

## **MODELACIÓN HIDRO-MORFODINÁMICA PARA PROYECTOS DE OBRAS PORTUARIAS EN RÍOS ALUVIALES: APLICACIONES EN EL RÍO PARANÁ**

**Pedro A. Basile**<sup>(1),(2)</sup>, **Gerardo Riccardi**<sup>(1),(2),(3)</sup>, **Florencia Peruzzo**<sup>(1),(4)</sup> y **Marina Garcia**<sup>(1),(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Departamento de Hidráulica-Escuela de Ingeniería Civil, FCEIA-UNR

<sup>(2)</sup>Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA-UNR

<sup>(3)</sup>Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario (CIUNR)

<sup>(4)</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina.

E-mail: [pbasile@fceia.unr.edu.ar](mailto:pbasile@fceia.unr.edu.ar)

### **INTRODUCCIÓN**

Las obras fluviales construidas en ríos aluviales, ya sea para el aprovechamiento, el control y/o la preservación de los recursos hídricos de un territorio, se han incrementado debido a la creciente necesidad de satisfacer diversas necesidades humanas. Consecuentemente, la gestión integrada y sustentable de sistemas fluviales requiere cada vez más el uso de herramientas de modelación como soporte para la planificación, el proyecto, la introducción de mejoras en el diseño y el análisis de eventuales impactos negativos sobre el medio ambiente. En este trabajo se presenta la implementación de herramientas de modelación hidrodinámica y morfodinámica como soporte para el proyecto y el análisis de impactos de obras portuarias emplazadas en el río Paraná, específicamente entre los kms 460 y 462, de la ruta de navegación troncal Santa Fe-Océano. Mediante la modelación hidrodinámica se definieron variables relevantes como profundidad de flujo, velocidades y tensiones de corte sobre el lecho para diferentes escenarios hidráulicos; las cuales permitieron determinar los procesos morfodinámicos de erosión-sedimentación general del cauce y los procesos de erosión local en correspondencia de las estructuras portuarias (muelles de atraque, dolphins de amarre, etc.) ubicadas en el cauce del río.

### **BREVE DESCRIPCIÓN DEL TRAMO DEL RÍO PARANÁ EN ESTUDIO**

En la Figura 1 se observa el tramo del río Paraná en estudio, comprendido entre km 465.4 - km 466.1 (aguas arriba) y el km 455 (aguas abajo); con la ubicación de las obras portuarias que involucran el cauce del río, sobre la margen derecha del brazo derecho, en el subtramo km 460–461.9. En la Figura 1 e) se observa el modelo digital batimétrico del cauce del río, obtenido a partir de relevamientos batimétricos realizados por la Dirección Nacional de Vías Navegables y de relevamientos batimétricos realizados por el grupo de investigación, a lo largo de más de 400 km lineales del río. Asimismo, para definir los límites del cauce se utilizaron imágenes satelitales y cartas náuticas georreferenciadas del Servicio de Hidrografía

Naval. Se observa que el cauce principal se ubica sobre el brazo derecho del río donde se verifican las mayores profundidades al cero IGN.



**Figura 1.** a y b) Tramo del río Paraná en estudio, imagen Google Earth ©; c y d) Ubicación de las estructuras portuarias en el cauce; e) Modelo digital batimétrico del cauce (m) IGN.

A macro-escala el cauce muestra una configuración morfológica donde se observan islas vegetadas que dividen el caudal total en dos brazos. En el borde aguas arriba, el caudal fluye repartido aproximadamente en partes iguales por los brazos Coronda (margen derecha) y Paraná (margen izquierda), los cuales circundan la Isla del Encanto. A partir del km 462 el caudal se reparte entre el brazo principal de margen derecha y el brazo secundario de margen izquierda, circundando la Isla Carcarañá, los cuales confluyen en el km 456. Los anchos del cauce en los distintos tramos (sin considerar las islas) varían entre 400 m y 2300 m; la relación entre el ancho y la profundidad media para márgenes llenas varía en un orden de magnitud:  $27 < B/h_m < 240$ . En la zona de implantación de las estructuras portuarias el ancho del brazo derecho es de 1100 m (km 461.3) y 800 m (km 460.5). La profundidad de flujo máxima en el tramo, correspondiente al nivel hidrométrico medio en Puerto San Martín-km 448 de 7.5 m IGN, es del orden de los 27 m en la zona del km 457.8 del brazo derecho del cauce.

## MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y MORFODINÁMICA

### Hidrodinámica

Para la modelación hidrodinámica se aplicó el modelo 1D HEC-RAS (USACE, 2015). A partir del modelo digital batimétrico del cauce se determinaron las secciones transversales que requiere el modelo. Se materializaron secciones transversales cada 200 m en el tramo completo de 11.1 km y se aumentó el nivel de detalle cada 100 m en la zona donde se emplazarán las instalaciones portuarias (subtramo km 460.0–461.9). Al existir entrada de

caudales por dos contornos y una bifurcación interna, la distribución de caudales fue definida en función de una modelación hidrodinámica 2D previa, mediante la cual se determinó que en el contorno aguas arriba el caudal total se reparte en 50% (brazo derecho) y 50% (brazo izquierdo), mientras que en la bifurcación la distribución es de 80% del caudal total derivado por el brazo derecho y un 20% derivado por el brazo izquierdo.

Para determinar los escenarios hidráulicos de simulación, se procesaron y analizaron estadísticamente datos de niveles hidrométricos (serie 1970-2018) registrados en Puerto San Martín (PSM\_km 448) y Rosario (ROS\_km 416) por la Prefectura Naval Argentina y aforos de caudales en la Estación Timbués (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación). Se definieron tres escenarios: 1) Aguas Altas, R=100 años. Nivel hidrométrico local en PSM:  $Z_w=7.03$  m ( $Z_w=10.66$  m IGN). 2) Aguas Medias-Bajas (Texced.=80%). Nivel Hidrométrico local en PSM:  $Z_w=2.76$  m ( $Z_w=6.39$  m IGN) y 3) Aguas Bajas (Texced.=100%). Nivel hidrométrico local en PSM:  $Z_w=0.02$  m ( $Z_w=3.65$  m IGN). De la curva  $Z_w$ -Q en PSM resulta: 1)  $Q=31000$  m<sup>3</sup>/s, 2)  $Q=15100$  m<sup>3</sup>/s y 3)  $Q=10100$  m<sup>3</sup>/s.

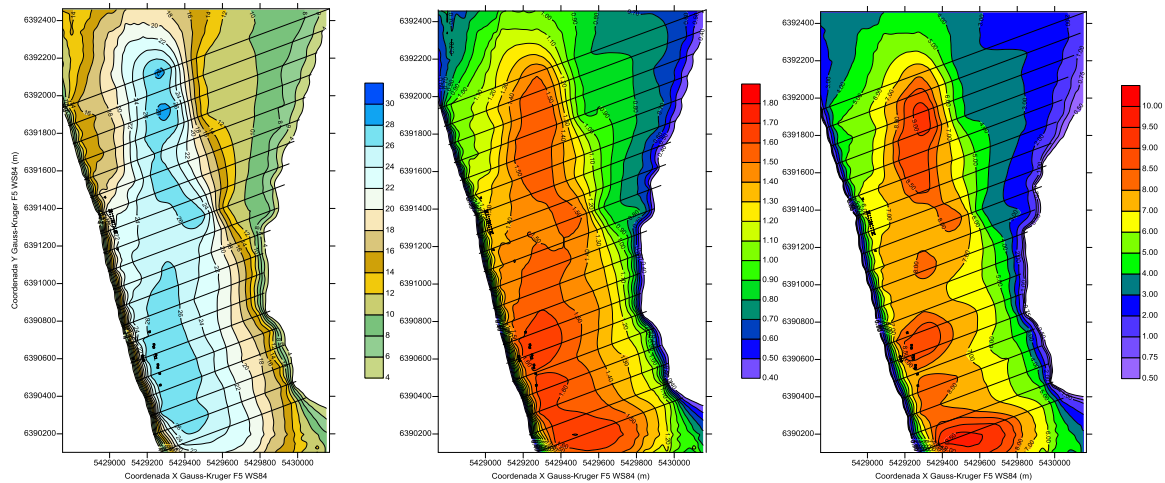
El modelo fue calibrado y validado para los tres escenarios, proponiendo valores del coeficiente de rugosidad de Manning y coeficientes de contracción-expansión en todas las secciones. Para ajustar dichos parámetros hidráulicos se compararon los niveles hidrométricos observados con los niveles calculados mediante la simulación numérica. Los niveles observados fueron estimados a partir de pendientes hidráulicas observadas para caudales similares. Tras el proceso de calibración fueron adoptados los siguientes valores de los parámetros hidráulicos: Coeficiente de rugosidad de Manning:  $0.030$  s/m<sup>1/3</sup>, coeficientes de contracción y expansión para cambios de secciones graduales: 0.2 y 0.3. En la Tabla 1 se presentan los valores de niveles observados y calculados, los errores porcentuales y una calificación del ajuste.

