

ESTADÍSTICA DE NIVELES EN EL DELTA DEL RÍO PARANÁ MEDIANTE MODELACIÓN HIDRODINÁMICA

Mariano Re, Martín Sabarots Gerbec y Lucas Storto

Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua

Au. Ezeiza-Cañuelas, tramo Jorge Newbery Km 1,620, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina

E-mail: m.re@ina.gob.ar

RESUMEN

La comprensión de la dinámica de niveles de agua en el Delta del río Paraná resulta de interés para el apoyo a estrategias de manejo del agua en forestaciones del Bajo Delta, la provisión de elementos para pronóstico hidrológico y la caracterización de los aportes de caudales líquidos y sólidos al Río de la Plata. En este trabajo se presenta la descripción espacial del comportamiento de los niveles en el Delta del Paraná en toda su extensión a partir de los resultados de una modelación hidrodinámica en período temporal largo. La base de datos de niveles observados disponible en esta región resulta insuficiente para una caracterización estadística de los mismos en toda la red. La herramienta implementada, además de permitir caracterizar estadísticamente cualquier punto del Delta del Paraná, colabora en la comprensión de fenómenos complejos que se dan en esta zona, como el comportamiento de los distintos brazos del río durante crecidas y las implicancias de la penetración de la onda de marea en el Bajo Delta.

ABSTRACT

The comprehension of the dynamics of water levels in the Parana River Delta is of interest to support water management strategies in the Lower Delta afforestation, to provide elements for forecasting and for hydrological characterization of the contributions of liquid and solid flows to the Rio de la Plata. In this work the spatial description of the behavior of the levels in the whole Parana Delta from hydrodynamic modeling results in a long time period is presented. The database of available levels observed in this region is insufficient for statistical characterization of the whole network. The implemented tool, allows statistically characterize any point in the Parana Delta, and contributes to the understanding of complex phenomena that occur in this area as river branch behavior during floods and the implications of penetration of the tidal wave in Lower Delta.

INTRODUCCIÓN

El Delta del río Paraná comienza a la altura de la localidad de Diamante (Entre Ríos) y se extiende hasta su desembocadura en el Río de la Plata. Los 320 *km* de esta geofoma se dividen en tres grandes secciones (Figura 1): el Delta Superior (de Diamante hasta Villa Constitución, Santa Fe), el Delta Medio (de Villa Constitución hasta Ibicuy, Entre Ríos) y el Bajo Delta (de Ibicuy hasta el Río de la Plata).

Los usos del Delta son variados. Tanto en el Delta Superior como en el Delta Medio se realizan prácticas ganaderas de gran escala, la navegación comercial se da en toda su longitud, y en el Bajo Delta se destacan usos recreativos (turismo y navegación deportiva) y productivos (emprendimientos forestales y apícolas).

El objetivo de este trabajo es la descripción espacial del comportamiento de los niveles en el Delta del Paraná en toda su extensión a partir de los resultados de una modelación hidrodinámica. La dinámica de niveles en esta región resulta de interés para el apoyo a estrategias de manejo del agua en forestaciones del Bajo Delta, la provisión de elementos para pronóstico hidrológico y la caracterización de los aportes de caudales líquidos y sólidos al Río de la Plata.

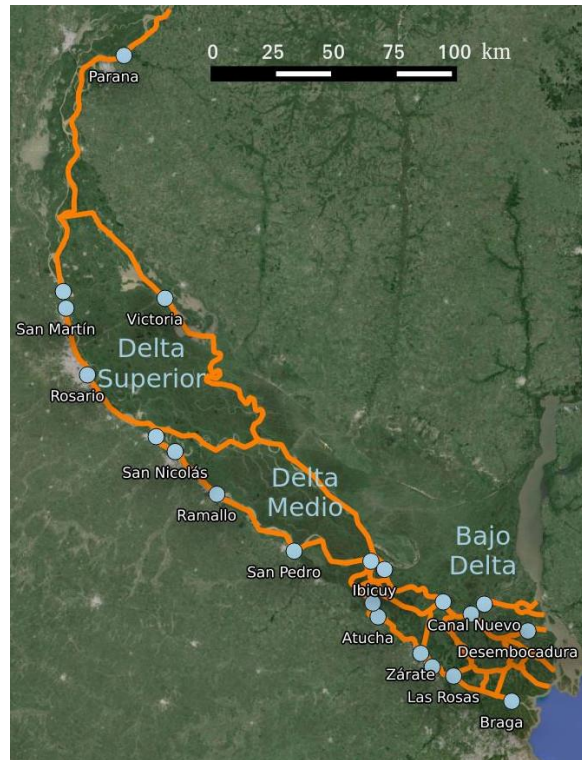


Figura 1.- Localización del Delta del río Paraná.

Existen varios antecedentes de modelación numérica (Bombardelli et al., 1995, Ormazábal et al., 2005, García et al., 2012, y Sabarots Gerbec, 2014) y de análisis de observaciones (Zamanillo et al., 2013) en el Delta del Paraná, pero en ninguno de ellos se lo aborda de manera completa.

CARACTERIZACIÓN DE LOS NIVELES

La base de datos disponible de niveles observados en el Delta del Paraná, proveniente de más de 20 estaciones de medición, con buena información de los últimos 20 años aunque con varios vacíos (específicamente en el Bajo Delta), resulta insuficiente para una caracterización estadística de niveles en toda la red (no para utilizarla durante la calibración y validación de un modelo hidrodinámico).

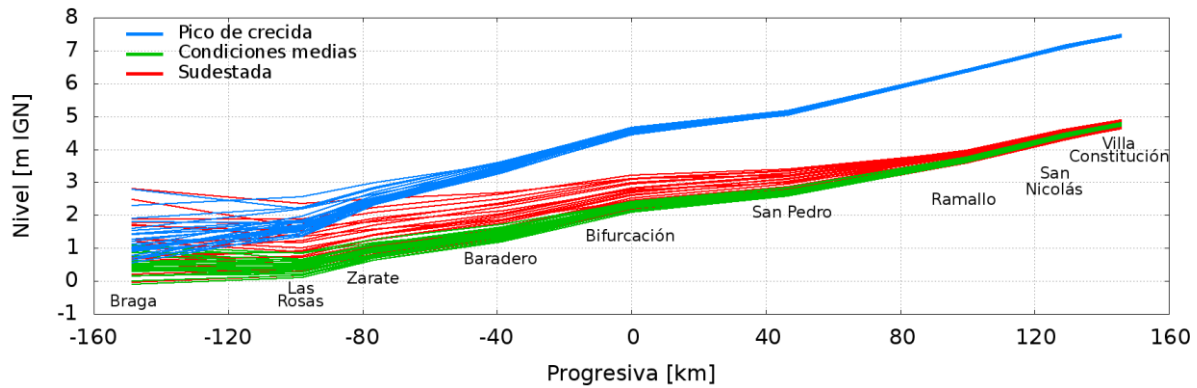
La frecuencia de observación también resulta dispar debido a que, según la sección, en el Delta conviven dinámicas de escalas horarias, diarias y mensuales. En un primer análisis sobre esta coexistencia se presentan perfiles de niveles instantáneos medidos cada 6 horas para diferentes situaciones forzantes (Tabla 1).

