

SEDIMENTACIÓN EN CANALES DEL BAJO DELTA DEL PARANÁ SEDIMENTATION IN THE PARANÁ LOWER DELTA STREAMS

Martín Sabarots Gerbec^{a,b} y Julián E. Cortese^{a,c}

^aLaboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina, msabger@gmail.com,
<http://www.ina.gob.ar/>

^bFacultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, mssabarots@fi.uba.ar,
<http://www.fi.uba.ar/>

^cInstituto de Geociencias, Universidad de Kiel, Kiel, Alemania, julian.e.cortese@gmail.com,
<https://www.uni-kiel.de/>

Palabras clave: sedimentación, tensiones de corte, dragado.

Resumen. La sedimentación de los cursos que componen la red de canales del Bajo Delta del río Paraná es un fenómeno que afecta las actividades de quienes habitan y trabajan en el Delta. Debido a la falta de tareas de dragado de forma sistemática, resulta cada vez más frecuente la imposibilidad de navegar ciertos cursos ante escenarios de aguas bajas. A partir de información batimétrica, hidrométrica y sedimentológica relevada in situ, se desarrolla un modelo morfodinámico de un curso del Delta para estudiar los principales factores que contribuyen a la acreción de estos canales. Entre los factores a estudiar se encuentran las condiciones de contorno, específicamente los niveles de marea ingresantes por los extremos del canal, la condición hidrológica del río Paraná, las características del sedimento y una aproximación al efecto de la vegetación acuática sobre la rugosidad del canal. Como resultado se busca aportar conocimiento sobre el comportamiento hidro-sedimentológico de la condición batimétrica actual del curso, como así también de las circunstancias hidrodinámicas que propiciaron el desarrollo de la misma.

Keywords: acretion, shear stress, dredging

Abstract. The sedimentation of the waterways that make up the channel network of the Lower Delta of the Paraná River is a phenomenon that affects the activities of those who live and work in the Delta. Due to the lack of systematic dredging, it has become increasingly common to encounter difficulties navigating certain waterways during low water scenarios. Based on bathymetric, hydrometric, and sedimentological information collected in situ, a morphodynamic model of a Delta waterway is developed to study the main factors contributing to the accretion of these channels. Among the factors to be examined are the boundary conditions, specifically the tide levels entering through the ends of the channel, the hydrological conditions of the Paraná River, the characteristics of the sediment, and an approach to the effect of aquatic vegetation on the roughness of the channel. The aim is to provide insight into the hydro-sedimentological behavior of the current bathymetric condition of the waterway, as well as the hydrodynamic circumstances that facilitated its development.

1. INTRODUCCIÓN

El Bajo Delta del río Paraná presenta una red de canales naturales y artificiales que posibilitan el acceso a las islas donde se desarrollan actividades productivas (forestación, ganadería, apicultura, turismo, etc). La navegación en estos cursos es crítica no solo para el transporte de carga, sino de pasajeros a establecimientos educativos, de salud y recreativos.

Las características hidrodinámicas de este sector del Delta, fuertemente influenciado por la onda de marea del estuario del Río de la Plata, la carga de sedimentos propia del río Paraná y actividades antrópicas, han condicionado la navegación (Brok (2022)). Actualmente, muchos de los cursos presentan tramos con bajo calado, afectando la navegabilidad especialmente en eventos de bajante, con las complicaciones para los distintos actores que eso conlleva.

Conocer las causas de la progresiva sedimentación de los canales y el desarrollo de una herramienta de simulación del fenómeno, facilita la comprensión y permite realizar proyecciones futuras de cómo evoluciona morfológicamente el Bajo Delta.

2. OBJETIVO

Teniendo en cuenta la complejidad del comportamiento de la red de canales, este trabajo se enfoca en reproducir correctamente la hidrodinámica de un curso, definir los factores que contribuyen a la sedimentación y poder de esta forma sentar las bases para un desarrollo futuro de todo el sistema. Se estudia el arroyo Carapachay, que vincula el río Paraná de las Palmas con el río Luján, siendo representativo de la dinámica de los demás canales del Delta. Como resultado, se analizan las tensiones de corte que afectan la sedimentación y cómo son influenciados por la fricción del curso o la onda de marea. La Fig. ?? presenta el perfil de profundidades típico de estos arroyos con menor calado en el tramo medio de los mismos.

