

Implementación del modelo matemático Telemac-2D para el análisis de la evolución de la hidrodinámica en un tramo del río Paraná inferior

Florencia Peruzzo^{1,2,4}, Gerardo Riccardi^{1,2,3} y Pedro A. Basile^{1,2}

¹ Departamento de Hidráulica, Escuela de Ingeniería Civil, FCEIA, UNR

² Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA, UNR

³ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas

E-mail: fperuzzo@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta la implementación del modelo de simulación hidrodinámica bidimensional TELEMAC-2D en el tramo comprendido entre el km 410 y el km 452 del río Paraná Inferior, empleando una grilla triangular irregular. Se crearon dos constituciones a partir de relevamientos batimétricos realizados en los años 2004-2006 y 2010-2012 y se efectuaron simulaciones para flujo permanente e impermanente. En flujo permanente se utilizaron caudales aforados comprendidos entre 11640 m³/s y 28600 m³/s, mientras que, en flujo impermanente se empleó la serie de caudales registrada en el período 01/01/2004 al 31/12/2004 y en el período 16/03/2015 al 15/03/2016 para cada constitución del modelo respectivamente. Las variables de ajuste fueron los niveles observados en los hidrómetros de Rosario (ROS-km 416) y Puerto San Martín (PSM-km 448), empleándose como parámetro de calibración el coeficiente de rugosidad de Manning. Además, las particiones de caudales en las cuatro bifurcaciones del tramo se compararon con las mediciones disponibles, junto con las variaciones de las áreas mojadas y las distribuciones de caudales específicos en distintas secciones transversales, observándose una variación en los dos primeros parámetros, mientras que el tercero permanece prácticamente estable.

Palabras clave: Simulación hidrodinámica bidimensional, Telemac-2D, Río Paraná Inferior.

INTRODUCCIÓN

Los grandes ríos aluviales de llanura representan un recurso natural de inestimable valor ambiental para un territorio, por ello la sustentabilidad de tales ambientes fluviales resulta de vital importancia. El río Paraná, río aluvial que recorre la zona litoral de nuestro país, forma parte de la Cuenca del Plata, junto con los ríos Paraguay y Uruguay, sus afluentes y varios humedales como los Esteros del Iberá, el Bañado la Estrella y la gran planicie aluvial propia del río. Las aguas superficiales de dicha cuenca son recolectadas principalmente por el denominado Corredor Fluvial Paraná - Paraguay, que se destaca por la presencia de grandes extensiones de humedales (SAyDS, 2013). La magnitud de los volúmenes de escurrimiento y la longitud de su recorrido hacen que el mismo se encuentre entre los ríos de llanura más importantes del mundo. El río Paraná tiene usos múltiples entre los que se destacan el aprovechamiento hidroeléctrico, el abastecimiento de agua, el uso como vía de comunicación para navegación comercial y recreacional, entre otros. En este contexto la modelación hidrodinámica se ha convertido en una herramienta esencial para la planificación y gestión de los recursos hídricos como también para cuantificar el impacto de las actividades humanas para la protección de los mismos y del medio ambiente (Singh y Woolhiser, 2002). El tramo del río Paraná que se estudia en este trabajo abarca desde el km 452 hasta el km 410 de la ruta de navegación troncal Santa Fe – Océano. Existen antecedentes de simulaciones con modelos matemáticos aplicados satisfactoriamente en el tramo, tales como, modelos bidimensionales completos (FICH, 2006; Guerrero y Lamberti, 2013; Basile et al., 2015) y modelos cuasi-bidimensionales de baja complejidad (Peruzzo et al., 2016). Asimismo Garcia et al. (2013) ha llevado adelante una modelación cuasi 2D en cauce principal y planicie de inundación en un tramo de 208 km entre la ciudades de Diamante y Ramallo, incluyendo el tramo en estudio.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es evaluar, mediante la simulación numérica bidimensional, las modificaciones en la hidrodinámica a partir de la evolución morfológica en un tramo del río Paraná Inferior entre el km 410 y el km 452, en los periodos de 2004-2006 y 2010-2012. Para esto se procedió a comparar partición de caudales en las cuatro bifurcaciones del tramo y distribución transversal de caudales específicos y áreas mojadas en distintas secciones transversales.

TRAMO EN ESTUDIO

El área en estudio, la cual se presenta en la Figura 1, se limitó a un tramo del río Paraná Inferior comprendido entre el km 410 y el km 452 de la ruta de navegación Santa Fe – Océano contando con aproximadamente 42 km de extensión. El cauce principal en este tramo se desarrolla sobre la margen santafesina abarcando distintas localidades como Puerto San Martín, San Lorenzo, Fray Luis Beltrán, Capitán Bermúdez, Granadero Baigorria, Rosario y Villa Gobernador Gálvez, a lo largo de la cual se desarrolla un importante cordón industrial junto con la presencia de numerosas instalaciones portuarias. En

este tramo, el río fluye en una dirección predominante norte-sur presentando una configuración cauce principal e islas, caracterizándose con un ancho medio para el tramo completo de 1580 m (FICH, 2004). 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. Esta gran planicie asociada se inunda parcial o totalmente durante las crecidas. El caudal medio anual es de 17500 m³/s según caudales registrados en Puerto San Martín (PSM, km 448) durante el período 1970-2014 (Basile et al., 2015). Durante la crecida extraordinaria de 1983 el mayor caudal de agua fue cerca de 60000 m³/s, casi 30000 m³/s circulaban sobre el cauce principal (García et al., 2013). Para dicho evento, el nivel máximo de agua en Rosario (ROS, km 416) fue de 9.21 m IGN y el valle estuvo completamente inundado con una profundidad media de 4 m de agua. Mientras que en PSM el menor caudal registrado fue alrededor de 7000 m³/s (Basile et al., 2015). La pendiente hidráulica que se verifica en el tramo es de 1.4×10^{-5} m/m para aguas bajas y de 4.3×10^{-5} m/m para aguas altas.

