado en un mismo procedimiento para estados de flujo permanente en rango de aguas bajas a altas (incluyendo todos los escenarios seleccionados).

## 4 DETERMINACIÓN DE VARIABLES HIDRÁULICAS PARA CONDICIONES DE BORDE DEL MODELO

### 4.1 Curva de duración de niveles hidrométricos diarios

Para la definición de condiciones de borde del modelo en términos de niveles, se realizaron los estudios estadísticos descriptivos sobre la serie de niveles hidrométricos diarios de Puerto San Martín (PSM, km 448) disponibles desde 1905 a 2022 (DNCPyVN-DR, 2022). En la Figura 2 se presenta la curva de duración de niveles hidrométricos locales en PSM, conjuntamente con los estadísticos de la serie. También se grafican los 3 niveles hidrométricos correspondientes a escenario de aguas altas (3% de permanencia), aguas medias (50% de permanencia) y aguas medias bajas (80% de permanencia).

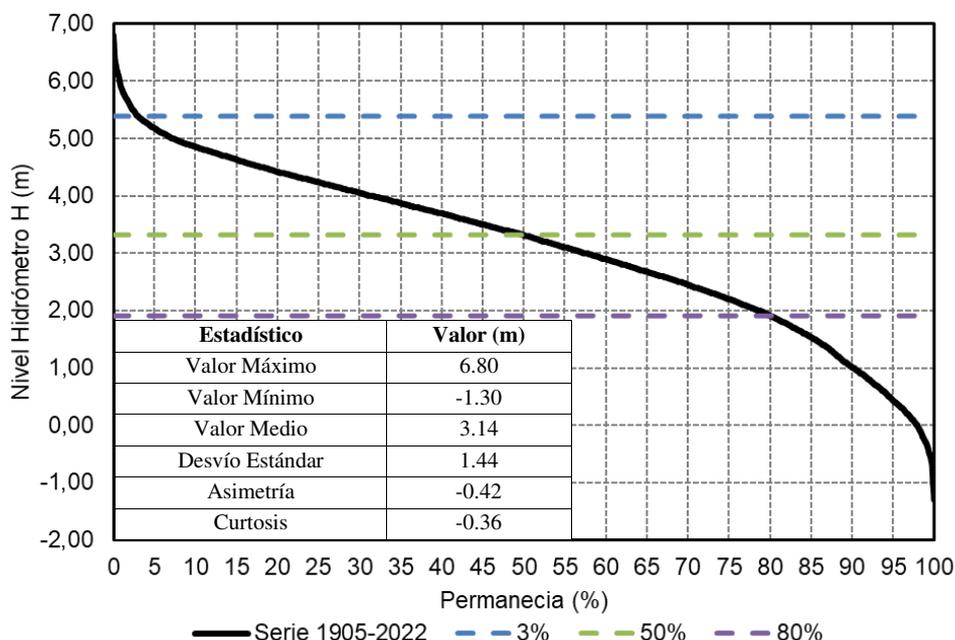


Figura 2: Curvas de duración de niveles hidrométricos diarios (referidos al cero local) en Hidrómetro Puerto San Martín. Serie Completa 1905-2022.

## 4.2 Niveles hidrométricos mínimos anuales y Relación H PSM -Q

Para la determinación de valores de niveles mínimos anuales en PSM para recurrencias R= 10 y 100 años, se aplicaron cinco modelos probabilísticos a las muestras de niveles hidrométricos diarios mínimos anuales correspondientes a los períodos de registro 1905-2022. En la [Figura 3 \(a\)](#), se presentan las probabilidades de no-excedencia determinadas con los diferentes modelos y la correspondiente probabilidad experimental, en función de los niveles hidrométricos mínimos anuales conjuntamente con los valores de los desvíos máximos  $D_{m\acute{a}x}$ , (valor absoluto máximo de la diferencia entre probabilidad teórica y experimental). Los mismos fueron comparados con el valor crítico del estadístico de Kolmogorov-Smirnov para un nivel de confianza del 95%, siendo este  $D_c=0.1252$ . Se descartó solamente el modelo de Frechet, ya que en este caso  $D_{m\acute{a}x}>D_c$ . Por otro lado, a partir de la consideración del menor  $D_{m\acute{a}x}$  se adoptó como modelo más representativo el de Galton. Se determinaron como niveles mínimos asociados a recurrencias R=10 y 100 años los valores de  $H_{min}=-0.41$  m y  $-1.19$  m respectivamente.

