

EVALUACIÓN DE UN MODELO DE BAJA COMPLEJIDAD APLICADO EN TRAMOS DEL CAUCE PRINCIPAL DEL RÍO PARANÁ INFERIOR

Peruzzo F.C.⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾, Riccardi G.A.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, Basile P.A.⁽¹⁾⁽²⁾, García M.⁽¹⁾⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Hidráulica-Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.

⁽²⁾ Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.

⁽³⁾ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario.

⁽⁴⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.

Riobamba 245 bis. S2000EKE Rosario. Santa Fe.

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

Introducción

En este trabajo se presentan y analizan los resultados de la calibración y validación de un modelo matemático de complejidad reducida aplicado satisfactoriamente en dos tramos del río Paraná Inferior para simular el escurrimiento superficial cuasi-bidimensional con el fin de describir variables de flujo como velocidades, niveles y caudales para diferentes estados en todo el dominio espacial. El modelo fue aplicado en el tramo comprendido entre las progresivas km 234 al km 480 de la ruta de navegación Santa Fe - Océano (T246) y, con un mayor grado de detalle, en un tramo incluido dentro de este dominio entre el km 410 y el km 452 (T42). El modelo de simulación implementado es el CTSS8RIO, al cual se le ha acoplado la plataforma de pre y postprocesamiento de datos y resultados bajo entorno de ventanas SIMULACIONES 2.0, siendo de tipo difusivo, ambos software de desarrollo propio. El modelo es de los denominados de complejidad reducida no contemplando efectos inerciales ni cierre de turbulencia, no obstante pese a su simplicidad puede representar con adecuado nivel de aproximación patrones predominantes del escurrimiento (Nicholas et al., 2012). Existen antecedentes de simulaciones con modelos bidimensionales completos aplicados satisfactoriamente entre el km 410 y el km 452 (FICH, 2006; Guerrero y Lamberti, 2013; Basile et al., 2015) y en lo que respecta a modelación cuasi-2D se ha realizado una aplicación en un tramo de 6 km en las cercanías de Puerto San Martín (Basile y Riccardi, 2002) y desde la ciudad de Diamante hasta la ciudad de Ramallo se realizo

una modelación unidimensional del cauce principal y cuasi-2D de la planicie de inundación empleando celdas irregulares de gran tamaño (García et al., 2013).

Tramo en estudio

El tramo de estudio de la constitución T246 corresponde a 246 km del curso principal del río Paraná desde el km 234 cercano a la denominada Boya Roja donde el río se bifurca en el Paraná de las Palmas y el Paraná Guazú hasta el km 480 sitio aguas arriba de Puerto San Martín y aguas abajo de Diamante. Sobre la margen derecha del cauce principal se ubican diversas ciudades como Puerto San Martín (PSM), San Lorenzo, Fray Luis Beltrán, Capitán Bermúdez, Granadero Baigorria, Rosario (ROS), Villa Gobernador Galvez, Villa Constitución (VCO), San Nicolás (SNC), Ramallo (RAM) y San Pedro (SPE) (Figura 1). El valle de inundación se desarrolla sobre la margen izquierda del río. Esta gran planicie asociada se inunda parcial o totalmente durante las crecidas. El ancho del curso principal es altamente variable desde 700 m hasta 2200 m. En zonas de islas centrales el ancho total llega en algunos sitios a 4600 m. Por su parte, el área en estudio de la constitución T42 se limitó a un tramo comprendido entre el km 410 y el km 452, incluido dentro del dominio de la constitución T246 (Figura 1).

El caudal medio anual es de 17500 m³/s según caudales registrados (PSM, km 448) durante el periodo 1970-2014 (Basile et al., 2015). Durante la crecida extraordinaria de 1983 el mayor caudal fue cerca de 60000 m³/s, 30000 m³/s circulaban sobre el cauce principal y el resto sobre la planicie de inundación (García et al., 2013). Mientras que en PSM el menor caudal registrado fue alrededor de 7000 m³/s (Basile et al., 2015). Por otra parte, la pendiente de la superficie libre entre PSM y ROS varía entre 1.4×10^{-5} y 4.3×10^{-5} en tanto que entre Ramallo (RAM, km 325) y San Pedro (SPE, 276) varía entre 1.3×10^{-5} y 3.5×10^{-5} .