Tabla 1.- Escenarios de análisis.

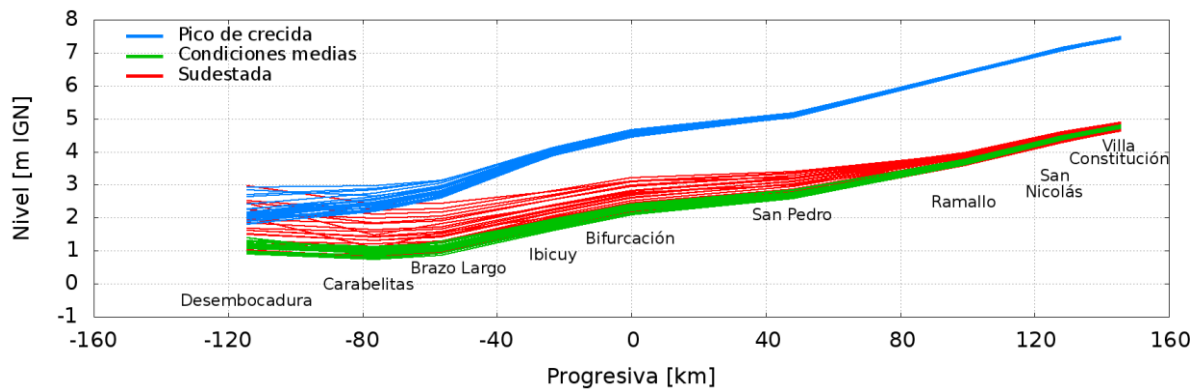
Escenario	Fecha inicio	Fecha fin
Crecida del Paraná	25/02/2010	03/03/2010
Sudestada en el Río de la Plata	12/08/2010	18/08/2010
Condiciones medias	06/08/2010	12/08/2010

Este ejercicio, presentado en la Figura 2, permite visualizar un cambio de pendiente en el

tramo que no tiene dirección NO-SE (San Pedro–Bifurcación) y la variabilidad en la zona del Bajo Delta debido a la influencia de la onda de marea del Río de la Plata. Además, se destaca la diferencia en el aumento de niveles provocada por una crecida del Paraná y una sudestada, observándose que la penetración de esta se nota hasta aproximadamente Ramallo (cuestión que complejizaría una estadística de extremos).



a) Paraná – Paraná de las Palmas



b) Paraná – Paraná Guazú

Figura 2.- Pendientes y variabilidad horaria de niveles en las dos ramas principales del Delta según forzante.

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA

La no simultaneidad de series de nivel observadas extensas justifica la implementación de un modelo hidrodinámico para analizar la estadística descriptiva de niveles en el Delta del Paraná. El modelo hidrodinámico que se presenta en este trabajo se basó en el propuesto por Sabarots Gerbec (2014), que incluye al Delta Superior y al Delta Medio. La incorporación del Bajo Delta a este modelo, se realizó a partir de la representación de Bombardelli *et al.* (1994).

Este modelo resuelve la hidrodinámica unidimensional de los ríos Paraná (brazo principal), Victoria, Paraná Pavón, Paraná Ibicuy, Paraná de las Palmas, Paraná Guazú, Pasaje Talavera, Barca Grande, Paraná Mini, Sauce, Bravo y Carabelas Grande, y los canales Gobernador de la Serna, Gobernador Arana, Irigoyen, Laurentino Comas, 4, Seoane y Zanja Mercadal. En la Figura 1 se presenta el dominio modelado.

Los detalles de la implementación geométrica se encuentran en Bombardelli *et al.* (1994) y

Sabarots Gerbec (2014). El software utilizado fue HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Centers - River Analysis System*). La discretización temporal del modelo es de $\Delta t = 30$ min y la espacial de $\Delta x = 5000$ m.

Forzantes del sistema

El forzado del sistema se realiza a partir de una condición impuesta aguas arriba vinculada a los caudales provenientes desde el río Paraná Medio y una condición de nivel en el borde de aguas abajo (niveles del Río de la Plata en el frente del Delta del Paraná) (Figura 3).

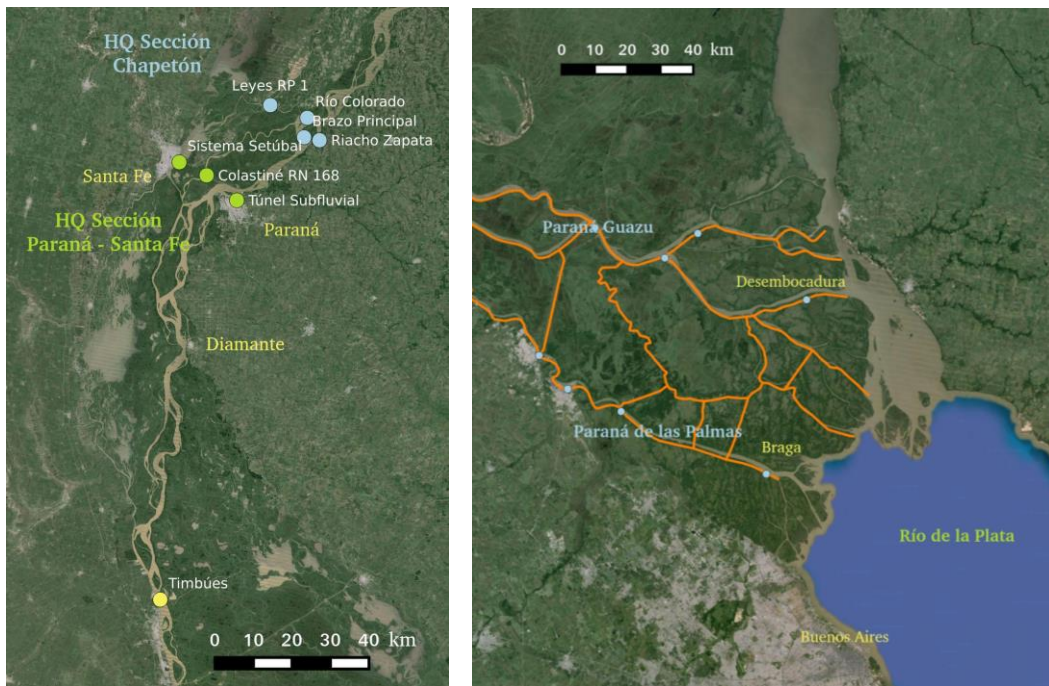


Figura 3.- Condiciones de borde del modelo: a) borde de aguas arriba, b) borde de aguas abajo.