## 4.3 Relación nivel hidrométrico-caudal en PSM (km 448)

A los efectos de generar los caudales asociados a cada uno de los escenarios de trabajo, se determinó una relación nivel-caudal en el borde aguas arriba del dominio de modelación a partir de los niveles hidrométricos observados en el hidrómetro de PSM y los caudales aforados desde 1980 a 2023. La ecuación resultante del ajuste fue del tipo:

$$Q = 25.498 H_{PSM}^3 + 10.16 H_{PSM}^2 + 1982.3 H_{PSM} + 8626 \quad (4)$$

con Q en ( $m^3/s$ ) y  $H_{PSM}$  en (m) (referido al cero del hidrómetro).

Con la ecuación formulada se logró que, considerando una banda de oscilación posible del valor de caudal de  $\pm 11\%$ , para un mismo nivel de agua, se abarque un 90% de los valores de caudal aforados. En la [Figura 3\(b\)](#) se presentan los valores aforados de caudales, la curva ajustada al polinomio de 3er grado y los límites del rango de  $\pm 11\%$  en términos de caudales.

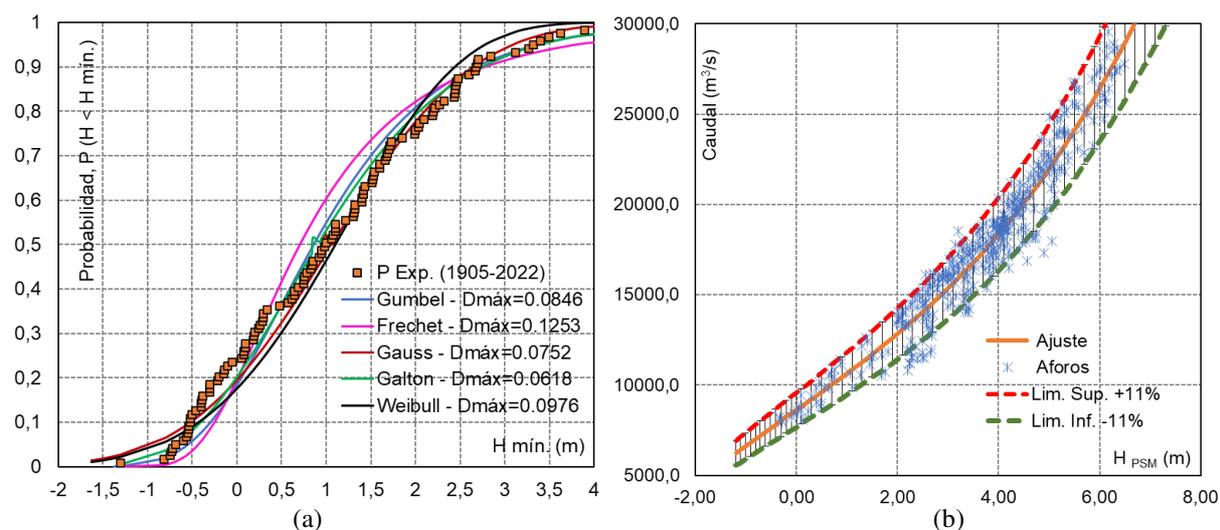


Figura 3: (a) Probabilidades experimentales y teóricas de no excedencia y niveles hidrométricos mínimos en PSM serie 1905-2022; (b) Relación Q- $H_{PSM}$  de valores aforados, ecuación de ajuste y límites  $\pm 11\%$  en caudales.