**Tabla 1.** Niveles hidrométricos en borde entrante brazo izquierdo (Sección km 466.1)

Escenario	Zw observ. (m) IGN	Zw calc. (m) IGN	Error (%)	Calificación del ajuste
Aguas Altas	11.44	11.44	0	Muy bueno
Aguas Medias-Bajas	6.86	6.83	- 0.43%	Muy Bueno
Aguas Bajas	3.90	3.98	+ 2.05%	Muy Bueno

En La Figura 2 se presentan las distribuciones de profundidad de flujo (m), velocidades medias en vertical 2DH (m/s) y tensiones de corte sobre el fondo (N/m<sup>2</sup>), para el escenario de aguas altas, en correspondencia con el subtramo km 460-461.9 del brazo izquierdo, que

comprende la zona de emplazamiento de las instalaciones portuarias (km 460.5 y km 461.3). Por razones de espacio no se presentan los resultados para los otros dos escenarios.



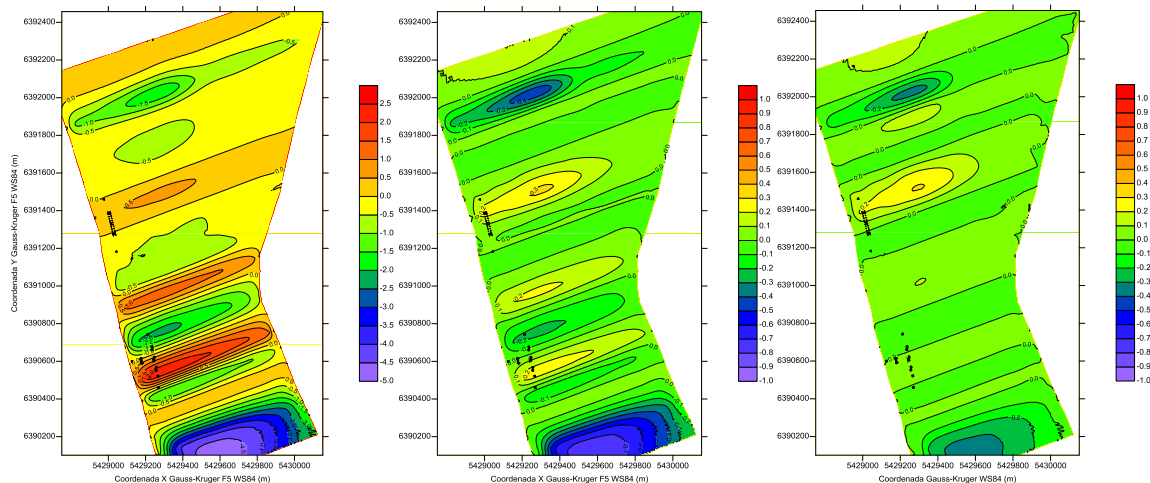
**Figura 2.** Representación en subtramo km 460–461.9 para  $Q=31000 \text{ m}^3/\text{s}$  (aguas altas) de: Profundidad (m) (izq.), Velocidad de flujo 2DH (m/s) (centro) y Tensión de corte sobre el lecho ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) (der.).