La condición de contorno de aguas arriba se caracterizó a partir del análisis de los datos de la curva altura-caudal (HQ) en la Sección Paraná - Santa Fe y se basa en los valores de niveles en Paraná. El caudal total de esta sección surge de contemplar los valores en el brazo principal del río (Túnel Subfluvial) junto con los aportes del río Colastiné y la descarga del Sistema Leyes - Setúbal. La corroboración de la representatividad del caudal propuesto para la esta sección se realizó a través de la comparación con el caudal de la sección Chapetón (Figura 3).

En la Figura 4 se presentan las series de valores aforados para las dos secciones (Paraná - Santa Fe y Chapetón) más la Sección Timbúes del brazo principal aguas abajo de las mismas (en esta última se infiere el escurrimiento que se da hacia la zona de Victoria, sobre todo durante la crecida de 1998), y las curvas HQ del Túnel Subfluvial y la Sección Paraná - Santa Fe. Estrictamente en el modelo se impone la serie de niveles en Paraná y se verifica el ajuste de la curva altura-caudal (HQ) en ese punto con la de la Sección Paraná - Santa Fe (controlando el correcto ingreso de los caudales al sistema). La principal ventaja de forzar el sistema de esta manera es que se evita realizar un ajuste de una relación unívoca entre altura y caudal, conservando la posibilidad de representar la histéresis de la misma (en la validación se comparan nubes de puntos).

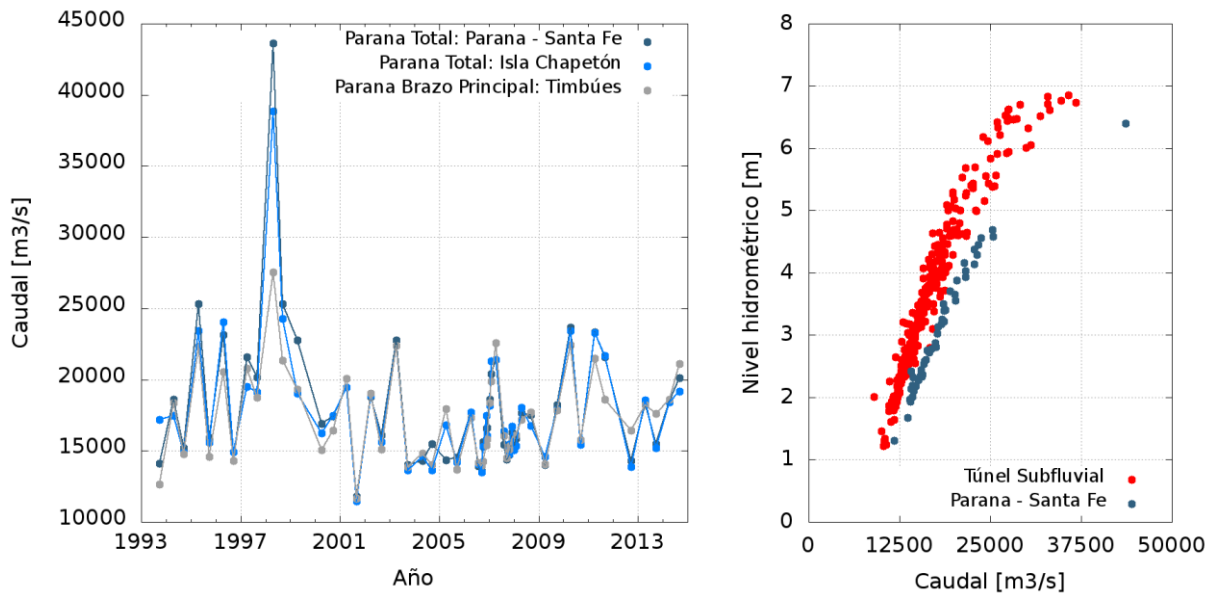


Figura 4.- Caudales aforados: series y curvas altura-caudal.

La condición de borde de nivel impuesta aguas abajo (representativa de la dinámica del Río de la Plata en el frente del Delta) fue definida a partir de datos horarios en Buenos Aires (serie permanentemente disponible y sin vacíos) e impuesta en seis filamentos del modelo (Figura 3), debidamente retrasada y ajustada a las amplitudes mareales de las desembocaduras del Paraná de las Palmas (Braga) y Paraná Guazú (Desembocadura). La metodología de ajuste de la serie de Buenos Aires a las representativas de Braga y Desembocadura consistió en la modificación del nivel medio y de la relación entre los cuartiles 25 y 75. Además, dada la significancia del aporte, sobre todo en la serie Desembocadura, se incorporó la variación de la onda de baja frecuencia provocada por la descarga desde aguas arriba amplificando el mismo efecto que se observa en Buenos Aires obtenido a partir de la aplicación de un filtro de Butterworth (con una frecuencia de 1/mes y orden 4) (Pagendam y Percival, 2015).

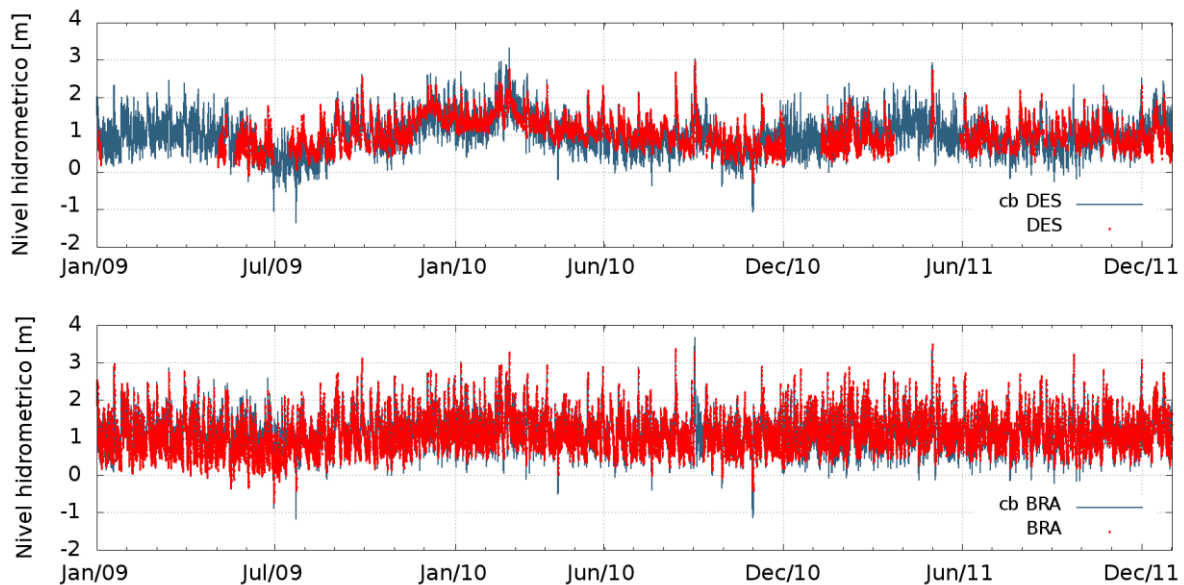


Figura 5.- Condición de borde aguas abajo. Comparación con series observadas: a) Paraná Guazú (Desembocadura), y b) Paraná de las Palmas (Braga).