#### 4.4 Análisis de pendientes hidráulicas en el tramo

Para la definición de las condiciones de borde en términos de niveles de agua en el borde aguas abajo se procedió a realizar un análisis de las pendientes hidráulicas observadas entre los emplazamientos de los hidrómetros de Puerto San Martín (km 448) y Rosario (km 416), considerando la serie de pendientes observadas durante el período en el que se dispone de aforos de caudal (serie 1980-2023). Se adoptó una relación lineal entre la pendiente hidráulica en el tramo y el nivel hidrométrico en PSM. La ecuación de ajuste resultó:

$$\text{Pendiente Hidráulica} = 2.8706 \times 10^{-6} H_{PSM} + 1.89320 \times 10^{-5} \quad (5)$$

con Pendiente Hidráulica en (m/m) y  $H_{PSM}$  en (m). La dispersión de valores de pendiente respecto a la ecuación puede valorarse en un  $\pm 15\%$ , donde se establece un rango que comprende el 90% de las pendientes observadas. En la [Figura 4](#) se presenta la nube de puntos de las diferentes pendientes observadas conjuntamente con la ecuación lineal de vinculación.

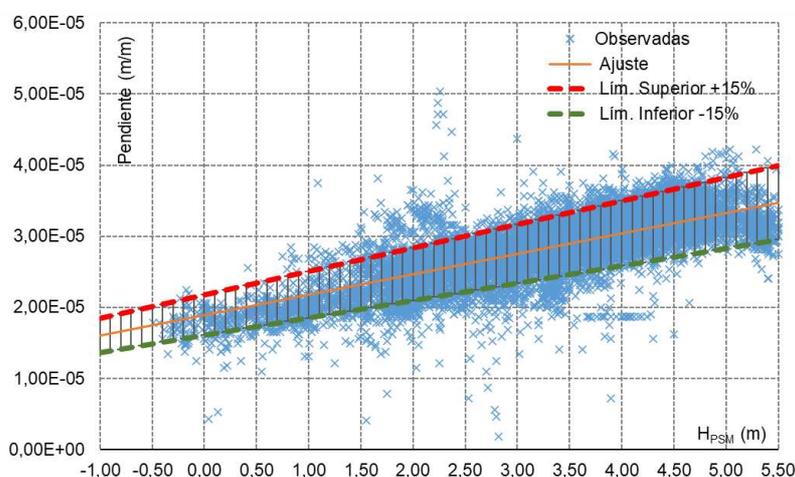


Figura 4: Relación Pendiente Hidráulica (entre PSM y ROS) –  $H_{PSM}$ .

#### 4.5 Resumen de variables hidráulicas consideradas para los escenarios modelados

En la [Tabla 1](#) se resumen las condiciones de borde e internas con las que se realizó la calibración y explotación del modelo hidrodinámico.

Escenario	$H_{PSM}$ (m) Km 448 (ref. al cero local)	Qent. (m <sup>3</sup> /s)	Pendiente (m/m)	$Z_{PSM}$ (m) IGN Km 448	$Z_{ROS}$ (m) IGN Km 416	Z (m) IGN Km 405
Permanencia 3%	5.39	23599	3.44E-05	9.02	7.92	7.54
Permanencia 50%	3.32	16252	2.85E-05	6.95	6.04	5.73
Permanencia 80%	1.91	12627	2.44E-05	5.54	4.76	4.49
Mínimo R=10 años	-0.41	7813	1.78E-05	3.22	2.65	2.46
Mínimo R=100 años	-1.19	6213	1.55E-05	2.44	1.94	1.77

Tabla 1: Síntesis de condiciones de borde para simulación.

## 5 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Una vez determinadas las variables hidráulicas a introducir como condiciones de borde (Q ent. y Z en Km 405) en el modelo se procedió al ajuste del coeficiente de rugosidad de Manning

mediante la simulación de los escenarios definidos previamente adoptando coeficientes de rugosidad de Manning de 0.024, 0.025 y 0.026 (s/m<sup>1/3</sup>). Entre los 15 escenarios simulados, se analizaron comparativamente los niveles observados en los hidrómetros de PSM y ROS y la pendiente hidráulica observada, comparándolas con las resultantes del modelo. En la [Tabla 2](#) se presentan los escenarios y resultados del modelo en lo que respecta a niveles hidrométricos y los errores entre valores observados y calculados. Además, se visualizan las pendientes hidráulicas observadas y modeladas con su error en términos porcentuales. Posteriormente, se llevó adelante una ponderación de errores mediante suma de cuadrados, arrojado valores de 4.2%, 2.2% y 2.4% en referencia a las pendientes y 0.043m, 0.019m y 0.027m en relación a las cotas, determinando entonces que las simulaciones con n=0.025 (s/m<sup>1/3</sup>) son las que arrojan los menores errores integrales en la comparación entre valores observados y computados.