Cabe destacar que, para este escenario, en la zona de emplazamiento de las estructuras portuarias y dependiendo de su ubicación en el cauce, se observan profundidades de flujo variables entre 24-26 m y velocidades medias en vertical de 1.5-1.6 m/s (km 460.5), mientras que, en el km 461.3 las mismas son: 20-22 m y 1.3-1.4 m/s. Las tensiones de corte sobre el lecho son mucho mayores que las críticas para inicio de movimiento del sedimento del lecho (lecho vivo o con transporte) y, además, mucho mayores que las tensiones críticas de deposición de sedimentos finos transportados como carga de lavado. Lo mismo ocurre para los otros dos escenarios no mostrados.

### Erosión-sedimentación general del cauce

Para determinar los procesos de erosión-sedimentación general del cauce a partir de la hidrodinámica para las tres condiciones hidráulicas del río, es decir, para aguas altas ( $Q=31000 \text{ m}^3/\text{s}$ ), aguas medias-bajas ( $Q=15100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y aguas bajas ( $Q=10100 \text{ m}^3/\text{s}$ ), se utilizó un modelo morfodinámico, desarrollado para el presente estudio, que resuelve la ecuación de continuidad de sedimentos 1D mediante el método de diferencias finitas con esquema progresivo en el tiempo-regresivo en el espacio. Se adoptó una duración efectiva o intervalo de tiempo neto para cada uno de los caudales (aguas altas, medias-bajas y bajas) de 10 días, el cual surge del análisis de las curvas de duración de caudales elaboradas en la etapa de estudios básicos.

Para representar el sedimento del cauce, fue necesario recopilar curvas granulométricas del sedimento del lecho del río Paraná en diferentes secciones. Del análisis de tales curvas, se adoptó un  $d_{50}=0.3$  mm, el cual fue utilizado para el cálculo del transporte (lecho con sedimentos casi-uniformes) con la ecuación de transporte total de sedimentos de Engelund y Hansen (1967). A los efectos de visualizar mejor los procesos de erosión-sedimentación general del cauce, asociados a los sedimentos del lecho, las variaciones temporales del nivel medio del lecho  $\Delta z_{bm}$ , obtenidas con la representación 1D, se distribuyeron en forma 2D en cada sección transversal del subtramo en función de la relación entre la profundidad de flujo de cada faja (representación 2D del modelo HEC-RAS) y la profundidad media. En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos de variación del nivel del lecho  $\Delta z_b$ , para las tres condiciones hidráulicas del río simuladas, donde también se representan las estructuras portuarias que involucran el cauce del río.



**Figura 3.** Representación 2D en subtramo km 460–461.9 de erosión-sedimentación general del lecho,  $\Delta z_b$  (m) para: Aguas altas  $Q=31000$  m<sup>3</sup>/s (izq.), Aguas medias-bajas  $Q=15100$  m<sup>3</sup>/s (centro) y Aguas bajas  $Q=10100$  m<sup>3</sup>/s (der.).  $\Delta z_b < 0$  (erosión),  $\Delta z_b > 0$  (sedimentación).