El retardo de la onda de marea fue de 2.5 horas para la serie de Paraná de las Palmas (1 filamento del modelo) y 3 horas para la de Paraná Guazú (cinco filamentos). Los resultados de esta composición de serie horaria se presentan en la Figura 5 comparando las series obtenidas con los datos disponibles de las referencias.

Calibración y validación

Para la calibración se eligió el período 2009-2011. En esta ventana temporal ocurren varias sudestadas, y una crecida y una bajante importante del Paraná, contándose con condiciones hidrológicas variadas y permitiendo un buen ajuste para caudales altos, medios y bajos. La variable principal de calibración resultó el coeficiente de rugosidad n de Manning.

En la Figura 6 se presentan para este período, a modo ilustrativo, las comparaciones de los valores observados y simulados en tres estaciones de control correspondientes a cada una de las secciones del Delta del Paraná. Además, en la Tabla 2 se presentan los valores de dos indicadores de calibración (para las series de las que se dispone registro largo). Ante ambos resultados se distingue un buen comportamiento del modelo.

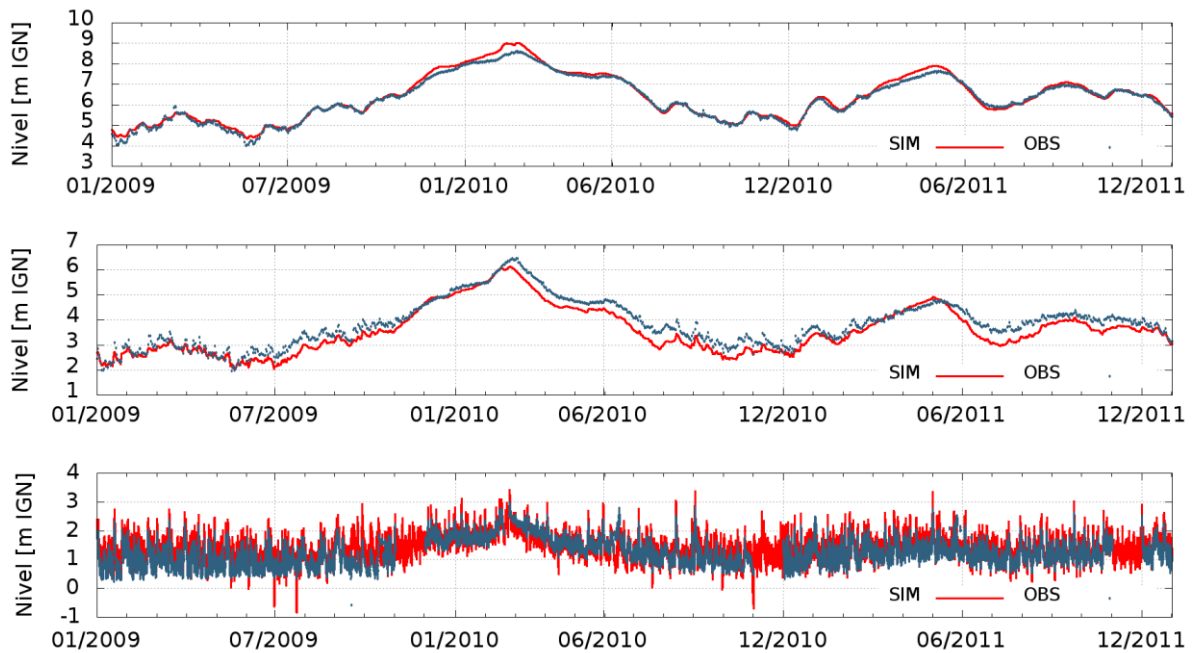


Figura 6.- Niveles observados y simulados: a) Rosario, datos diarios (Delta Superior), b) Ramallo, datos diarios (Delta Medio) y c) Zárate, datos horarios (Bajo Delta).

Tabla 2.- Indicadores de calibración (RMSE, error cuadrático medio; y NSE, indicador de eficiencia de Nash-Sutcliffe).

Sección	Estación	RMSE	NSE
Delta Superior	Diamante	0.359	0.869
Delta Superior	Rosario	0.157	0.966
Delta Superior	Villa Constitución	0.379	0.829
Delta Medio	San Nicolás	0.328	0.855
Delta Medio	Ramallo	0.347	0.823
Delta Medio	San Pedro	0.351	0.767

El modelo hidrodinámico fue validado tanto para niveles como para caudales, haciendo especial énfasis en estos últimos, aunque sólo se dispuso de tres estaciones con aforos: i)

curva HQ en la Sección Paraná - Santa Fe, que permite validar la correcta entrada de caudales, *ii*) aforos en la Sección Timbúes, que permite validar la partición de caudales entre la rama Paraná (brazo principal) y la rama Victoria del modelo hidrodinámico, y *iii*) aforos en Zárate y Brazo Largo, que permiten validar la partición de caudales entre el Paraná de las Palmas y el Paraná Guazú.

Las Figuras 7 y 8 muestran el buen ajuste del modelo hidrodinámico en Timbúes y en Zárate – Brazo Largo, respectivamente. Se puede ver que mantiene un buen acuerdo tanto en aguas altas como en aguas bajas.