Escenario	Condición de borde		Niveles IGN observados (m)		Coef. de Manning	Niveles IGN calculados (m)		Errores absolutos en cotas (m)		Pendientes (m/m)		
	Q (m <sup>3</sup> /s)	Z (m) km 405	Z PSM	Z ROS	n	Z PSM	Z ROS	Error PSM	Error ROS	Obs.	calculada	Error (%)
Perm. 3%	23599	7.54	9.02	7.92	0.024	8.94	7.91	0.08	0.01	3.44E-05	3.21E-05	-6.55%
					<b>0.025</b>	<b>9.01</b>	<b>7.94</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>		<b>3.34E-05</b>	<b>-2.77%</b>
					0.026	9.08	7.96	0.06	0.04		3.52E-05	2.50%
Perm. 50%	16252	5.73	6.95	6.04	0.024	6.80	6.02	0.15	0.02	2.84E-05	2.43E-05	-14.51%
					<b>0.025</b>	<b>6.86</b>	<b>6.04</b>	<b>0.09</b>	<b>0.00</b>		<b>2.55E-05</b>	<b>-10.18%</b>
					0.026	6.91	6.06	0.04	0.02		2.68E-05	-5.82%
Perm. 80%	12627	4.49	5.54	4.76	0.024	5.43	4.75	0.11	0.01	2.44E-05	2.13E-05	-12.60%
					<b>0.025</b>	<b>5.48</b>	<b>4.76</b>	<b>0.06</b>	<b>0.00</b>		<b>2.24E-05</b>	<b>-8.21%</b>
					0.026	5.53	4.78	0.01	0.02		2.35E-05	-3.72%
R=10	7813	2.46	3.22	2.65	0.024	3.23	2.67	0.01	0.02	1.78E-05	1.75E-05	-1.75%
					<b>0.025</b>	<b>3.27</b>	<b>2.68</b>	<b>0.05</b>	<b>0.03</b>		<b>1.84E-05</b>	<b>3.11%</b>
					0.026	3.31	2.70	0.09	0.05		1.93E-05	8.14%
R=100	6238	1.77	2.44	1.94	0.024	2.46	1.95	0.02	0.01	1.56E-05	1.58E-05	1.18%
					<b>0.025</b>	<b>2.49</b>	<b>1.96</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>		<b>1.65E-05</b>	<b>5.70%</b>
					0.026	2.53	1.97	0.09	0.03		1.73E-05	10.84%

Tabla 2: Niveles hidrométricos observados y calculados en PSM y ROS y Errores absolutos. Pendientes observadas y calculadas y Error porcentual.

Posteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad en términos de caudales que consistió en la proposición de variantes de modelación donde se dejó fija en cada escenario la condición de borde aguas abajo (misma cota) y aumento/disminuyó el caudal ingresante en ±11%, de acuerdo al nivel de confianza de la curva de ajuste H<sub>PSM</sub>-Q, planteada en apartado 4.2. Se verificó para todos los escenarios, que los niveles IGN definidos como condiciones de control en el apartado 4.3 resultan inferiores a las determinadas mediante modelación para un caudal 11% mayor (límite superior) y mayores a las determinadas para un caudal 11% menor (límite inferior).

## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Una vez definido el coeficiente de rugosidad de Manning de mejor ajuste, se realizó el análisis de resultados de las simulaciones de los diferentes escenarios, ejecutadas considerando dicho coeficiente de rugosidad (resaltados en [Tabla 2](#)). De cada simulación realizada se obtuvieron profundidades de flujo, niveles hidrométricos, componentes de velocidad  $u$  y  $v$  y módulo de velocidad para cada nodo del modelo. Además, se determinaron los perfiles hidráulicos longitudinales correspondientes a cada caudal y los perfiles transversales del módulo de la velocidad en km 448 (Hidrómetro Puerto San Martín), km 416 (Hidrómetro Rosario), km 412 y km 407.

En la [Figura 5 \(a\) y \(b\)](#) se presentan las profundidades de flujo y los valores del módulo de la velocidad integrada en vertical obtenidas para el escenario de permanencia 3%. Se observó que tanto en aquellas zonas donde el río desarrolla menores anchos y mayores profundidades y en las zonas de confluencia de brazos principal y secundarios, se observan las mayores velocidades de flujo integradas en la vertical. En la [Tabla 3](#) se presentan los valores de velocidad máxima alcanzada en el tramo en estudio para cada escenario.