### Erosión local en las estructuras portuarias

Para la determinación de la erosión local en las estructuras portuarias ubicadas en el cauce se utilizó la metodología para pilas de geometría compleja de Jones y Sheppard (2000), la cual se basa en la ecuación de erosión local de la Colorado State University (CSU). Dicha metodología consiste en determinar la profundidad de erosión por superposición de efectos, sumando las contribuciones de cada elemento estructural: columna, cabezal y grupo de pilotes (Basile, 2018). En este caso, solo se contempla la contribución del cabezal del delfín o del tablero del muelle y de los correspondientes grupos de pilotes que conforman

las fundaciones. En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos para aguas altas  $Q=31000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Lo mismo se realizó para aguas medias y bajas (por razones de espacio no se presentan). En dicha Tabla se indica: **Estructura**: nombre asignado a cada elemento estructural agrupado de las instalaciones portuarias del cauce; **Sección**: sección transversal de referencia para variables de flujo; **Dist.**: distancia desde margen derecha al borde más aguas adentro del grupo estructural; **U**: velocidad media en la vertical correspondiente a Dist.; **h**: profundidad de flujo local correspondiente a Dist.; **F**: número de Froude local; **NTP**: número total de pilotes que componen el grupo estructural; **b**: diámetro de los pilotes; **b<sub>p</sub>**: ancho del grupo de pilotes proyectados sobre un plano normal a la dirección de flujo; **K<sub>sp</sub>**: coeficiente de separación entre los pilotes; **b<sub>pg</sub>\***: ancho efectivo del grupo de pilotes (función de b<sub>p</sub> y K<sub>sp</sub>); **Δz<sub>b</sub>**: variación del nivel del lecho (erosión local); **W<sub>s</sub>**: ancho de la hoyo de erosión a cada lado del grupo estructural considerado.

**Tabla 2.** Resumen de resultados de erosión local en estructuras portuarias para aguas altas,  $Q=31000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Caudal en brazo derecho (km 460-461.9)  $Q=24800 \text{ m}^3/\text{s}$ .

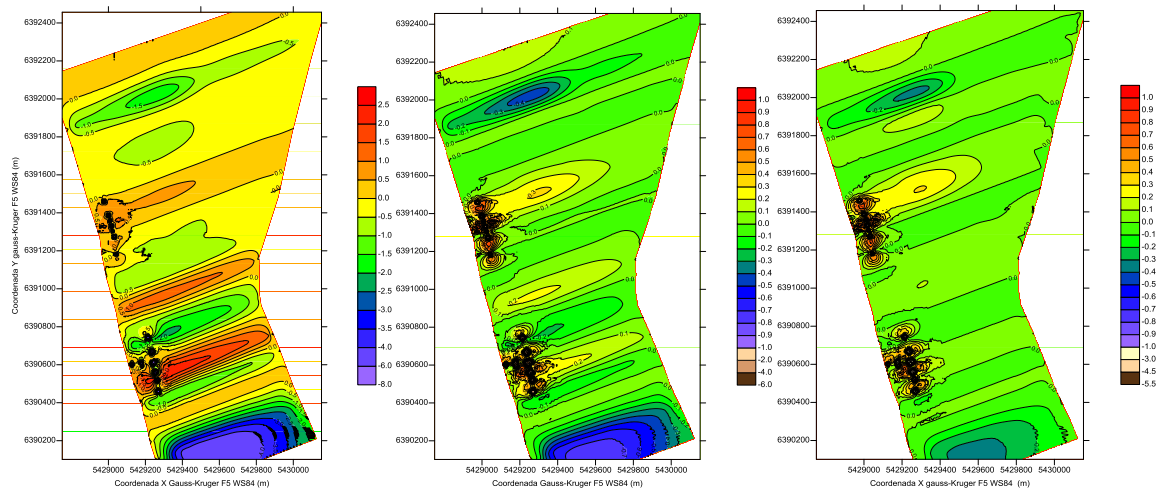
Estructura	Sección (km)	Dist (m)	U (m/s)	h (m)	F (-)	NTP (-)	b (m)	b <sub>p</sub> (m)	K <sub>sp</sub> (-)	b <sub>pg</sub> * (m)	Δz <sub>b</sub> (m)	W <sub>s</sub> (m)
Dolfin 2	461.40	70	1.240	18.540	0.0919	3	2.0	5.20	0.608	3.16	-5.05	11.1
Muelle up T03	461.30	75	1.320	21.550	0.0908	8	1.7	7.23	0.438	3.17	-5.30	11.7
Muelle G2	461.30	75	1.320	21.550	0.0908	6	1.7	8.50	0.252	2.15	-4.12	9.1
Muelle central T02	461.25	80	1.335	21.875	0.0911	6	1.7	7.23	0.438	3.17	-5.34	11.7
Muelle G1	461.25	80	1.335	21.875	0.0911	6	1.7	8.50	0.252	2.15	-4.14	9.1
Muelle down T01	461.20	86	1.350	22.200	0.0915	8	1.7	7.23	0.438	3.17	-5.37	11.8
Dolfin 1	461.10	81	1.360	22.450	0.0916	3	1.7	4.42	0.568	2.51	-4.64	10.2
Dolfin 2	460.60	136	1.610	26.160	0.1005	4	1.8	5.04	0.559	2.82	-5.49	12.1
Muelle up	460.60	136	1.610	26.160	0.1005	8	1.8	7.65	0.476	3.64	-6.48	14.3
Muelle G3	460.50	24	0.900	11.840	0.0835	4	1.8	6.30	0.583	3.67	-4.57	10.0
Muelle G2	460.50	75	1.590	26.420	0.0988	10	1.8	9.00	0.533	4.80	-7.73	17.0
Muelle G1	460.50	140	1.640	27.470	0.0999	10	1.8	9.90	0.486	4.81	-7.89	17.4
Muelle G4	460.45	140	1.615	27.530	0.0983	8	1.8	7.65	0.476	3.64	-6.54	14.4
Muelle down	460.40	137	1.590	27.590	0.0966	4	1.8	4.50	0.588	2.65	-5.28	11.6
Dolfin 1	460.35	110	1.615	27.580	0.0982	4	1.8	5.04	0.559	2.82	-5.54	12.2