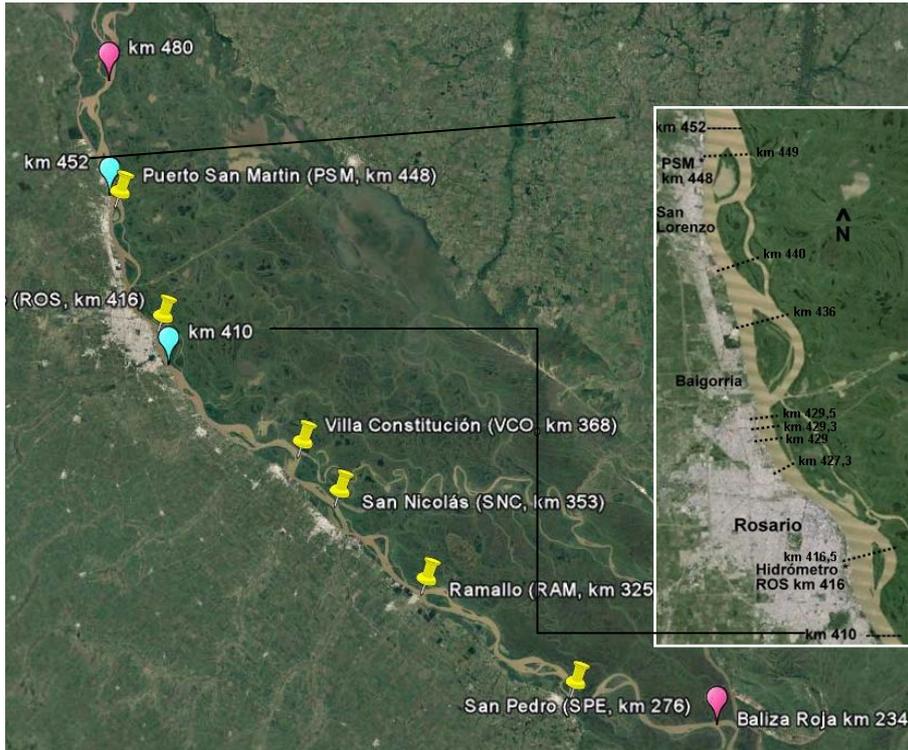


Figura 14 Zona de estudio constitución T246 (km 234 hasta km 480) y constitución T42 (km 410 hasta km 452) (imagen extraída de Google Earth©)

Modelo de simulación hidrodinámica

El modelo de simulación implementado es el CTSS8RIO al cual se le ha acoplado la plataforma de pre y postprocesamiento de datos y resultados bajo entorno de ventanas SIMULACIONES 2.0 (Stenta et al., 2005). Es una versión adaptada del modelo CTSS8 (Riccardi, 2001) siendo de tipo difusivo simplificado no contemplando efectos inerciales ni de cierre de turbulencia. El planteo de las ecuaciones gobernantes es del tipo (Figura 2):

$$A_{S_{k,i}} \frac{dz_{k,i}}{dt} = P_{k,i(t)} + \sum Q_x + \sum Q_y \quad \text{(continuidad)} \quad (1)$$

$$(2) \quad \frac{\partial z}{\partial x} + \eta_x^2 \frac{(Q_x/A_{t_x}) \sqrt{(Q_x/A_{t_x})^2 + (Q_y/A_{t_y})^2}}{h_x^{4/3}} = 0 \quad \text{(momentum en dirección x)}$$

$$(3) \quad \frac{\partial z}{\partial y} + \eta_y^2 \frac{(Q_y/A_{t_y}) \sqrt{(Q_x/A_{t_x})^2 + (Q_y/A_{t_y})^2}}{h_y^{4/3}} = 0 \quad \text{(momentum en dirección y)}$$

Donde:

$A_{sk,i}$ es el área superficial mojada en la celda i ; $z_{k,i}$ es la cota de agua en la celda i ; $P_{k,i}$ es el ingreso/egreso de caudales externos; Q_x y Q_y , η_x y η_y , h_x y h_y , A_{tx} y A_{ty} son los caudales intercambiados, los coeficientes de resistencia de Manning, las alturas y las áreas transversales consideradas entre las celdas vinculadas en el sentido x e y respectivamente.