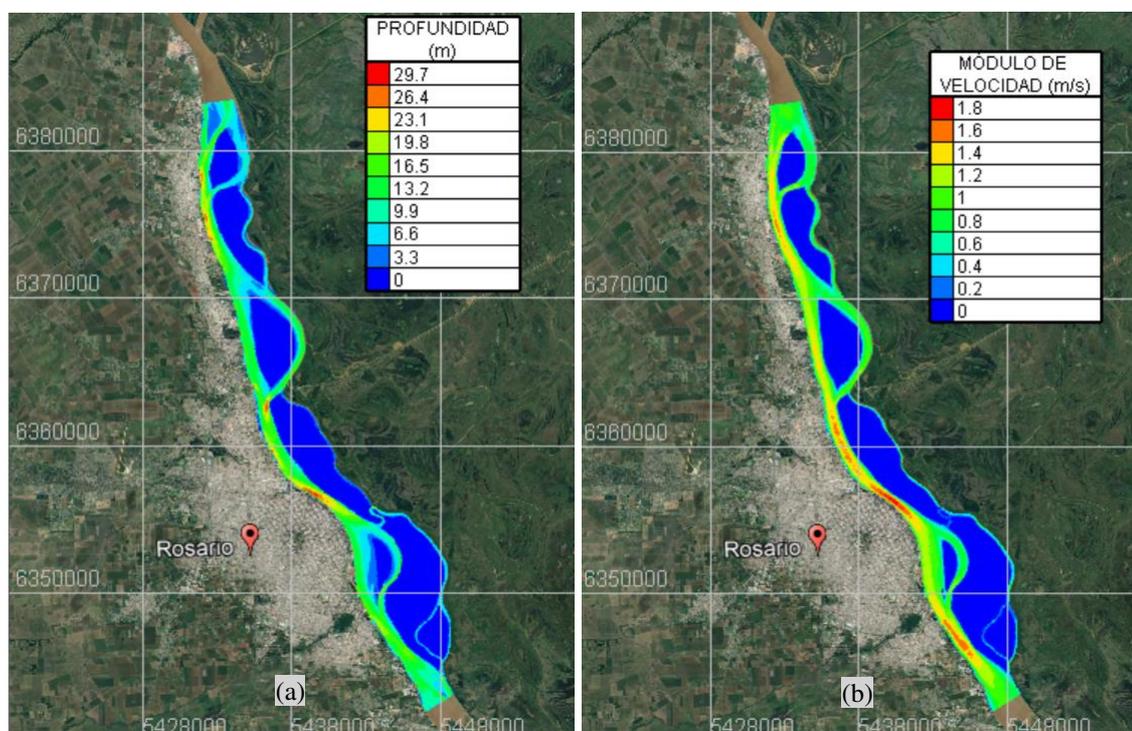


Figura 5: (a) Profundidad de flujo (m) para escenario de permanencia 3%; (b) Velocidad (m/s) para escenario de permanencia 3%.

Escenario	Q (m <sup>3</sup> /s)	Módulo de V <sub>máx tramo</sub> (m/s)
Permanencia 3%	23599	1.97
Permanencia 50%	16252	1.50
Permanencia 80%	12627	1.31
R=10	7813	1.27
R=100	6238	1.26

Tabla 3: Módulo de velocidades máximas obtenidas en el tramo para escenarios de permanencia y recurrencia.

En la [Figura 6\(a\)](#) se muestran los perfiles del módulo de velocidad obtenidos en la sección km 416 (Rosario) para cada uno de los escenarios modelados, en conjunto con el perfil de fondo y el tirante de agua en esa misma sección. En la [Figura 6\(b\)](#) se presentan los perfiles hidráulicos en conjunto con los niveles hidrométricos observados y el perfil longitudinal del fondo.