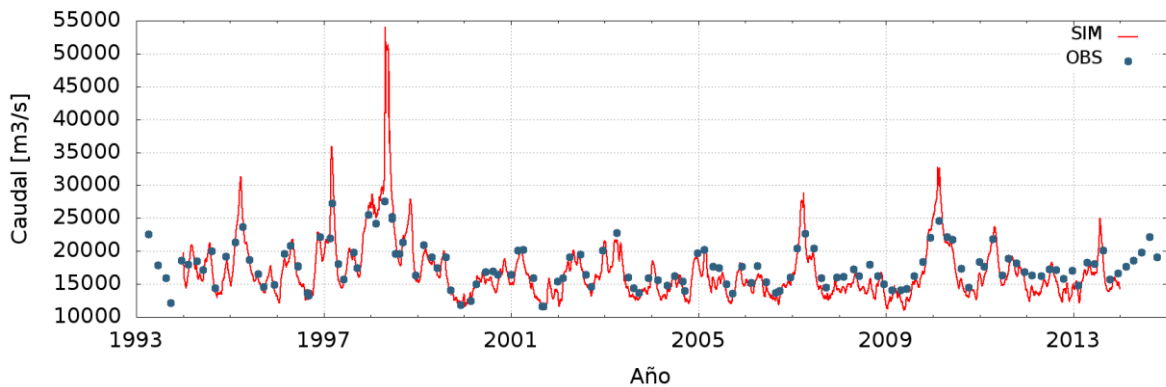


Figura 7. Comparación de caudales simulados y observados en Timbúes.

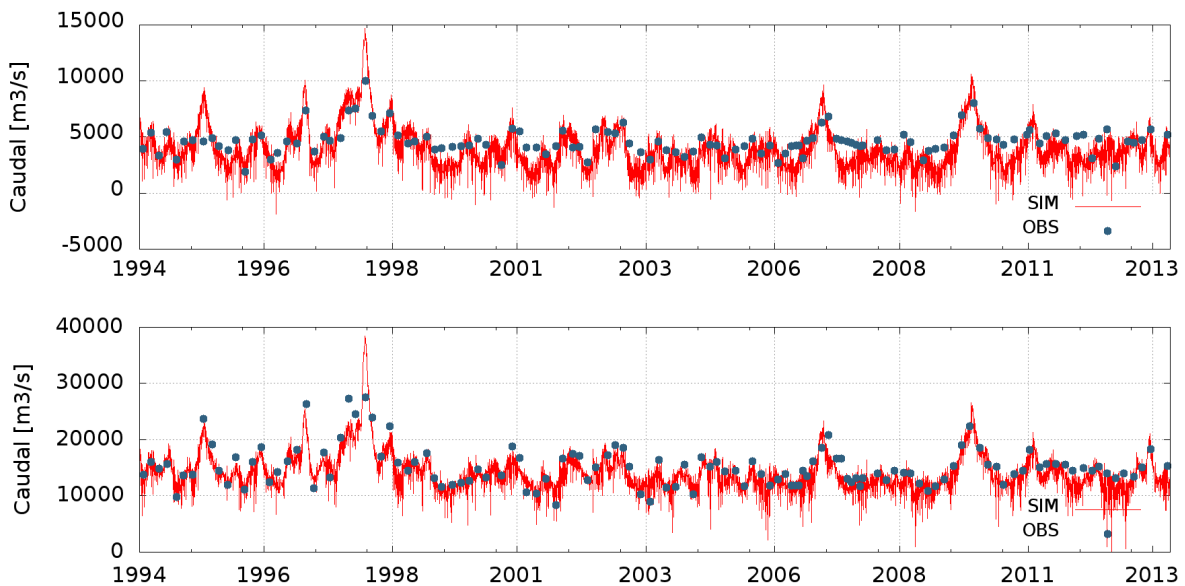


Figura 8. Comparación de caudales simulados y observados en Zárate y Brazo Largo

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

A partir de los resultados de la simulación del período 1994-2013, se realizó una caracterización estadística descriptiva de niveles en las tres secciones del Delta del Paraná para todos los filamentos implementados. Con este objetivo se calcularon los estadísticos básicos de nivel como las medias, los máximos y mínimos, distintos percentiles (p10, p50 y p90), y coeficientes que evalúan la dispersión de la distribución (coeficiente de variación,

CV; coeficiente de sesgo, CS; y coeficiente de curtosis, CC). Con los estadísticos de cada nodo del dominio de cálculo se construyeron mapas para analizar la distribución de los mismos en el Delta del Paraná.

La Figura 9 presenta los valores medios y los desvíos estándar obtenidos en todo el dominio. El mapa de valor medio presenta valores que se ubican entre 1 y 12 m IGN, mientras que el desvío standard toma valores menores que 1 m. En el primero se pueden observar las pendientes diferentes que se dan según el recorrido de los cauces, por ejemplo en el Delta Medio con tramos que van de oeste a este y de noroeste a sudeste. Los mayores valores del desvío standard se dan en torno al Bajo Delta y se deben a la influencia de la onda de marea en este tramo proveniente desde el Río de la Plata.

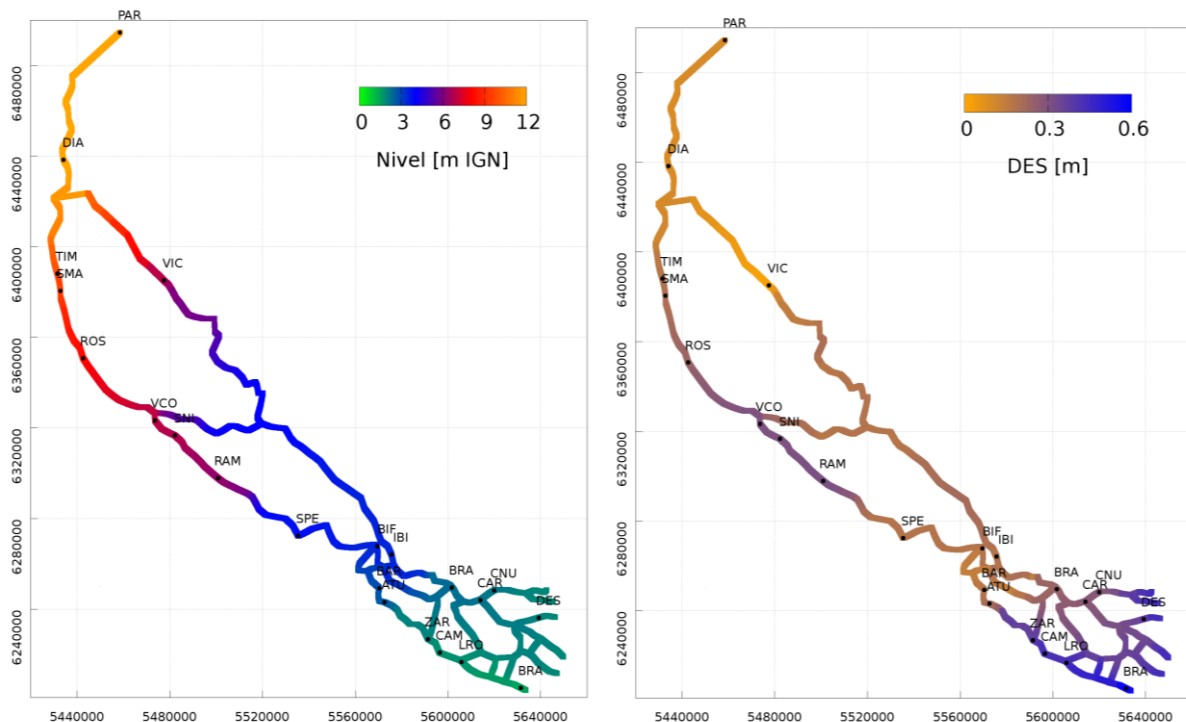


Figura 9.- Niveles medios y desvío standard en la simulación del período 1994-2013.