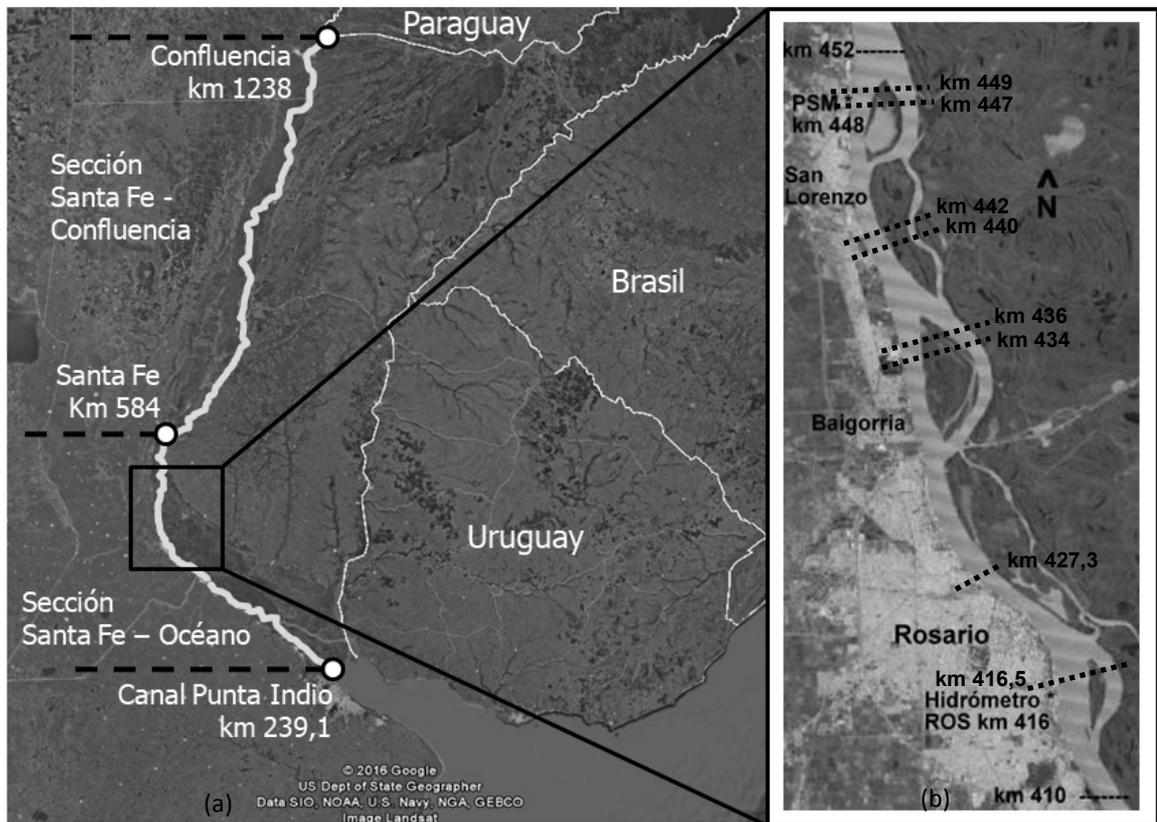


Figura 1.- (a) Vía Navegable Troncal Confluencia – Océano; (b) Ubicación del tramo en estudio comprendido entre el km 410 y el km 452 de la ruta de navegación Santa Fe – Océano. Google Earth©.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MODELACIÓN

El modelo de simulación implementado es el TELEMAC-2D (Hervouet, 2000) acoplado a la plataforma de pre y postprocesamiento de datos y resultados bajo entorno de ventanas Blue Kenue© (CHC-NRC, 2011). TELEMAC-2D es un modelo bidimensional de uso gratuito, basado en las ecuaciones para aguas poco profundas bidimensionales en horizontal completas, las cuales son resueltas numéricamente mediante el

método de elementos finitos (Galland et al., 1991). Las 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:

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

Momentum en dirección y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \vec{\nabla} v) \quad (2)$$

Donde: h es la profundidad de flujo; g es la aceleración de la gravedad; v_t es el coeficiente de difusión; Z es el nivel de la superficie libre; t es el tiempo; S_h es una fuente o sumidero en la ecuación de continuidad; $\vec{\nabla}$ es el gradiente; div es la divergencia; u y v, S_x y S_y son las velocidades medias en vertical y las fuentes o sumideros en las ecuaciones de cantidad de movimiento en el sentido x e y respectivamente.

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO TELEMAT-2D

La aplicación del modelo se inició con la definición topobatimétrica del cauce principal, constituyendo el modelo digital del terreno del fondo del río, las márgenes e islas de dos escenarios morfológicos correspondientes a los períodos de años 2004-2006 y 2010-2012 a partir de datos existentes recopilados de relevamientos realizados por Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - UNL (FICH, 2004 y 2006) y por la Dirección Nacional de Vías Navegables - Delegación Paraná Inferior (DNVN-DPI, 2014) respectivamente. Se digitalizaron las curvas de nivel del fondo georeferenciadas al sistema de coordenadas POSGAR 94 Faja 5 Datum WGS 1984 con cotas referidas al cero IGN. Se ajustó la base espacial del área de modelación mediante un mosaico construido a partir de 4 cartas náuticas provistas por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN, 2014) [Figura 2(a)]. Luego, se crearon dos representaciones espaciales del fondo del cauce principal utilizando mallas computacionales. Mediante el software Blue Kenue©, se construyeron dos grillas triangulares irregulares con una distancia máxima entre nodos igual a 50 m, permitiendo capturar toda la información disponible de los relevamientos existentes. La constitución M04-06, obtenida a partir de los relevamientos de la FICH, quedó conformada por 40712 nodos y 79501 elementos. Mientras que la constitución M10-12, elaborada sobre la base de la información relevada por DNVN-DPI, quedó conformada por 67093 nodos y 132124 elementos. En la Figura 2(b) se presenta una imagen de ambas constituciones donde se observan los niveles del lecho expresados en m referidos al cero IGN. Vale aclarar que la constitución M10-12 se extendió hasta el km 405 para incluir la vinculación con el riacho La Brava.