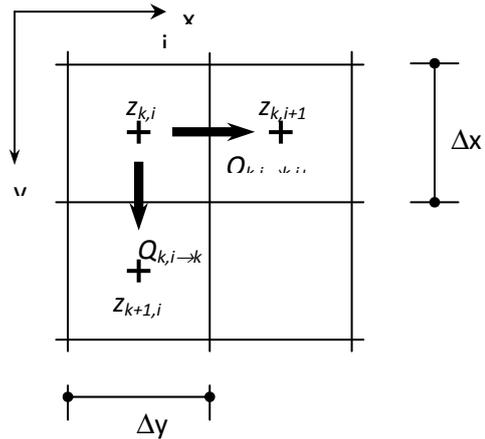


Figura 15 Definición de las variables de flujo en la grilla

Constitución del modelo

En la constitución T246 se trabajó con los relevamientos provistos por la Dirección Nacional de Vías Navegables - Delegación Paraná Inferior (DNVN-DPI, 2014) y se utilizó una grilla de cálculo cuadrangular de 100 m x 100 m, quedando conformado el dominio espacial de simulación por 50236 celdas y 97131 vinculaciones. Mientras que para la constitución T42 se trabajó con los relevamientos realizados por la Dirección Nacional de Vías Navegables - Delegación Paraná Inferior entre los años 2004 y 2006 (FICH, 2004 y 2006) y se empleó una grilla de cálculo más reducida de 20 m x 20 m, quedando conformado el dominio por 228531 celdas y 454134 vinculaciones. Ambos niveles de detalle permitieron capturar toda la información disponible de relevamientos existentes del fondo del cauce principal.

Resultados

En trabajos antecedentes el modelo fue calibrado y validado en ambas constituciones para estados de flujo permanente en un rango de aguas bajas a altas comprendiendo caudales entre 11640 m³/s hasta 28600 m³/s. El parámetro de calibración considerado fue el coeficiente de resistencia de Manning η en las vinculaciones entre celdas y la variable de ajuste fueron los niveles observados en los hidrómetros de PSM, ROS, VCO, SNC, RAM y SPE. Para la constitución T246 los mejores resultados en términos de niveles para escenarios de aguas bajas y medias se obtuvieron para el coeficiente de Manning variando desde 0.027 a 0.025, en estos casos los promedios de los errores

porcentuales absolutos entre niveles observados y modelados se acotó en 4.73%. En lo que respecta a aguas altas los mejores resultados se hallaron con el coeficiente de Manning variando entre 0.020 (del km 234 a km 353) a 0.025 (del km 353 a km 480), en estos caso el máximo promedio entre los errores porcentuales absolutos se acotó en 4.5%. Para la constitución T42 el rango de valores del coeficiente de resistencia de Manning que proporcionó el mejor ajuste estuvo comprendido desde 0.031 para aguas bajas y 0.0285 para aguas altas. El máximo promedio entre los errores porcentuales absolutos se acotó en 0.41%. Respecto al coeficiente de resistencia hallado en la calibración para la constitución T246 se evidencia que ha resultado un 16% inferior a los hallados en la constitución T42, hecho vinculado con el tamaño de grilla adoptado en cada una.

Análisis de derivación de caudales en bifurcaciones

A los efectos de estudiar la capacidad de distribuir los caudales en las bifurcaciones del tramo de río en estudio se procedió a estimar los caudales derivados en cuatro secciones para cada uno de los 7 escenarios de flujo permanente simulados y luego se compararon con caudales aforados por FICH (2004 y 2006). Las cuatro bifurcaciones consideradas (Figura 1) corresponden a: 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. En la Tabla 1 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 una de las simulaciones para la constitución T246 y en la Tabla 2 para la constitución T42. En todos los casos el brazo derecho corresponde al curso principal.

Los resultados de la comparación con los valores aforados se presentan en la Tabla 3, donde se han contrastado 2 distribuciones de caudales para cada bifurcación. Dado que las mediciones de FICH (FICH, 2004 y 2006) corresponden a caudales diferentes a los empleados en la calibración a flujo permanente, se procedió a interpolar linealmente los porcentajes de distribuciones. La contrastación de caudales derivados se ha llevado a cabo con los caudales derivados sobre el brazo derecho, que en todos los casos transporta el mayor porcentaje de caudal.