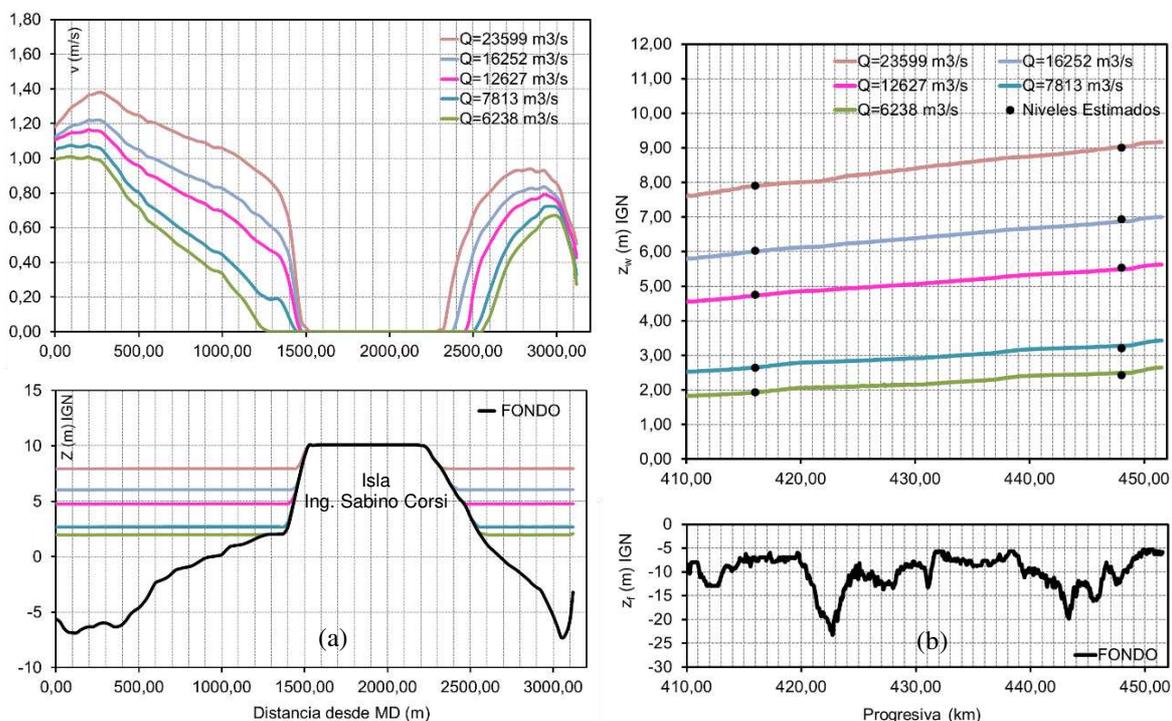


Figura 6: (a) Perfiles transversales de velocidad, niveles hidrométricos IGN y niveles de fondo en sección km 416 (Rosario) para los escenarios simulados; (b) Perfiles hidráulicos longitudinales calculados con niveles observados y perfil del fondo.

## 7 CONCLUSIONES

Se simuló la hidrodinámica del tramo del Río Paraná entre kms 405-452 mediante el modelo bidimensional horizontal TELEMAC 2D, en flujo permanente, para diferentes escenarios de permanencia de niveles hidrométricos y de recurrencia de niveles mínimos anuales. La constitución se realizó con elementos de la grilla tipo triangular con lado máximo de 50 m.

La relación nivel-caudal determinada en el borde aguas arriba verifica que el 90% de los caudales observados se encuentran dentro de un intervalo de error de  $\pm 11\%$ . Además, la relación determinada entre la pendiente hidráulica en el tramo en estudio y el nivel hidrométrico en PSM verifica que el 90% de las pendientes observadas se encuentran dentro de un intervalo de error de  $\pm 15\%$ . Ambos intervalos de error se consideran aceptables.

La calibración se realizó mediante el ajuste del coeficiente de Manning y el mejor resultado se logró para un valor de  $n=0.025$ , valor que se encuentra en un rango de  $\pm 10\%$  en relación a los ajustes realizados en simulaciones con modelos bidimensionales a ecuaciones completas de los trabajos antecedentes de Guerrero y Lamberti (2012), Basile et al (2016) y Peruzzo et al (2017a, 2017b y 2018), usando los modelos MIKE21C, CCHED2D y TELEMAC2d respectivamente.