Para cada constitución se realizaron simulaciones en flujo permanente usando un rango de caudales entre 11640 m³/s hasta 28600 m³/s (aguas bajas a altas). Los caudales empleados en las simulaciones corresponden a caudales aforados por FICH (2004 y 2006) y por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación en la estación Paraná-

Timbúes. Además, se realizaron simulaciones en flujo impermanente reproduciendo las series de caudales observada en la estación Paraná-Timbúes en el período 01/01/2004 al 31/12/2004 para la constitución M04-06 y en el período 16/03/2015 al 15/03/2016 para las constitución M10-12, abarcando esta última la crecida del río Paraná de los meses de enero y febrero de 2016. El parámetro de calibración considerado fue el coeficiente de rugosidad de Manning η y las variables de ajuste fueron los niveles de agua observados en los hidrómetros de Puerto San Martín (PSM, km 448) y Rosario (ROS, km 416). Para las simulaciones en flujo permanente, los caudales aforados fueron ingresados como condición de borde aguas arriba y la condición de borde aguas abajo se constituyó con la correspondiente altura de agua asociada al caudal entrante. Esta altura de agua se obtuvo extrapolando niveles desde el Hidrómetro de Rosario empleando la pendiente de la superficie libre calculada entre PSM y ROS para la fecha de aforo. Para las simulaciones en flujo impermanente, la condición de borde aguas arriba fue la serie de caudales diarios registrados en la estación Paraná-Timbúes en el período 01/01/2004 al 31/12/2004 para la constitución M04-06, y para M10-12 la serie registrada en el período 16/03/2015 al 15/03/2016. En lo que respecta a la condición de borde aguas abajo para ambas constituciones se empleó una relación altura-caudal.

Los resultados de las simulaciones en flujo permanente de la constitución M04-06 se contrastaron con mediciones de caudales realizadas por FICH (2004, 2006) en las cuatro bifurcaciones que presenta el tramo en estudio: 1. Isla El Banco-km 449; 2. Isla Rosita-km 440; 3. Isla Carlota-km 436 y 4. Isla Ing. Sabino Corsi-km 416.5. También se compararon con los caudales estimados en el trabajo de Basile et al. (2015) y Peruzzo et al. (2016). Las cuatro bifurcaciones consideradas se muestran en la Figura 1b. Además, los resultados se compararon con distribuciones transversales de caudales específicos determinados a partir de mediciones de campo con ADCP realizadas también por la FICH en el período noviembre-diciembre 2004 y febrero-marzo 2006 (FICH, 2006) en distintas secciones transversales a lo largo del dominio. Estas comparaciones se presentaron en el trabajo de Peruzzo et al. (2017) obteniendo una buena aproximación entre valores observados versus calculados. Por su parte, los resultados de la constitución M10-12 se contrastaron con caudales aforados en las bifurcaciones 1 a 3 y con perfiles transversales de velocidad medidos con ADCP durante la campaña realizada en conjunto entre la Universidad de Bologna (UNIBO) y la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) los días 29 de junio a 3 de julio de 2009 (Kazimierski, 2014).

Para el análisis de la evolución de la hidrodinámica se estudió, en primer lugar, la partición de caudales en las cuatro bifurcaciones que forman parte del tramo. Para cada uno de los 7 escenarios de flujo permanente simulados en ambas constituciones se estimaron los caudales derivados por el brazo derecho e izquierdo en estas secciones y se compararon entre sí. Conjuntamente se analizó la variación del área mojada en las secciones analizadas comparando las áreas obtenidas a partir de ambas constituciones. En segundo lugar, se calcularon distribuciones de caudales específicos y velocidades en distintas secciones transversales del dominio para ambas constituciones, se compararon entre sí y con las estimadas en campaña.

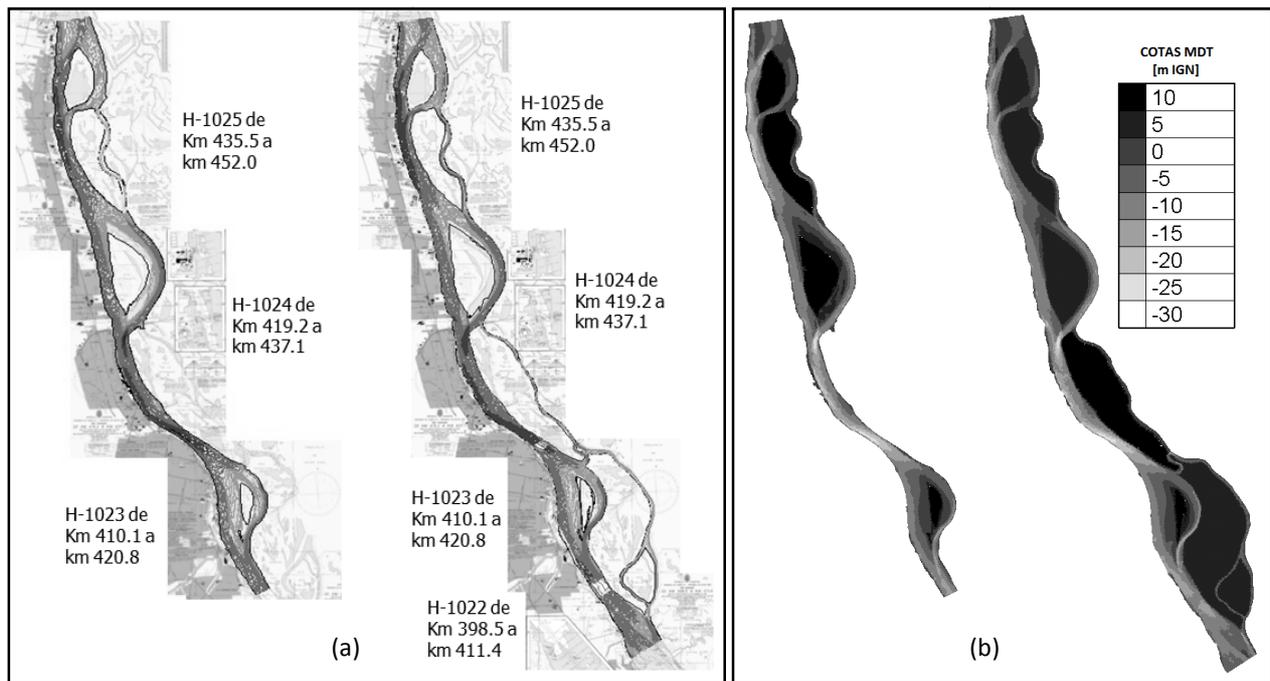


Figura 2.- (a) Curvas de nivel digitalizadas según relevamientos de FICH (2004-2006) y DNVN-DPI (2010-2012) con cartas náuticas del SHN; (b) Constitución del modelo M04-06 y M10-12 y MDT.

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Simulaciones en flujo permanente e impermanente

En flujo permanente, el rango de valores del coeficiente de rugosidad de Manning que proporcionó el mejor ajuste en términos de niveles estuvo comprendido entre 0.023 a 0.025. El error relativo porcentual entre niveles observados y simulados se acota en 2.07 % para M04-06, siendo el valor medio 0.59 %. Mientras que para M10-12 resulta 1.22 % y 0.41 % respectivamente. En la Tabla 1 se muestra una síntesis de los parámetros observados y calculados para cada simulación para la constitución M04-06 y en la Tabla 2 para la constitución M10-12.