A partir de la comparación de valores, para la constitución T246 los errores porcentuales entre porcentajes de caudales derivados se acotan en 13.09%, siempre el modelo computando por encima de los valores aforados. El valor medio de todos los

errores entre porcentajes de caudales derivados por el brazo derecho es de 7.95%, pudiendo considerarse aceptable. Para la modelación T42 el valor medio resultó de 2.89% con máximo de 6.07%.

Tabla 9 Porcentajes de caudales derivados calculados en cada bifurcación para la constitución T246.

Fecha	Q(m3/s)	Bifurcación 1		Bifurcación 2		Bifurcación 3		Bifurcación 4	
		BD(%)	BI(%)	BD(%)	BI(%)	BD(%)	BI(%)	BD(%)	BI(%)
31/08/2001	11640	88.78	11.22	99.52	0.48	71.89	28.11	74.55	25.45
21/02/2006	14310	87.11	12.89	98.92	1.08	70.43	29.57	74.35	25.65
09/06/2005	17490	84.56	15.44	97.88	2.12	68.69	31.31	74.23	25.77
21/12/2004	19570	83.02	16.98	97.20	2.80	67.84	32.16	74.24	25.76
02/04/2003	22740	81.64	18.36	96.59	3.41	67.21	32.79	74.27	25.73
16/08/1982	26760	78.91	21.09	95.22	4.78	66.32	33.68	74.40	25.60
04/01/1983	28600	78.24	21.76	94.56	5.44	65.90	34.10	74.55	25.45

Tabla 10 Porcentajes de caudales derivados calculados en cada bifurcación para la constitución T42.

Fecha	Q [m ³ /s]	Bifurcación 1		Bifurcación 2		Bifurcación 3		Bifurcación 4	
		BD(%)	BI(%)	BD(%)	BI(%)	BD(%)	BI(%)	BD(%)	BI(%)
31/08/2001	11640	84.52	15.48	95.63	5.35	64.42	35.73	72.64	27.92
21/02/2006	14310	82.89	17.11	94.26	5.74	63.22	36.78	72.00	28.00
09/06/2005	17490	80.65	19.35	93.48	6.52	62.26	37.74	71.44	28.56
21/12/2004	19570	79.39	20.61	93.03	6.97	61.62	38.38	71.35	28.65
02/04/2003	22740	78.17	21.83	92.64	7.36	61.03	38.97	71.45	28.55
16/08/1982	26760	77.47	22.53	92.30	7.70	60.65	39.35	71.38	28.62
04/01/1983	28600	76.43	23.57	91.87	8.13	60.03	39.97	71.46	28.54

Tabla 11 Porcentaje del caudal total Q derivado por el brazo derecho en las cuatro bifurcaciones del tramo en estudio, contrastación con datos observados

Fecha Aforo	Q [m ³ /s]	Bifurcación	% derivado BD			T246		T42	
			Obs.	Calc.		E _r [%]	Prom. E _r [%]	E _r [%]	Prom. E _r [%]
				T246	T42				
30/11/2004	20790	1	74.30	82.49	78.81	11.02	10.72	6.07	4.92
21/02/2006	13617	1	79.40	87.67	82.39	10.42		3.77	
30/11/2004	19818	2	91.20	97.04	93.30	6.40	6.35	2.30	2.01
08/03/2006	14839	2	92.70	98.54	94.30	6.30		1.73	
02/12/2004	19075	3	61.40	69.44	62.90	13.09	9.99	2.44	± 3.07
08/03/2006	14315	3	66.30	70.87	63.85	6.89		-3.70	
25/11/2004	16901	4	70.00	74.35	71.99	6.21	4.74	2.84	1.57
26/05/2006	12634	4	72.00	74.35	72.21	3.26		0.29	