Por otro lado, se verificó que, para todos los escenarios, los niveles IGN calculados a partir del modelo en los puntos de control (sitios de los hidrómetros PSM y ROS) resultan inferiores a las determinadas mediante modelación para un caudal 11% mayor (límite de confianza superior) y superiores a las determinadas para un caudal 11% menor (límite de confianza

inferior), en concordancia con lo planteado en la determinación de la relación nivel-caudal.

Asimismo, puede concluirse que la aplicación del modelo ha permitido reproducir satisfactoriamente la hidrodinámica del río para condiciones de aguas bajas, medias y altas, posibilitando la determinación de niveles hidrométricos, profundidades de flujo, pendientes hidráulicas, módulo de velocidades, componentes ortogonales de la velocidad en todos los elementos componentes de la grilla de discretización del dominio espacial de modelación. Los módulos de velocidades máximas determinados en el tramo fueron de 1.97 m/s en el escenario de permanencia 3% y 1.26 m/s para el escenario de bajante severa asociada a R=100 años.

Los archivos de salida del modelo TELEMAC 2D, mediante una sencilla adaptación, permitieron elaborar la información de entrada necesaria para la respectiva modelación de la dispersión de contaminantes realizada por otro equipo de trabajo.

## REFERENCIAS

- Basile, P.A., Riccardi, G.A., Peruzzo, F., Garcia, M., Modelación Hidrodinámica Bidimensional del Río Paraná Inferior. *Revista Aqua-LAC*, Vol. 8, Nº 2: 1-13, 2016. <https://aqua-lac.org/index.php/Aqua-LAC/article/view/157/134>
- Basile, P.A., Riccardi, G.A., Análisis de caudales del Río Paraná y contextualización de las bajantes en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 Y 2021/22. *Cuadernos Del CURIHAM*. e01. <https://doi.org/10.35305/curiham.ed23.e01>, 2023.
- CHC, Canadian Hydraulic Centre/National Research Council. Blue Kenue © Version 3.3.4. <http://www.chc.nrc.ca>, 2012.
- DNVN-DPI, Dirección Nacional de Vías Navegables Delegación Paraná Inferior, *Datos topobatómicos tramo km 232 – 480, Cartografía del río Paraná*. Rosario, 2014.
- DNCPyVN-DR, Dirección Nacional de Control de Puertos y Vías Navegables-Delegación Rosario, *Comunicación institucional*, 2022.
- FICH, Estudios Hidráulicos y Morfológicos Zona Isla de la Invernada, Río Paraná. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, 2004.
- FICH, Estudios Complementarios Hidráulicos y Morfológicos de la Zona de la Isla de la Invernada. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, 2006.
- García M., Basile P. A., and Riccardi G.A., Análisis de pendientes hidrométricas en grandes crecidas sobre tramo del río Paraná, *Cuadernos del CURIHAM*. 16:13–31. <https://doi.org/10.35305/curiham.v16i0.60>, 2012.
- Guerrero, M. y Lamberti, A. Bed-roughness investigation for a 2-D model calibration: the San Martín case study at Lower Paraná. *International Journal of Sediment Research*, 28 (4), 458-469, 2012. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(14\)60005-6](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60005-6)
- Hervouet, J. M., TELEMAC modelling system: an overview. *Hydrological Processes*. Vol. 14. Nº 13:2209-2210, 2000.
- Lang, P., Desombre, J., Ata, R., Goery, C., Hervouet, J.M., *TELEMAC-2D Software, User Manual*. 2014.
- Peruzzo, F., Riccardi, G.A., Basile, P.A., Garcia, M., Evaluación de un modelo hidrodinámico bidimensional en un tramo del cauce principal del río Paraná. *VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Córdoba. Argentina, 2017a.
- Peruzzo, F., Riccardi, G.A., Basile, P.A., Análisis de las modificaciones en la hidrodinámica en un tramo del Río Paraná inferior mediante la aplicación del modelo matemático telemac-2d. *Cuadernos Del CURIHAM*. 23:35–49. <https://doi.org/10.35305/curiham.v23i0.29>, 2017b
- Peruzzo, F., Riccardi, G.A., Basile, P.A.; Implementación del Modelo Hidrodinámico Telemac 2-D en un tramo del río Paraná Inferior. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. IAHR. Buenos Aires Argentina, 1941-1952, 2018.