La erosión local total se obtiene sumando las erosiones-sedimentaciones generales del cauce y las erosiones locales en las estructuras portuarias. La erosión local total se incrementa cuando el lecho, localmente en ese lugar, experimenta contemporáneamente una erosión general y disminuye cuando se verifica una sedimentación general. Los valores de variación del nivel del lecho  $\Delta z_b$ , debido a erosión-sedimentación general del cauce, fueron seleccionados a partir de la distribución 2D simulada. En la Tabla 3 se resumen los resultados obtenidos para aguas altas.

**Tabla 3.** Resumen de resultados de erosión local total en estructuras portuarias para aguas altas,  $Q=31000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Caudal en brazo derecho  $Q=24800 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Estructura	Sección (km)	Dist (m)	$\Delta z_b$ Local (m)	$\Delta z_b$ Gral. (m)	$\Delta z_b$ Total (m)
Dolfin 2	461.40	70	-5.05	-0.096	-5.15
Muelle up T03	461.30	75	-5.30	0.506	-4.80
Muelle G2	461.30	75	-4.12	0.506	-3.61
Muelle central T02	461.25	80	-5.34	0.269	-5.07
Muelle G1	461.25	80	-4.14	0.269	-3.88
Muelle down T01	461.20	86	-5.37	0.031	-5.34
Dolfin 1	461.10	81	-4.64	-0.422	-5.07
Dolfin 2	460.60	136	-5.49	-2.028	-7.52
Muelle up	460.60	136	-6.48	-2.028	-8.51
Muelle G3	460.50	24	-4.57	0.134	-4.43
Muelle G2	460.50	75	-7.73	0.298	-7.43
Muelle G1	460.50	140	-7.89	0.310	-7.58
Muelle G4	460.45	140	-6.54	1.287	-5.25
Muelle down	460.40	137	-5.28	2.264	-3.02
Dolfin 1	460.35	110	-5.54	0.421	-5.12

En la Figura 4 se presentan, las distribuciones 2D de los procesos de erosión-sedimentación general del cauce (en términos de variación de nivel del lecho,  $\Delta z_b < 0$ : erosión,  $\Delta z_b > 0$ : sedimentación), superpuestas con las erosiones locales totales del lecho en correspondencia con los dolfinos de amarre y muelles de atraque de las instalaciones portuarias.