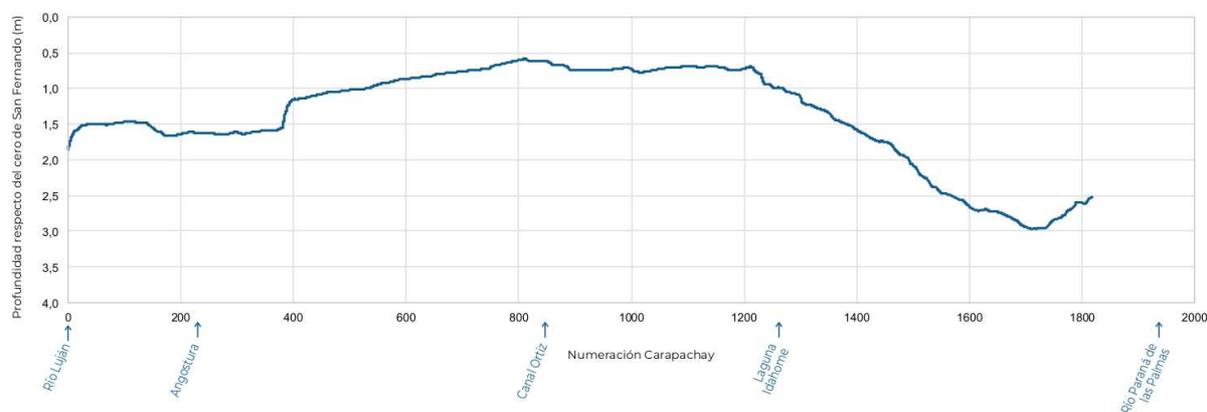


Figura 1: Perfil de profundidades del arroyo Carapachay

3. METODOLOGIA

3.1. Implementación del modelo

A fin de modelar el comportamiento hidrodinámico del arroyo Carapachay, se implementó un modelo numérico empleando el software Delft3D. En particular se utilizó el módulo FLOW, que resuelve mediante el método de diferencias finitas las ecuaciones de Navier Stokes bidimensionales para un fluido incompresible, considerando aguas poco profundas y asumiendo una distribución hidrostática de presión en la dimensión vertical. Un esquema de modelación

análogo ya fue empleado en la Río de la Plata (Cortese (2022)), donde la red de canales desemboca.

El dominio de cálculo (Fig. 2) se extiende entre las bocas intersección del arroyo con los ríos Paraná de las Palmas y Luján. El mismo fue discretizado a través de una malla bidimensional curvilínea ortogonal. La dimensión media de las celdas de cálculo es de 6,5 m longitudinal por 2,5 m transversal.

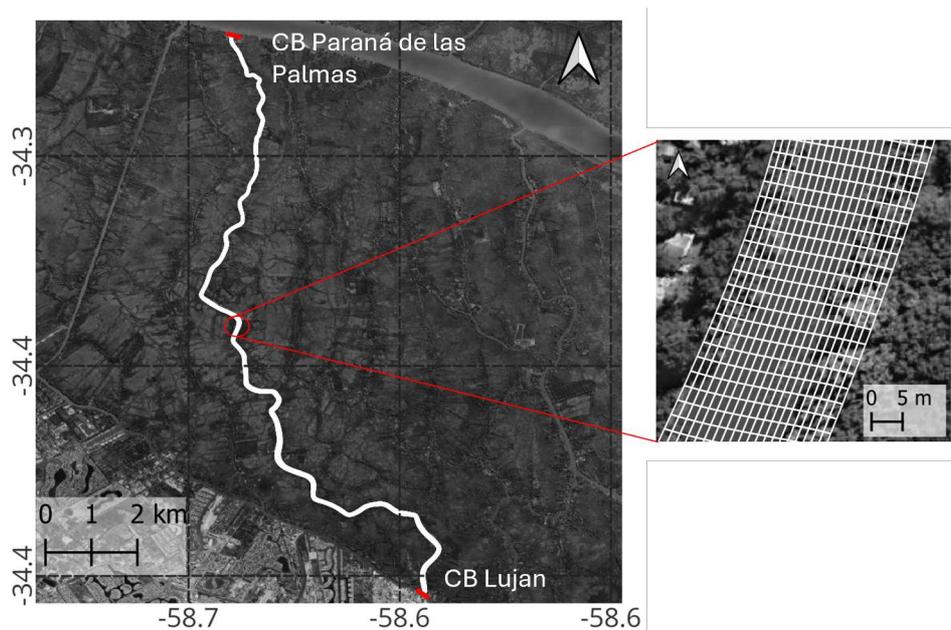


Figura 2: Dominio de cálculo y mallado.