Se realizaron simulaciones en flujo impermanente reproduciendo las series de caudales observada en la estación Paraná-Timbúes en el período 01/01/2004 al 31/12/2004 para la constitución M04-06 y en el período 16/03/2015 al 15/03/2016 para las constitución M10-12, abarcando esta última la crecida del río Paraná de los meses de enero y febrero de 2016. Se realizaron simulaciones con el coeficiente de rugosidad de Manning variando entre $0.022 \leq \eta \leq 0.025 \text{ s/m}^{1/3}$ y empleando un intervalo de integración temporal igual a 10 s. Para cuantificar la comparación de las series de niveles simuladas versus las series observadas se utilizaron los siguientes indicadores: el error típico (ET), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) y el coeficiente de correlación R^2 . En la Tabla 3 se presentan los valores de referencia para evaluar el ajuste según los distintos indicadores. La simulación que mejor calidad de ajuste ha alcanzado al utilizar los calificadores de errores referidos, correspondió a un coeficiente de rugosidad $\eta=0.025$ para la constitución M04-06 y $\eta=0.023$ para la constitución M10-12. En la Tabla 4 se muestran los valores calculados de los indicadores conjuntamente con la calificación de los errores. En las Figuras 3 y 4 se exponen las

variaciones de niveles observadas y simuladas en los dos sitios de comparación para el intervalo de integración temporal para las constituciones M04-06 y M10-12 respectivamente. En régimen impermanente el modelo reproduce adecuadamente las series de niveles observados en PSM y ROS. Para ambas constituciones se clasifica entre buena y muy buena la aproximación para un intervalo de tiempo de cálculo de 10 s.

Para ambos estados de flujo, los niveles calculados se encuentran dentro del entorno de variación obtenido a partir de caudales y niveles aforados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación en la estación Paraná-Timbúes en el período 2000-2016.

Tabla 1.- Niveles Observados, Calculados y Errores porcentuales para constitución M04-06.

Fecha	Q [m ³ /s]	z _w [m] IGN obs. (z _{wo})		η [s/m ^{1/3}]	z _w [m] IGN calc. (z _{wc})		E _r = 100 (z _{wc} /z _{wo})-1 [%]	
		PSM	ROS		PSM	ROS	PSM	ROS
31/08/2001	11640	5.17	4.46	0.025	5.18	4.47	0.19	0.22
21/02/2006	14310	6.05	5.23	0.025	6.07	5.24	0.33	0.19
09/06/2005	17490	7.12	6.23	0.025	7.18	6.25	0.84	0.32
21/12/2004	19570	7.92	6.93	0.025	7.90	6.93	0.25	0.01
02/04/2003	22740	8.59	7.52	0.025	8.68	7.56	1.05	0.53
16/08/1982	26760	9.16	8.03	0.024	9.35	8.07	2.07	0.50
04/01/1983	28600	9.98	8.85	0.024	10.12	8.88	1.40	0.34

Tabla 2.- Niveles Observados, Calculados y Errores porcentuales para constitución M10-12.

Fecha	Q [m ³ /s]	z _w [m] IGN obs. (z _{wo})		η [s/m ^{1/3}]	z _w [m] IGN calc. (z _{wc})		E _r = 100 (z _{wc} /z _{wo})-1 [%]	
		PSM	ROS		PSM	ROS	PSM	ROS
04/10/2010	14460	5.90	5.06	0.023	5.93	5.05	0.43	0.17
12/12/2013	16688	6.80	5.99	0.023	6.88	5.99	1.22	0.02
29/06/2012	17309	7.07	6.16	0.023	7.06	6.14	0.13	0.40
16/10/2014	19096	7.77	6.88	0.023	7.78	6.85	0.13	0.44
18/12/2015	21602	8.43	7.35	0.024	8.44	7.32	0.07	0.41
19/08/2014	22199	8.66	7.74	0.023	8.74	7.72	0.92	0.26
18/02/2010	24628	9.52	8.58	0.023	9.61	8.56	0.95	0.23

Tabla 3.- Valores de referencia para la evaluación del ajuste según distintos indicadores.

Condición	Error Típico ET (m)	Eficiencia de Nash-Sutcliffe NS	Coefficiente de Correlación R ²
Muy Bueno (MB)	≤ 0.05	≥ 0.75	≥ 0.85
Bueno (B)	0.05-0.10	0.74-0.65	0.84-0.65
Satisfactorio (S)	0.10-0.15	0.64-0.50	0.74-0.50
Pobre (P)	>0.15	< 0.50	<0.50

Tabla 4.- Valores de indicadores y calificación de error.

Indicador	Constitución M04-06 - $\eta=0.025$ - $\Delta t = 10$ s		Constitución M10-12 - $\eta=0.023$ - $\Delta t = 10$ s	
	PSM	ROS	PSM	ROS
Error Típico	0.084 / B	0.093 / B	0.049 / MB	0.056 / B
NS	0.955 / MB	0.973 / MB	0.990 / MB	0.996 / MB
R ²	0.988 / MB	0.981 / MB	0.998 / MB	0.996 / MB