Análisis de distribución de caudales unitarios

En la constitución T42 se testeó la capacidad del modelo de reproducir la distribución transversal de caudales específicos en distintas secciones transversales donde se contó con valores aforados en campañas de medición. Con los resultados obtenidos en las simulaciones para caudales $Q=14310 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$ se calcularon las distribuciones de caudales unitarios en distintas secciones transversales y se compararon con distribuciones observadas en mediciones de campo con ADCP realizadas por la FICH en el periodo noviembre-diciembre 2004 y febrero-marzo 2006 (FICH, 2006). En la Figura 3 se presenta la comparación entre caudales unitarios calculados y observados en dos secciones, una ubicada en el km 440 y la otra en el km 427.3, para ambas simulaciones. La calidad del ajuste fue evaluada en esta instancia con el coeficiente de correlación R^2 el cual quedó comprendido entre 0.73 y 0.92, demostrando una buena capacidad del modelo en reproducir las distintas distribuciones aforadas. En la Figura 1 se muestra la ubicación de las distintas secciones transversales donde se realizó la comparación en el tramo en estudio (km 452, 440, 429.5, 429.3, 429 y 427.3).

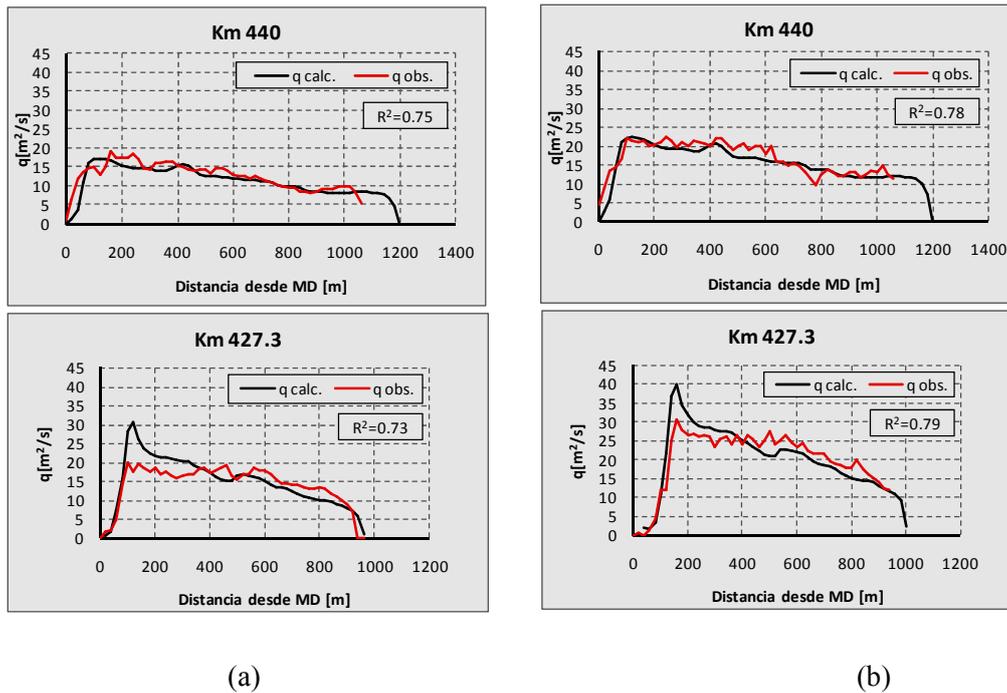


Figura 16 (a) Simulación $Q=14310 \text{ m}^3/\text{s}$. (b) Simulación $Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$. Comparación de la distribución de caudales unitarios q calculados y observados

Análisis en flujo impermanente serie de niveles en período del 15/03/2015 a 14/03/2016

En lo que respecta a la constitución T246 se realizaron simulaciones en flujo impermanente a modo de validación y recalibración de parámetros de rugosidad reproduciendo la serie de niveles observada en el período 15/03/2015 al 14/03/2016. En esta variante de modelación de flujo impermanente se empleó como señal de entrada en el borde la variación de niveles en el km 480, calculada a partir de los niveles registrados en los hidrómetros de Diamante (DIA) km 533 y Puerto San Martín (PSM) km 448. La señal de borde aguas abajo considerada fue la variación de niveles en el km 234, determinada a partir de la interpolación lineal de niveles observados en los hidrómetros de Ramallo (RAM) km 325 y San Pedro (SPE) km 276. Se realizaron simulaciones con el coeficiente de rugosidad de Manning variando entre $0.020 \leq \eta \leq 0.029$. Se analizaron escenarios con rugosidades constantes en todo el tramo como así también rugosidades variables, subdividiendo en 7 subtramos de rugosidad constante, que se correspondieron con los subtramos entre las localizaciones de los hidrómetros. Para cuantificar la comparación de las series simuladas de niveles 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 el caso de NS, se planteó para

la comparación de las series del primer semestre, las series del segundo semestre y la serie completa. En la Tabla 4 se presentan los valores de referencia para la evaluación de ajuste según distintos indicadores.