Los mapas de la Figura 10 muestran los valores máximos y mínimos simulados en cada nodo del dominio. Los máximos se encuentran en el rango de 3 a 15 m IGN y los mínimos entre 0 y 11 m IGN.

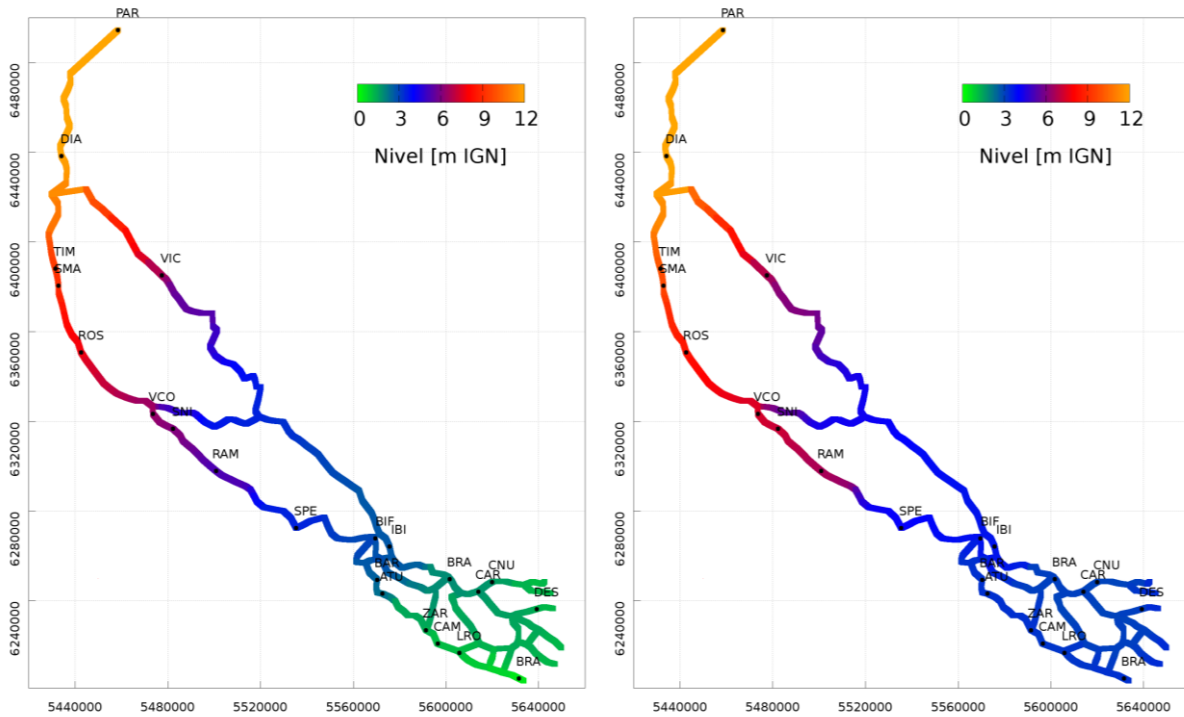


Figura 10.- Niveles mínimos y máximos, basados en la simulación del período 1994-2013.

Similares comportamientos a los de las medias, mínimos y máximos se observan en los mapas de los percentiles 10, 50 y 90 en la Figura 11.

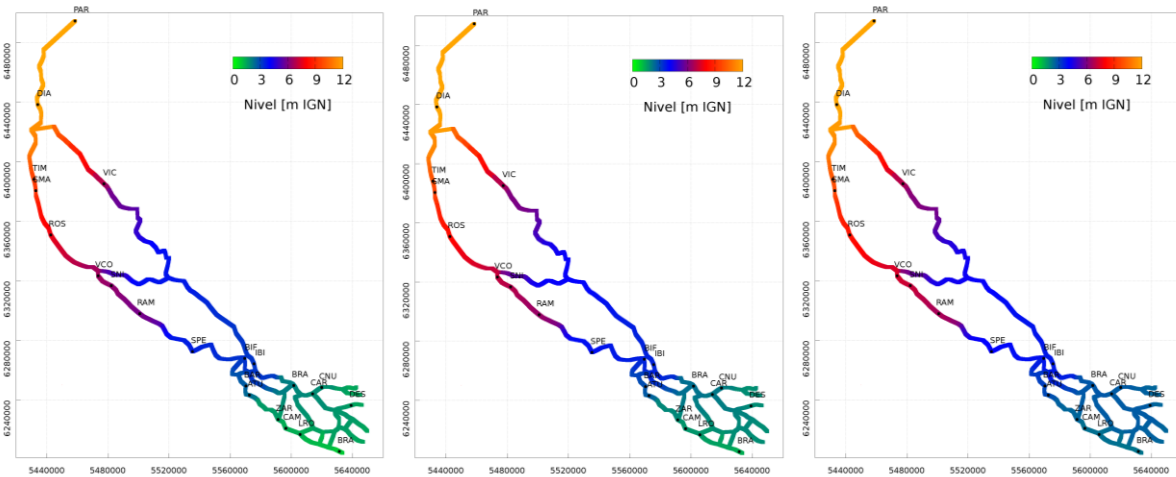


Figura 11.- Niveles superados el 90% del tiempo (percentil 10), el 50% del tiempo (percentil 50), y el 90% del tiempo (percentil 90). Basados en la simulación del período 1994-2013.

Los mapas de la Figura 12 muestran distintas medidas de dispersión de las distribuciones de nivel en cada punto del Delta del Paraná. En el primer caso se presenta el coeficiente de variación ($CV = DES/MED$), que es una medida de la dispersión relativa de un conjunto de datos y evalúa la variabilidad en relación con la media. El coeficiente de variación toma valores mayores en el Bajo Delta debido a la influencia de las oscilaciones de nivel del Río de la Plata (con algunas zonas con alta variabilidad). El segundo mapa corresponde al coeficiente de sesgo (CS), indicador que determina el grado de asimetría de la distribución.