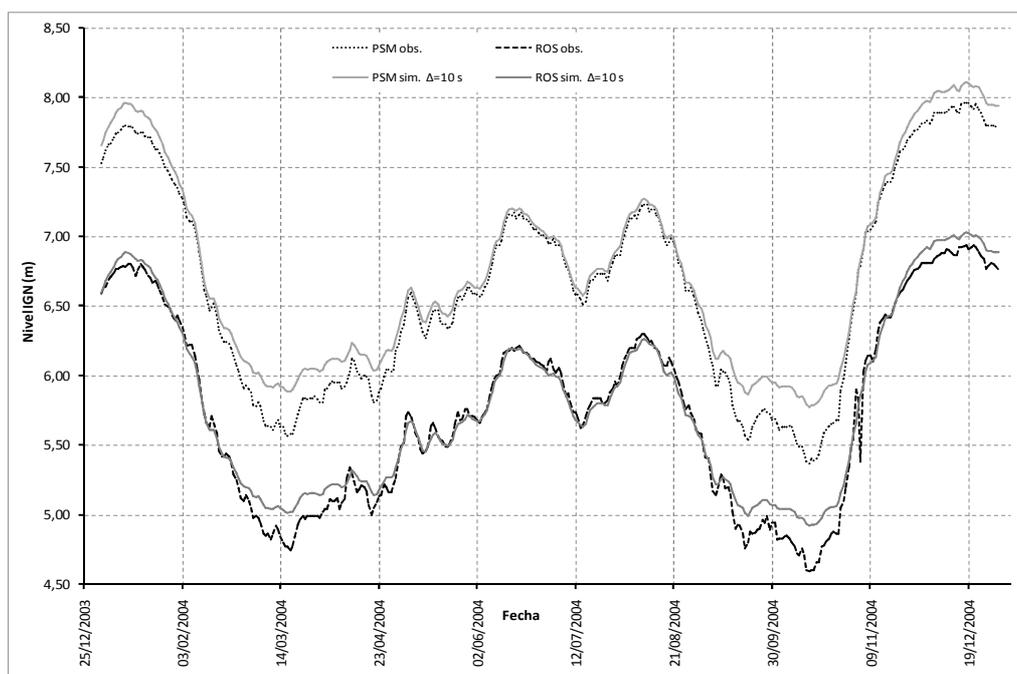


Figura 3.- Perfiles de superficie libre observados y simulados para la serie 01/01/2004 al 31/12/2004 - Constitución M04-06.

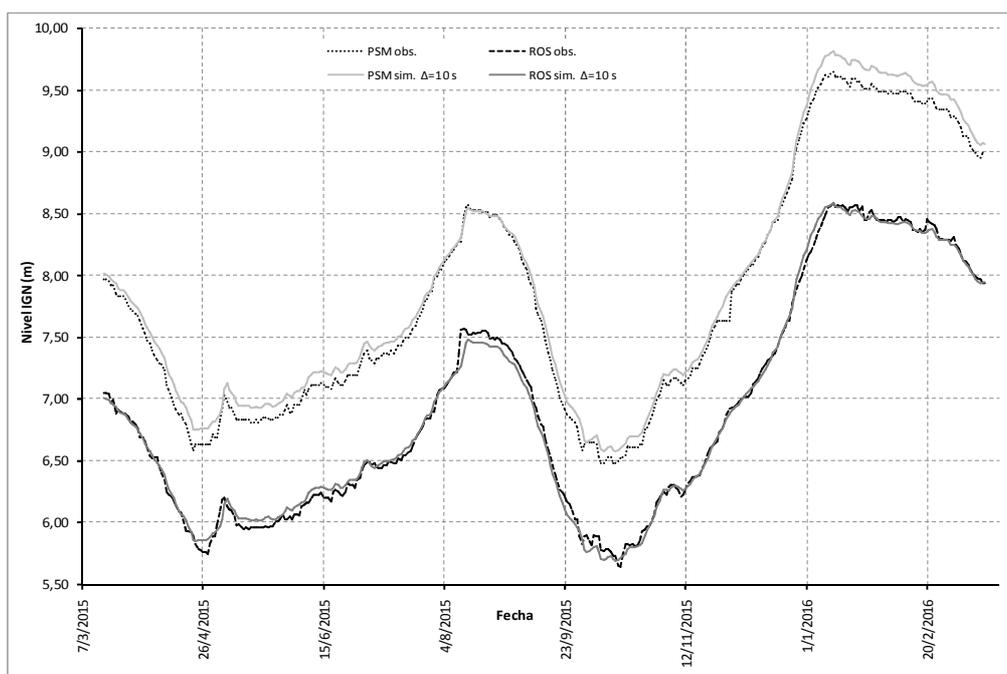


Figura 4.- Perfiles de superficie libre observados y simulados para serie 16/03/2015 al 15/03/2016 - Constitución M10-12.

Análisis de resultados de las simulaciones en flujo permanente para la Constitución M10-12

Para estudiar la distribución de caudales en las bifurcaciones del dominio se contaba con caudales aforados en las tres primeras durante la campaña realizada por UNIBO – FICH los días 29 de junio a 3 de julio de 2009. En primer lugar, se estimaron los caudales derivados en las distintas secciones para cada uno de los 7 escenarios de flujo permanente simulados. En la Tabla 5 se presentan los porcentajes del caudal total Q derivados en cada bifurcación para el brazo derecho (BD) y para el brazo izquierdo (BI), para cada simulación. Se observa que en las secciones correspondientes a los km 449, 440 y 436 el porcentaje del caudal total derivado por el brazo derecho es superior para aguas bajas que para aguas altas, mientras que en la sección correspondiente al km 416.5 este porcentaje es similar para ambos estados. En las cuatro secciones analizadas el brazo derecho corresponde al curso principal. Los caudales aforados por UNIBO - FICH (Kazimierski, 2014) en las bifurcaciones corresponden a caudales distintos a los empleados en las simulaciones para la etapa de calibración. Para poder determinar los valores a comparar con los aforos, se procedió a ajustar relaciones lineales entre caudal total Q simulado versus los respectivos valores de porcentaje de caudal derivado por cada brazo en cada bifurcación. Una vez halladas estas relaciones se obtuvieron los porcentajes en función de los caudales aforados para luego calcular los errores relativos de su comparación con los porcentajes observados. En la Tabla 6 se presentan los resultados de las comparaciones realizadas en el brazo derecho para las tres primeras bifurcaciones. El error relativo porcentual entre porcentaje de caudal observado y simulado se acota en 5.83 %, siendo el valor medio 2.51 %. Se concluye que los valores se consideran aceptables.

A su vez, se contaba con perfiles transversales de velocidad medidos con ADCP en distintas secciones del dominio durante la misma campaña mencionada anteriormente (Kazimierski, 2014). Se procedió a realizar una simulación representativa de los días de campaña para poder comparar los perfiles observados. Como condición de borde aguas arriba se impuso un caudal de ingreso igual a $13740 \text{ m}^3/\text{s}$ y aguas abajo una altura de agua igual a 4.48 m. Con los resultados obtenidos en la simulación se calcularon los perfiles de velocidad en las distintas secciones transversales donde se contaba con valores observados. En la Figura 5 se presenta la comparación entre perfiles de velocidad aforados en el brazo derecho (BD) y en el brazo izquierdo (BI) con los resultados obtenidos en las simulaciones para caudal $Q=13740 \text{ m}^3/\text{s}$. La calidad del ajuste fue evaluada con el coeficiente de correlación R^2 , la raíz del error cuadrático medio RECM y el sesgo porcentual PBIAS. En la Tabla 7 se presentan los valores de referencia para evaluar el ajuste según los indicadores utilizados mientras que en la Tablas 8 se muestran los valores calculados para los mismos y las condiciones alcanzadas en las secciones donde se realizó la comparación. Vale aclarar que valores positivos del PBIAS indican una subestimación por parte del modelo mientras que valores negativos indican sobrestimación. El ajuste según los indicadores resultó entre satisfactorio y muy bueno, considerándolo aceptable. En la Figura 1 se muestra la ubicación de las secciones transversales estudiadas que se corresponden a los km 447, 442, y 434.