Las condiciones de borde abiertas corresponden a ambas desembocaduras y fueron forzadas de dos formas diferentes según el tipo de simulación que se fuera a ejecutar. Para aquellos escenarios de situaciones reales, se emplearon series temporales de nivel obtenidas de un modelo numérico del Delta del río Paraná (Guizzard et al. (2022)), mientras que para aquellas simulaciones de explotación del modelo se utilizó componentes de marea obtenidas del análisis armónico hecho a las ya mencionadas series de niveles. Las componentes armónicas de marea empleadas fueron la M2, O1, N2, K1, S2, Q1 y M4, dado que son las que explican en mayor medida la marea astronómica del Río de la Plata, estuario de donde el Delta del río Paraná obtiene su comportamiento astronómico.

El parámetro alfa de reflexión fue definido en 100 s con el fin de evitar la propagación de ondas de segundo orden dentro del dominio de cálculo. La discretización temporal empleada es de 6 s. Las condiciones de borde cerradas se caracterizan por la condición de impermeabilidad, siendo en esos puntos la velocidad ortogonal nula.

Para el modelado de la rugosidad de fondo se empleó un coeficiente de Manning variable en función de la profundidad. La implementación de esta estrategia resulta necesaria al considerar tanto la colonización vegetal que caracteriza a los faldones de las islas (Fig. 3) como así también la deposición de ramas, troncos y otros elementos sueltos. El proceso de definición de dichos mapas se realizó de forma iterativa, siendo este parámetro la variable de ajuste durante la calibración del modelo, tomando como variables de control el nivel del agua medido en un punto intermedio del arroyo y el caudal instantáneo medido en la desembocadura del río Paraná de las Palmas.



Figura 3: Vegetación característica en las márgenes de los arroyos

3.2. Calibración del modelo

El período de calibración se determinó en función de la disponibilidad de datos de caudales medidos en la desembocadura del arroyo Carapachay sobre el río Paraná de las Palmas. El mismo comprende los días entre el 15/03/2022 y el 30/03/2022. Los mapas de coeficiente de Manning propuestos consisten de una función lineal definida por partes dependiente de la profundidad. A menor profundidad, se considera que la mayor colonización vegetal y acumulación de diversos residuos impacta en la rugosidad del curso. La (Fig. 4) presenta la variación de la rugosidad en función de la profundidad ensayada.

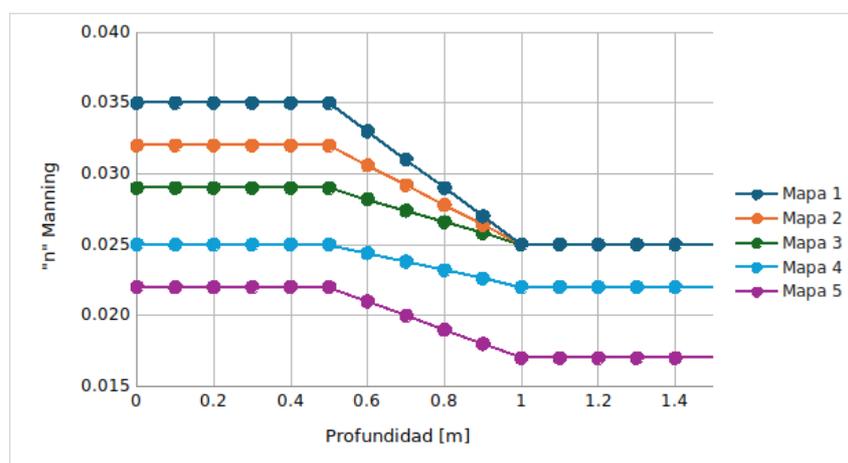


Figura 4: Variación de Manning en función de la profundidad

3.3. Explotación del modelo

La explotación del modelo buscó comprender la influencia de dos factores: el dragado y las crecidas naturales del río Paraná. En primer lugar, dado que se tiene conocimiento de información de dragado durante la década del '80, que uniformizaron las profundidades a lo largo del perfil longitudinal, se evalúa el modelo ante dicha condición, carente de colonización vegetal u obstrucciones. En este sentido, se empleó el modelo obtenido para simular las condiciones