En la zona del Bajo Delta existe una clara asimetría positiva. En el Delta Superior y el Delta Medio se advierte cierta asimetría negativa. Esto resulta consistente con lo planteado en Re y Menéndez (2012) en donde para el caso del río Paraná, en el tramo compartido con Paraguay, se nota una tendencia decreciente del coeficiente de sesgo hacia aguas abajo, que se asocia al efecto de difusión de las ondas de crecida. La esbeltez de la distribución en cada punto del dominio del modelo, medida por el coeficiente de curtosis (CC), se muestra en el tercer mapa observándose que en el Delta Medio se estarían dando distribuciones menos esbeltas, mientras que en el Bajo Delta se presentan distribuciones con valores más concentrados alrededor de la media.

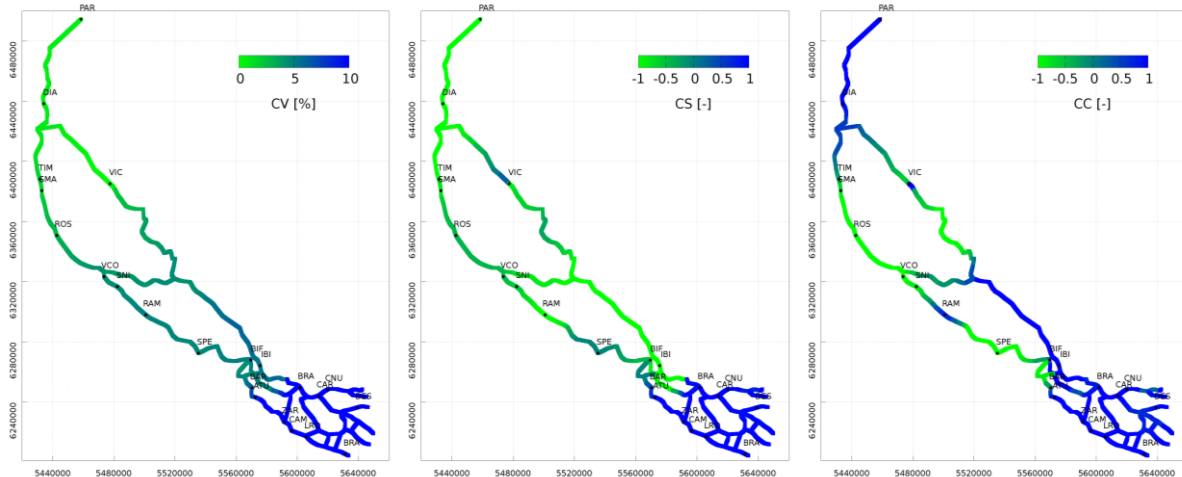


Figura 12.- Coeficiente de variación (CV), coeficiente de sesgo (CS) y coeficiente de curtosis (CC). Basados en la simulación del período 1994-2013.

Con estos elementos obtenidos para la serie simulada del período 1994-2013, se centró el análisis particularmente en la dinámica de las crecidas en el Delta del Paraná: tanto para aquellas forzadas por altos caudales desde aguas arriba como para aquellas producidas por el efecto de la elevación de niveles en el Río de la Plata debido a una sudestada.

Se determinaron dos indicadores obtenidos mediante la interrelación de algunos de los estadísticos anteriormente mencionados y calculados para los períodos de los escenarios de la Tabla 1. Cada uno de los tres escenarios se identifica de la siguientes manera: C (crecida del Paraná), S (sudestada en el Río de la Plata) y N (condiciones normales).

Ante el caso de una crecida proveniente desde el río Paraná, con el indicador que evalúa la diferencia relativa entre los máximos niveles obtenidos en el escenario de crecida (C) respecto de los valores medios del escenario de condiciones medias (N), se puede observar como en el Bajo Delta el brazo Paraná Guazú toma protagonismo respecto de lo que sucede en el brazo Paraná de las Palmas (Figura 13). En el Paraná de las Palmas el cambio en los niveles debido a la crecida es del orden de un 50% respecto de las condiciones medias, mientras que en el brazo Paraná Guazú es de más del 100%. En el resto del sistema, Delta Superior y Delta Medio el impacto de una crecida fluvial es similar.

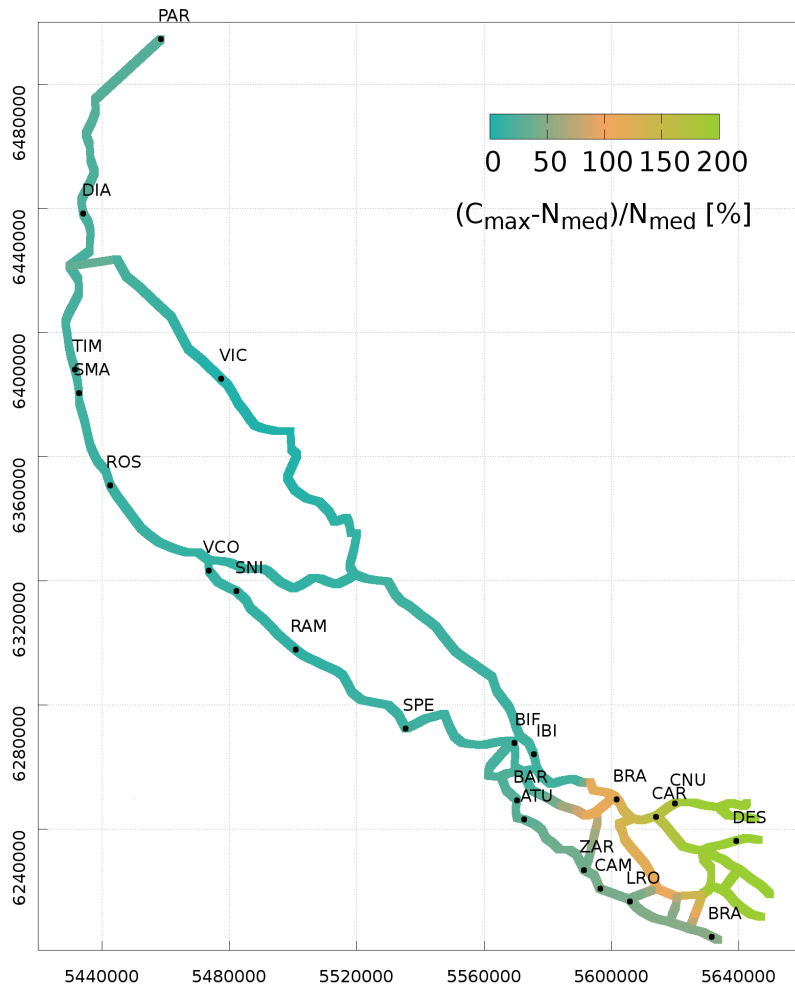


Figura 13.- Indicador de influencia de una crecida del río Paraná en el Delta.