Tabla 5.- Porcentaje del caudal total Q derivado por BD y BI en las bifurcaciones para cada simulación - Constitución M10-12.

Fecha	Q [m ³ /s]	Bifurcación 1		Bifurcación 2		Bifurcación 3		Bifurcación 4	
		BD (%)	BI (%)						
4/10/2010	14460	83.16	16.84	96.62	3.38	69.78	30.22	75.78	22.30
12/12/2013	16688	80.43	19.57	94.91	5.09	68.18	31.82	75.53	22.36
29/6/2012	17309	79.99	20.01	94.62	5.38	67.97	32.03	75.65	22.30
16/10/2014	19096	78.33	21.67	93.85	6.15	67.28	32.72	75.41	22.53
18/12/2015	21602	76.99	23.01	93.27	6.73	66.80	33.20	75.27	22.64
19/8/2014	22199	76.31	23.69	93.03	6.97	66.54	33.46	75.37	22.52
18/2/2010	24628	74.78	25.22	92.40	7.60	66.00	34.00	75.33	22.61

Tabla 6.- Porcentaje del caudal total Q derivado por BD en las bifurcaciones del tramo en estudio, contrastación con datos observados.

Fecha Aforo	Q (m ³ /s)	Bifurc.	% derivado BD		E _r (%)
			Obs.	Calc.	
29 de junio – 03 de julio, 2009	13224	1	79.28	83.90	5.83
	13910	2	94.87	96.29	1.50
	13408	3	69.38	69.52	0.21

Tabla 7.- Valores de referencia para la evaluación de ajuste según distintos indicadores.

Condición	Coefficiente de Correlación R ²	Raíz del error cuadrático medio RECM (m/s)	Sesgo porcentual PBIAS
Muy Bueno (MB)	≥ 0.85	≤ 0.10	±10
Bueno (B)	0.84-0.65	0.10-0.20	±10 - ±15
Satisfactorio (S)	0.74-0.50	0.20-0.30	±15 - ±25
Pobre (P)	<0.50	> 0.30	> ±25

Tabla 8.- Valores de indicadores y calificación de error – Comparación entre perfiles de velocidad simulados y observados.

Indicador	Sección transversal					
	km 447 BD	km 447 BI	km 442 BD	km 442 BI	km 434 BD	km 434 BI
R ²	0.87 / MB	0.71 / B	0.81 / B	0.67 / B	0.82 / B	0.75 / B
RECM	0.17 / B	0.11 / B	0.13 / B	0.24 / S	0.10 / MB	0.14 / B
PBIAS	-13.77 / B	10.11 / B	7.32 / MB	21.74 / S	0.19 / MB	14.87 / B

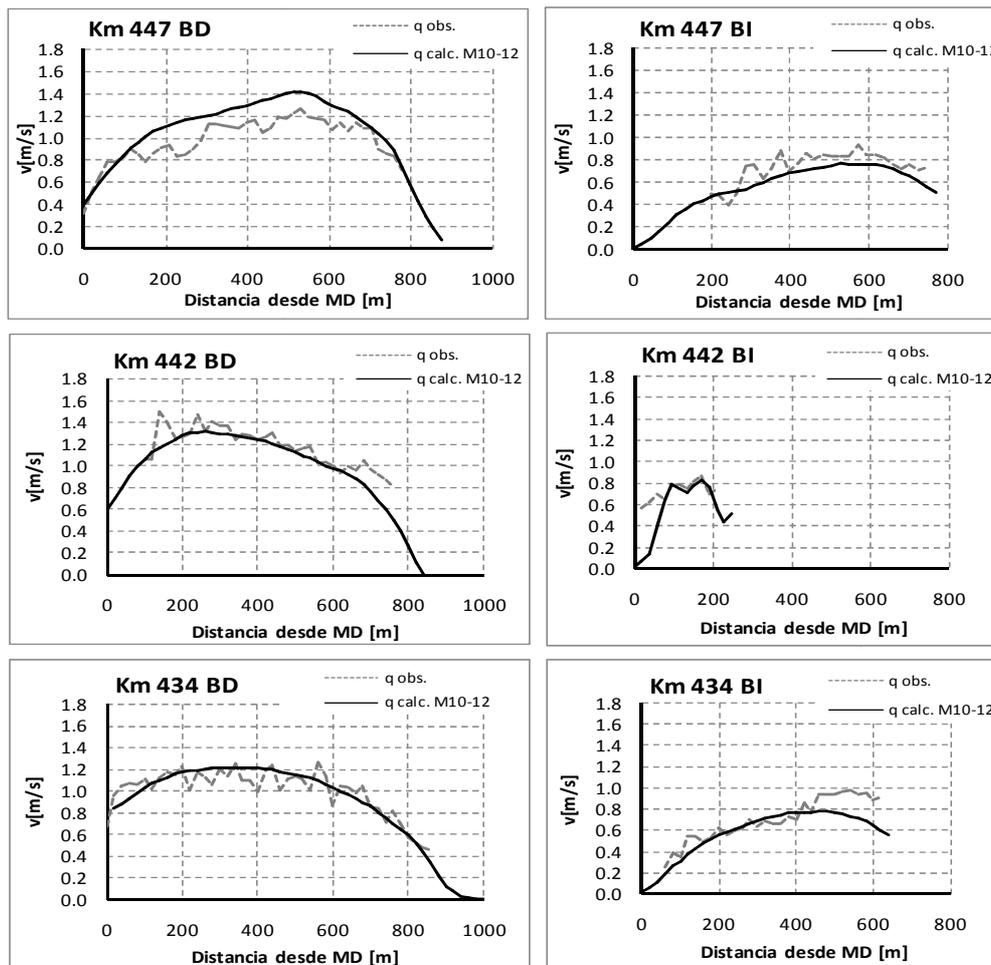


Figura 5.- $Q=13740 \text{ m}^3/\text{s}$. Comparación entre perfiles de velocidad simulados y observados (Kazimierski, 2014).