Tabla 4 Valores de referencia para la evaluación de ajuste

Condición	Error Típico ET (m)	Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS)	Coefficiente de Correlación R²
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

La simulación que mejor calidad de ajuste ha alcanzado al utilizar los calificadores de errores referidos, correspondió a una combinación de rugosidades de $\eta = 0.026-0.027$. En la Tabla 5 se presentan las condiciones logradas con este ajuste de acuerdo a la calificación adoptada. En la Figura 4 se presentan las variaciones de niveles observadas y simuladas en los 6 sitios de comparación. Cabe destacar que también se alcanzaron aceptables resultados con rugosidades uniformes de $\eta = 0.025; 0.026; 0.027; 0.028$ y 0.029 .

Tabla 5 Calificación de los errores para simulación con $\eta= 0.026-0.027$

Indicador	PSM	ROS	VCO	SNC	RAM	SPE
ET	B	B	A	A	A	B
NS Sem 1	B	MB	B	B	B	MB
NS Sem 2	MB	MB	MB	MB	MB	MB
NS	MB	MB	MB	MB	MB	MB
R ²	MB	MB	MB	MB	MB	MB

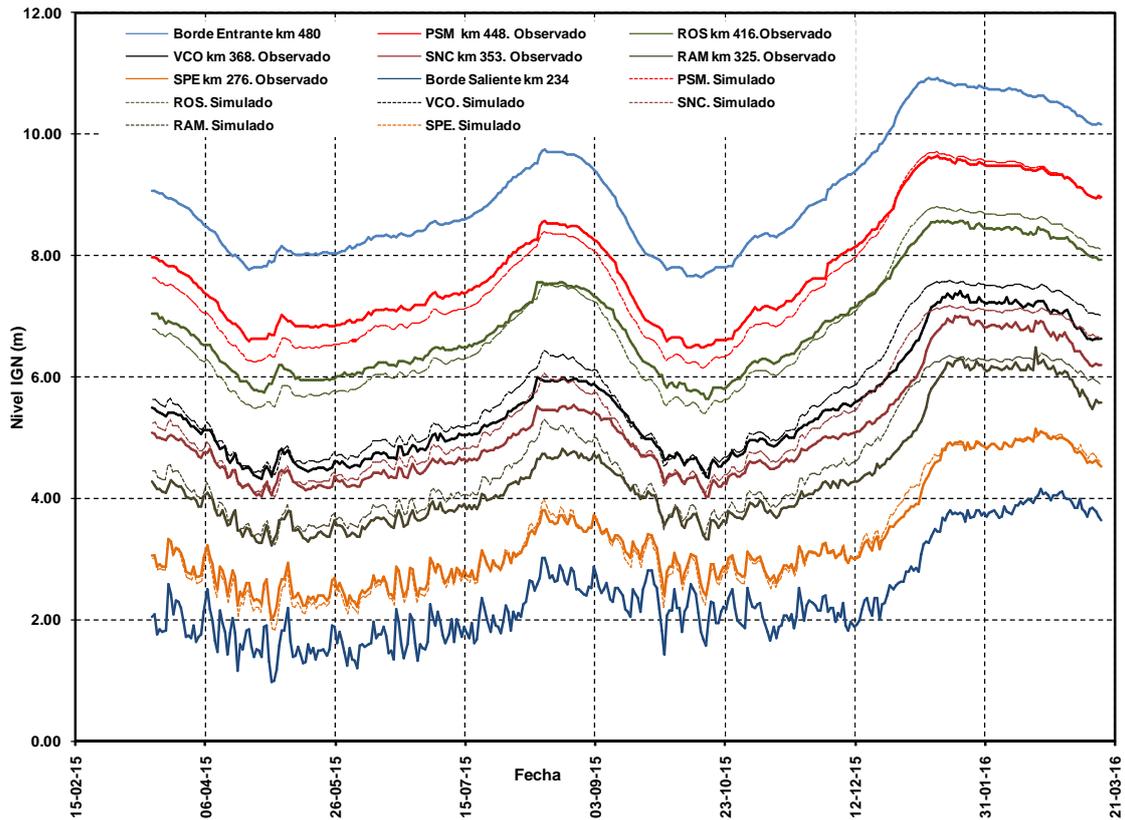


Figura 17 Perfiles de superficie libre observados y simulados para serie 15/03/2015 -14/03/2016