hidrodinámicas imperantes en la condición dragada del canal. Para ello se definió una profundidad de calado igual a 3 m. A lo largo del curso, partiendo de la batimetría actual, en cada sección transversal se reemplazó la máxima profundidad por dicho valor, imponiendo luego una pendiente de 1:2 a cada lado, siempre y cuando la profundidad actual resultara menor a dicho valor. Esta nueva batimetría fue empleada para simular el mismo intervalo de simulación usado en la calibración con el propósito de analizar qué distribución de tensiones de corte y así inferir el desarrollo morfológico del curso. En segunda instancia, se simuló un período de 15 días con la batimetría actual y condiciones de borde puramente astronómicas ensayando distintas sobreelevaciones del río Paraná sobre el Luján, a fin de cuantificar el efecto del desnivel Palmas-Luján sobre la sedimentación sobre el curso.

4. RESULTADOS

4.1. Calibración

Para definir el mapa de coeficiente de Manning a ser empleado en el modelo se compararon en primera instancia las series de niveles modeladas y la observada (Fig. 5). Debido a la extensión del dominio de cálculo y a la configuración de las condiciones de borde, la sensibilidad al coeficiente de Manning sobre esta variable es limitada. Sin embargo, se puede observar que el modelo representa correctamente las condiciones medias del sistema, mientras que para condiciones particulares la desviación entre simulación y medición es mayor. Debido a la baja influencia que el coeficiente de Manning tiene sobre las series temporales simuladas, se concluye que la fuente de estos errores se haya en el modelo empleado como condición de borde y por ende no es un factor que pueda ser corregido en la etapa de calibración del modelo en desarrollo.

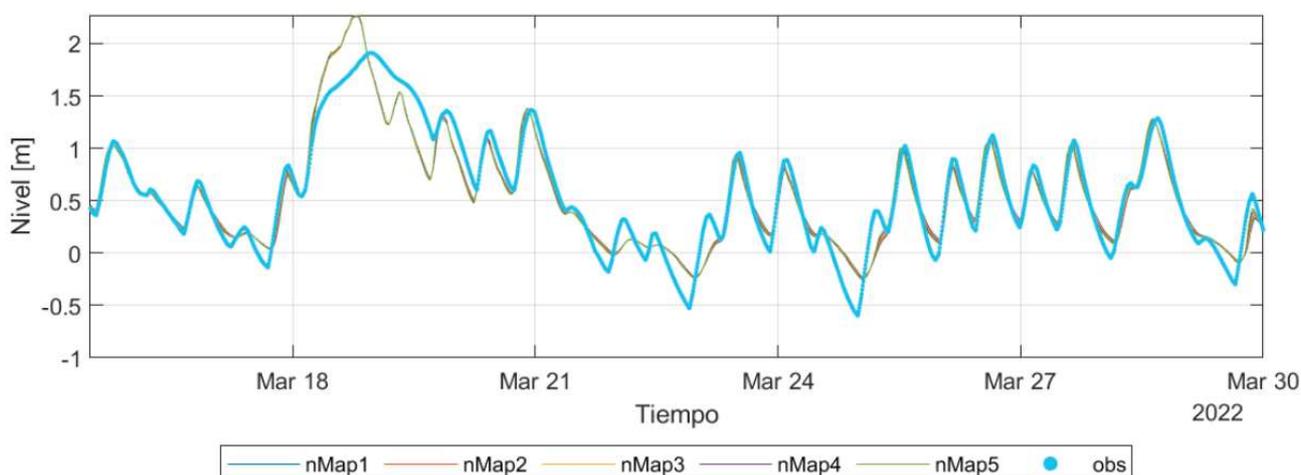


Figura 5: Series de nivel observada y simuladas.

Si bien el acuerdo entre observaciones y simulaciones presenta desviaciones en ciertos eventos presentes en el sistema, el comportamiento medio del mismo está bien representado, como puede observarse en los períodos comprendidos entre el inicio de la simulación y el 18/03 y entre el 25/03 y el fin de la misma. Al calcular el error cuadrático medio para cada una de las simulaciones (Tabla 1) se constata que la diferencia implicada por diferentes coeficientes de Manning es poco significativa, en tanto la diferencia en el error no alcanza el orden de magnitud del centímetro.