Evolución temporal de la distribución de caudales en las bifurcaciones

A partir de los resultados presentados en Peruzzo et al. (2017) y en la Tabla 6 se realizó un análisis conjunto que se presenta en la Figura 6. En la misma se muestran los porcentajes del caudal total Q derivados en cada bifurcación para el brazo derecho (BD) y para el brazo izquierdo (BI) para los escenarios de flujo permanente simulados en ambas constituciones. Como puede observarse, los caudales Q empleados en las simulaciones para este estado de flujo fueron distintos para una constitución que para la otra. Para realizar el análisis de la evolución temporal de la partición de caudales en las bifurcaciones se evaluaron relaciones lineales que permiten obtener el porcentaje de caudal total derivado por el brazo derecho en cada bifurcación en función del caudal total. Se analizaron dos estados de agua. Un estado de aguas medias bajas y otro de aguas medias altas, con caudales totales de $14000 \text{ m}^3/\text{s}$ y $20000 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. Mediante dichas relaciones se calcularon los porcentajes para ambos estados en cada constitución y se determinaron las diferencias entre los mismos. En la Tabla 9 se presentan los resultados de las comparaciones realizadas, en cuanto a la partición de caudales en las cuatro bifurcaciones del tramo se observa un incremento de los porcentajes del caudal total derivado por el brazo derecho, y una correspondiente disminución por el brazo izquierdo. El caudal derivado por el brazo derecho se

incrementa en un rango de un 2.35 % a 3.92 % en aguas bajas a un rango entre 0.55 % a 3.87 % en aguas altas.

Para los dos estados de agua analizados se calcularon las respectivas áreas mojadas en las bifurcaciones para las constituciones M04-06 y M10-12. En la Tabla 10 se muestran los valores de áreas mojadas y las variaciones de las mismas en el período de análisis. Se observa que el aumento de caudales erogados por el brazo derecho se corresponde con una disminución del área mojada (aumento de velocidades) comparativamente menor a la del brazo izquierdo o con un aumento de la misma respecto a este último brazo. A modo de síntesis se presenta en la Tabla 11 las tendencias de las variaciones en el período de años estudiado de los parámetros analizados en las bifurcaciones para los dos estados de agua analizados.

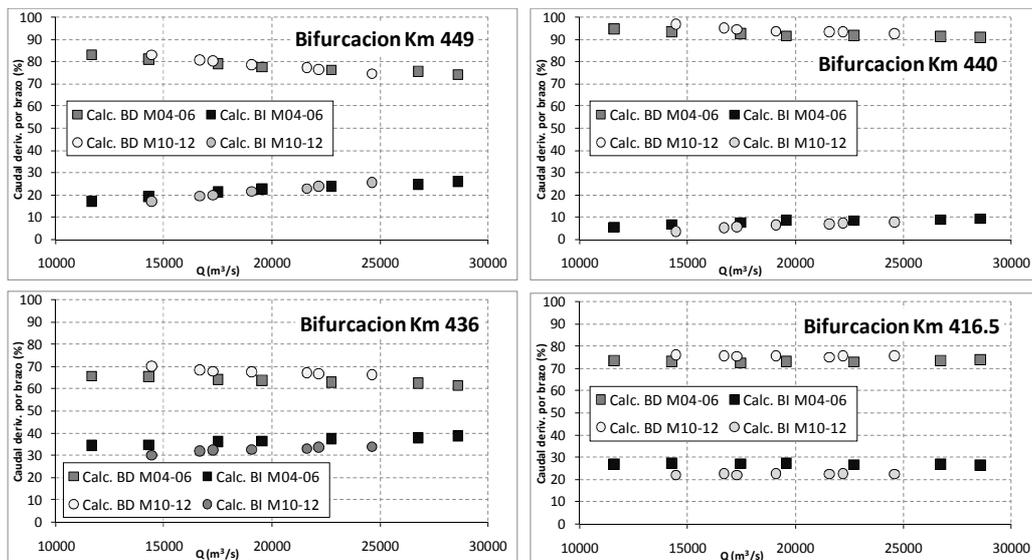


Figura 6.- Comparación de los porcentajes del caudal total Q derivado por el BD y el BI calculados para cada uno de los 7 escenarios de flujo permanente simulados para las constituciones M04-06 y M10-12.

Tabla 9.- Comparación entre porcentajes de caudal total Q derivado por el brazo derecho calculados para dos estados de agua para las constituciones M04-06 y M10-12.

Q (m ³ /s)	Bifurcación	% derivado BD		Dif. % deriv. BD
		M04-06	M10-12	
14000	km 449	80.93	83.28	2.35
20000	km 449	77.93	78.48	0.55
14000	km 440	93.31	96.25	2.94
20000	km 440	92.11	93.95	1.84
14000	km 436	65.62	69.32	3.70
20000	km 436	64.42	67.32	2.90
14000	km 416.6	71.81	75.73	3.92
20000	km 416.6	71.57	75.44	3.87

para la constitución 2004-2006 se valorizó entre 11600 a 28600 m³/s, en tanto que para el período 2010-2012 los caudales simulados estuvieron en el entorno de 14400 a 26400 m³/s. A partir del grado de aproximación obtenido entre niveles observados versus simulados se concluye que los resultados han sido aceptables, lográndose reproducir en forma satisfactoria niveles hidrométricos en 2 secciones de contrastación y consiguientemente también la pendiente hidráulica. Particularmente en la constitución M10-12 se reprodujeron satisfactoriamente perfiles de velocidades en 6 secciones transversales del dominio y derivación de caudales en 3 bifurcaciones del tramo. Para estudiar la evolución de la hidrodinámica en el período de tiempo analizado se estudió la partición de caudales en las bifurcaciones, distribución de caudales específicos y las áreas mojadas. El análisis concreto de la partición de caudales en las bifurcaciones del tramo evidencia un incremento de los porcentajes del caudal derivado por el brazo derecho, y una correspondiente disminución por el brazo izquierdo, en las cuatro bifurcaciones analizadas en el período de 2004/06 a 2010/12. Las variaciones de caudal derivado por ambos brazos se corresponden con las variaciones de área mojada para el mismo período de años. En lo que respecta a la variación del caudal específico, se observa que permanece prácticamente estable. Finalmente se concluye que la aplicación del modelo ha permitido reproducir satisfactoriamente el mecanismo del movimiento hidrodinámico en 2D, reproduciendo satisfactoriamente niveles hidrométricos, pendiente hidráulica, perfiles transversales de velocidades y caudales específicos como así también distribución de caudales en bifurcaciones sobre el cauce principal que presenta el río Paraná en el tramo de estudio.