Conclusiones

El modelo de baja complejidad CTSS8RIO fue implementado para simular la hidrodinámica en régimen permanente e impermanente de un tramo del río Paraná Inferior. Se observa que el modelo distribuye adecuadamente los caudales en las bifurcaciones que presenta el tramo de río en estudio con errores relativos promedio iguales a 10.72%, 6.35%, 9.99% y 4.74% para la constitución T246 y 4.92%, 2.01%, ± 3.07 y 1.57 para la constitución T42 para las bifurcaciones kms 449, 440, 436 y 416,5 respectivamente. Se verifica además una buena capacidad del modelo en reproducir distribuciones de caudales unitarios en diferentes secciones transversales donde se contrastaron valores calculados con aforados con un coeficiente de correlación R^2 comprendido entre 0.73 y 0.92 para la constitución T42. En lo que concierne a simulaciones en régimen impermanente para la constitución T246 con la serie anual de niveles observada entre el 15/03/2015 a 14/03/2016, la calificación global del ajuste puede considerarse entre buena y muy buena empleando un coeficiente de resistencia en el rango $\eta = 0.026-0.027$, no obstante se pretende en futuros trabajos mejorar el ajuste a partir de consideraciones de una mayor sectorización de subtramos de rugosidad constante. En etapas siguientes se avanzará en la simulación de

flujo impermanente para la constitución T42 y en la contrastación de niveles, velocidades y distribución de caudales obtenidos de la aplicación de un modelo bidimensional completo para ambas constituciones

Agradecimiento. Los autores desean expresar su agradecimiento a la UNR por el apoyo brindado en el marco de los PID 19-I368 y 19-I358 a la DNVN-DPI por los datos topobatimétricos e hidrológicos facilitados.

Referencias bibliográficas

1. Basile, P.A. y Riccardi, G. (2002). "A Quasi-2D Hydro-Morphological Mathematical Model: An Application to the Argentinean Paraná River". *International Journal of Sediment Research*, 17 (1), 20-30.
2. Basile, P.A., Riccardi, G., Peruzzo, F. y Trivisonno F. (2015). Modelación Hidrodinámica de un tramo del Río Paraná Inferior. Séptimo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Montevideo, Uruguay.
3. DNVN-DPI - Dirección Nacional de Vías Navegables Delegación Paraná Inferior (2014). Cartografía de río Paraná. Datos topobatimétricos tramo km 232 - 480, Rosario.
4. FICH (2004). Estudios Hidráulicos y Morfológicos Zona Isla de la Invernada, Río Paraná. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - UNL, Diciembre 2004.
5. 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, Julio 2006.
6. Garcia, M., Basile, P.A., Riccardi, G. y Rodriguez, J.F. (2013). Modelling Hydrodynamic and Sedimentation Processes in Large Lowland Rivers: An Application to the Paraná River (Argentina). Proceedings of the 35th IAHR World Congress. Chengdu, China.
7. 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*, 28 (4), 458-469.
8. Nicholas, A.P., Sandbach, S.D., Ashworth, P.J., Amsler, M.L., Best, J.L., Hardy, R.J., Lane, S.N., Orfeo O., Parsons, D.R., Reesink, A.J.H., Sambrook Smith, G.H. y Szupiany, R.N. (2012). Modelling hydrodynamics in the Río Paraná, Argentina: An evaluation and inter-comparison of reduced-complexity and physics based models applied to a large sand-bed river. *Geomorphology*, 169-170, 192-211.
9. Riccardi, G. (2001). Un Sistema de Simulación Hidrológica – Hidráulica Cuasi-2D Multicapa para Ambientes rurales y urbanos, Tesis Doctoral, FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba.
10. Stenta, H., Renteria, J. y Riccardi, G. (2005). Plataforma computacional para gestión de información en la simulación hidrológica - hidráulica del escurrimiento superficial. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina, 1, T74, 13 pp.