**Figura 4.** Representación 2D en subtramo km 460–461.9 de erosión-sedimentación general del lecho superpuesta con erosión local en estructuras portuarias,  $\Delta z_b$  (m) para: Aguas altas  $Q=31000 \text{ m}^3/\text{s}$  (izq.), Aguas medias-bajas  $Q=15100 \text{ m}^3/\text{s}$  (centro) y Aguas bajas  $Q=10100 \text{ m}^3/\text{s}$  (der.).  $\Delta z_b < 0$  (erosión),  $\Delta z_b > 0$  (sedimentación).

Comparando las Figuras 3 y 4, puede observarse que el efecto morfodinámico de las instalaciones es netamente local y se circunscribe estrictamente a la zona del lecho donde se fundan las estructuras. Tanto aguas arriba como aguas abajo de cada instalación portuaria y también en las secciones transversales en correspondencia con las mismas, los

procesos de erosión-sedimentación general del cauce no son alterados. Es decir, las estructuras portuarias, al no modificar el patrón hidrodinámico del cauce del río Paraná, tampoco afectan los procesos asociados de erosión-sedimentación general del cauce del río.

El resultado obtenido es consistente con el tipo de estructuras interpuestas al flujo, sus dimensiones y las características hidromorfológicas locales del cauce del río. Las estructuras son altamente “transparentes” y ofrecen un obstáculo mínimo al flujo global del río, para todos los caudales modelados. Las mismas están emplazadas en secciones transversales del cauce cuyos anchos son de 1100 m (km 461.3) y 800 m (km 460.5) y áreas mojadas para aguas altas de 20000 m<sup>2</sup> y 17000 m<sup>2</sup> respectivamente. Los porcentajes de dichas áreas, interceptadas por las estructuras portuarias consideradas en bloque son iguales al 1% (km 461.3) y 2% (km 460.5), es decir, se trata de valores no significativos en el contexto del flujo global de agua y sedimentos del río.

## CONCLUSIONES

La modelación realizada ha permitido determinar los procesos hidrodinámicos y morfodinámicos de erosión-sedimentación general del cauce, como así también, estimar las erosiones locales en las estructuras portuarias fundadas en el lecho del río Paraná. Se han determinado parámetros de diseño para la construcción de las estructuras, es decir, los niveles de coronamiento de los cabezales de los dolphins y del tablero de los muelles, como así también, las cotas de erosión total en los grupos de pilotes de fundación de las estructuras. Asimismo, se ha analizado el impacto hidromorfológico generado por las estructuras, determinándose que las mismas no modifican el patrón hidrodinámico del río Paraná y consecuentemente no tienen influencia en los procesos asociados de erosión-sedimentación general del cauce. El impacto producido es netamente local y se circunscribe estrictamente a la zona del lecho donde se fundan las estructuras.

**Agradecimiento.** Los autores agradecen a la UNR por el apoyo brindado mediante los PID, ING509 e ING514.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Basile, P.A.** (2018). *Transporte de Sedimentos y Morfodinámica de Ríos Aluviales*. UNR Editora, 1a Edición 455 p., ISBN 978-987-702-257-5. Sitio Internet: URI: <http://hdl.handle.net/2133/10738>
- Jones, J.S. y Sheppard, D.M.** (2000). *Local Scour at Complex Pier Geometries*. Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, ASCE, 2000.
- Engelund, F. y Hansen, E.** (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Report, Technical University of Denmark, Hydraulic Lab., January 1967, Copenhagen, Denmark.
- USACE** (2015). HEC-RAS. 5.0.0. *River Analysis System*. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.