La situación del impacto de una sudestada en el Río de la Plata se analiza con el indicador que evalúa la diferencia relativa entre los máximos niveles obtenidos en el escenario de sudestada (S) respecto de los valores medios del escenario de condiciones medias (N). El impacto de una sudestada se identifica claramente en todo el Bajo Delta (hasta el punto en donde se bifurca el brazo principal del Paraná en los brazos Guazú y Palmas: Bifurcación, BIF), con mayor énfasis sobre el brazo Paraná Guazú y con variaciones de nivel de entre el 100 y el 200 % desde el Complejo Ferroviario Zárate – Brazo Lago (ZAR-BRA) hacia aguas abajo, aunque con un mayor alcance sobre el Paraná de las Palmas notándose el efecto con valores significativos a la altura de Atucha (ATU) y Baradero (BAR). No se distingue un impacto sensible de una sudestada en el Río de la Plata en los filamentos del Delta Superior y el Delta Medio.

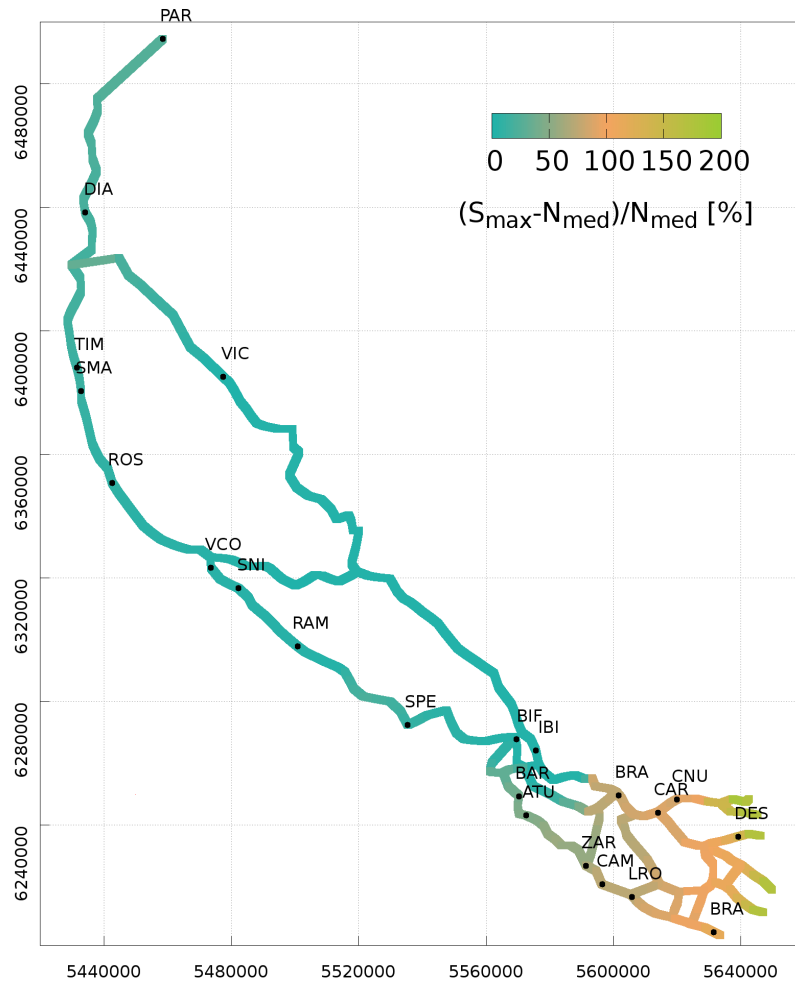


Figura 14.- Indicador de la influencia de una sudestada en el Río de la Plata en el Delta.

CONCLUSIONES

Se implementó un modelo hidrodinámico completo del Delta del río Paraná. El estado de desarrollo del modelo permite realizar análisis conceptuales sobre el comportamiento de la red de canales y se consolidada como una primera aproximación a la comprensión de fenómenos complejos que se dan en esta zona, como el comportamiento de distintos brazos durante crecidas y la relación de caudales en las bifurcaciones, y las implicancias de la penetración de la onda de marea en el Bajo Delta.

La caracterización estadística de cualquier punto del Delta del Paraná a partir de series obtenidas con simulaciones se constituye como el principal resultado de este trabajo. Se logró componer una cartografía completa en el Delta del Paraná de los estadísticos básicos de las distribuciones de niveles en cada nodo simulado por el modelo hidrodinámico.

El impacto de crecidas en el Delta del Paraná, tanto fluviales como estuarinas, se cuantificó con dos indicadores *ad-hoc*. Ante una crecida proveniente desde aguas arriba, en el Bajo Delta, el Paraná Guazú aumenta sus niveles en mayores proporciones que el Paraná de las Palmas; mientras que en el resto del sistema no se distinguen impactos desiguales. La acción

de una sudestada en el sistema se identifica con claridad en todo el Bajo Delta con mayor impacto sobre el Paraná Guazú pero con mayor alcance sobre el Paraná de las Palmas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bombardelli, F. A., Menéndez, A. N., Brea, J. D., Lapetina, M. R., Uriburu Quirno, M. (1995). Estudio hidrodinámico del Delta del río Paraná mediante modelación matemática. Informe LHA-INCyTH 137-03-95, Ezeiza, Argentina.

García, M.L., Basile, P.A., Riccardi, G.A. (2012). Modelación hidrodinámica de sistema cauce-planicie con celdas amorfas, de tramo del río Paraná Inferior. IFRH 2012, 1er. Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.

Ormazábal, P., Jaime, P.R., Spalletti, P., Brea, J.D. (2005). Implementación de un modelo hidrodinámico para el estudio de inundaciones en el Delta del Paraná. Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, RIOS 2005, Neuquén, Argentina.

Pagendam, D.E., Percival, D.B. (2015). Estimating freshwater flows from tidally affected hydrographic data. *Water Resour. Res.*, 51, 1619–1634, doi: 10.1002/2014WR015706.

Re, M., Menéndez, A.N. (2012). Estudio de impacto de fallas de Yacyreta para el PAE (Plan de Acción frente a Emergencias). Primer Informe Parcial: Análisis hidrológico. Informe LHA 01-332-12, Ezeiza, Argentina.

Sabarots Gerbec, M. (2014). Estudio de la dinámica superficial de la red de canales del Delta Medio del río Paraná. IFRH 2014, 2do. Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.

Zamanillo, E., Tito, M.J., Pérez, M. (2013). Análisis de frecuencia de niveles máximos en el Delta del río Paraná. XXIV Congreso Nacional del Agua, San Juan, Argentina, octubre.