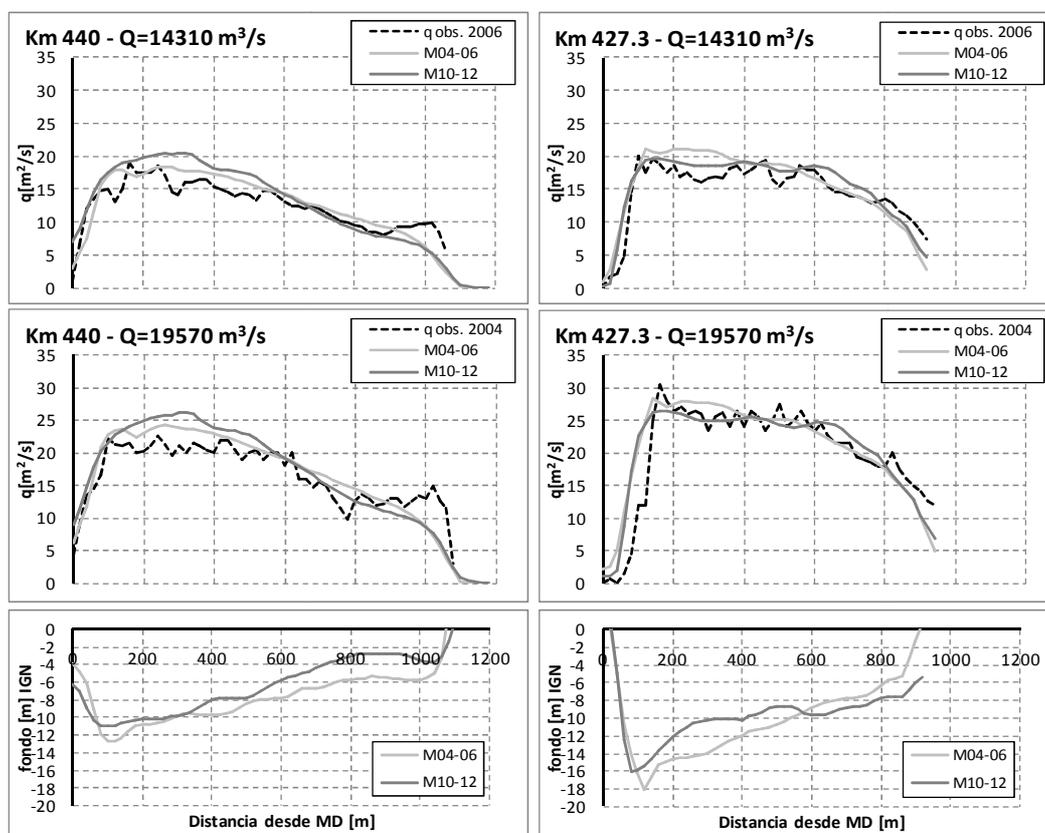


Figura 7.- Comparación de la distribución de caudales unitarios q calculados y observados (FICH,2006) y nivel del fondo del MDT (a) Sección transversal km 440 (b) Sección transversal km 427.3.

Agradecimientos. Los autores desean expresar su agradecimiento a la UNR por el apoyo brindado en el marco de los PID IING509 Y IING514 y a la DNVN-DPI por los datos topobatimétricos e hidrológicos facilitados.

REFERENCIAS

Basile, P.A., Riccardi, G., Peruzzo, F. y Trivisonno F. (2015). Modelación Hidrodinámica de un tramo del Río Paraná Inferior. *VII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Montevideo, Uruguay.

CHC-NRC (2011). Blue Kenue, Reference Manual. Canadian Hydraulics Centre - National Research Council, Canada.

DNVN-DPI (2014). Cartografía del río Paraná. Datos topobatimétricos tramo km 232 – 480. Dirección Nacional de Vías Navegables Delegación Paraná Inferior, Rosario.

FICH (2004). Estudios Hidráulicos y Morfológicos Zona Isla de la Invernada, Río Paraná. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL.

FICH (2006). Estudios Complementarios Hidráulicos y Morfológicos de la Zona de la Isla de la Invernada. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL.

Galland, J.-C., Goutal, N., Hervouet, J.-M. (1991). TELEMAC: A new numerical model for solving shallow water equations. *Advances in Water Resources*, Vol. 14, N° 3, pp. 138–148.

García, M., Basile, P.A., Riccardi, G. y Rodríguez, J.F. (2013). Modelling Hydrodynamic and Sedimentation Processes in Large Lowland Rivers: An Application to the Paraná River (Argentina). *35th IAHR World Congress*. Chengdu, China.

Guerrero, M. y Lamberti, A. (2013). Bed-roughness investigation for a 2-D model calibration: the San Martín case study at Lower Paraná. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 28, N° 4, pp. 458–469.

Hervouet, J.M. (2000). TELEMAC modelling system: an overview. *Hydrological Processes*, Vol. 14, N° 13, pp. 2209-2210.

Kazimierski, L. D. (2014). Sedimentación en canales de navegación. Caso de estudio: paso borghi. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, UBA, Buenos Aires, Argentina. 143 p.

Lang, P., Desombre, J., Ata, R., Goeury, C., Hervouet, J.M. (2014). TELEMAC-2D Software, User Manual.

Peruzzo, F., Riccardi, G. y Basile, P.A. (2016). Modelación cuasi-bidimensional de escurrimiento superficial en cauce principal del tramo Paraná inferior km 410-452. *IFRH 2016*. Ezeiza, Argentina.

Peruzzo, F., Riccardi, G., Basile, P.A. y García, M. (2017). Evaluación de un modelo hidrodinámico bidimensional en un tramo del cauce principal del río Paraná. *VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Córdoba, Argentina.

SAyDS (2013). Inventario de los humedales de Argentina: Sistemas de paisajes de humedales del Corredor Fluvial Paraná-Paraguay. Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Proyecto GEF 4206 - PNUD ARG/10/003, 1° Edición, Buenos Aires, Argentina.

SHN (2014). Base de Datos Digital de Cartas Náuticas de Río Paraná Inferior, <http://www.hidro.gov.ar/cartas/cartasnauticas.asp>. Servicio de Hidrografía Naval.

Singh, V.P. y Woolhiser, D.A. (2002). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 7, N° 4, pp. 270–292.