Mapa de Manning	1	2	3	4	5
RMSE (m)	0.1711	0.1698	0.1693	0.1695	0.1718

Tabla 1: Error de las series de nivel simuladas.

El caudal, medido en la cercanía de la boca del arroyo Carapachay sobre el río Paraná de las Palmas, fue la segunda variable empleada en la calibración del modelo (Fig. ??). Se observa en primera instancia que la reversión del flujo en dicho punto del curso logra simularse correctamente, obteniendo caudales de distinto signo a lo largo del ciclo de marea. En términos de la calibración, se observa que si bien los distintos mapas de coeficiente de Manning no se diferencian sustancialmente uno de los otros, el Mapa 1 representa cierta mejora respecto a los otros en tanto a la fase de la onda, especialmente en el mínimo, cuando representa dicho valor una aproximadamente una hora más tarde que el resto de las configuraciones ensayadas. Siendo que en términos de nivel qué mapa de Manning se emplee no tiene grandes efectos y a la mejora obtenida con el Mapa 1, se determina que esta será la configuración a ser empleada en la explotación del modelo.

A partir de las series temporales de tensiones de corte en cada punto del dominio, fueron procesados perfiles longitudinales con valores medios y percentiles 10 y 90. (Fig. 6).

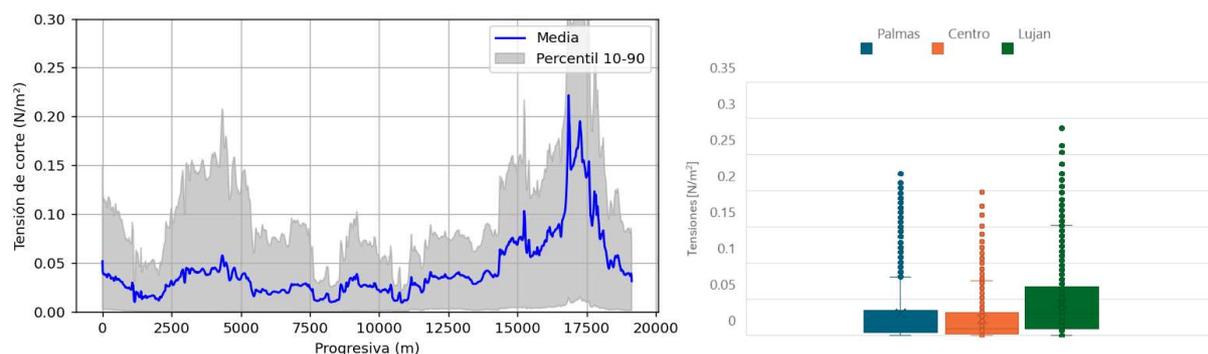


Figura 6: Perfil y boxplot de tensiones de corte en la condición actual.

Además se presenta un boxplot de tres puntos representativos del perfil, donde se desprende que las mismas a lo largo del curso tienden a ser bajas, ubicándose los bigotes superiores para la ubicación del Palmas y el centro en 0.080 N/m^2 y para el caso del Luján en 0.150 N/m^2 . En la comparativa entre las tres series temporales, se observa que en la boca del Luján las tensiones son sensiblemente mayores, con una mediana igual a $0,011 \text{ N/m}^2$, mientras que para el centro del curso y la boca del Paraná de las Palmas la mediana es de 0.009 y 0.012 N/m^2 , respectivamente. Independientemente de la tensión crítica de sedimentación que haya en el lugar, estos resultados señalan que en el centro del curso, aún en la condición morfológica actual, proporcionalmente se sedimenta más material en el centro del curso que en los extremos del mismo.

4.2. Explotación del modelo

4.2.1. Condición dragada

La simulación realizada con la batimetría dragada permitió el análisis del sistema inmediatamente luego de la modificación antrópica. Las tensiones de corte registradas en las tres regiones del modelo (Fig. 7) muestran no sólo una reducción en los niveles generales de las tensiones de corte en el curso, sino también una mayor disparidad entre las tensiones presentes en los extremos del curso y el centro. Mientras que en las desembocaduras del Palmas y del Lujan

las medianas de tensiones resultaron ser 0.008 y 0.011 N/m², respectivamente, en el centro del curso dicho valor adoptó un valor de 0.001 N/m². Esta disparidad indicaría que ante el dragado del canal, la región central del mismo es un ambiente que propicia sustancialmente más la sedimentación que las bocas.

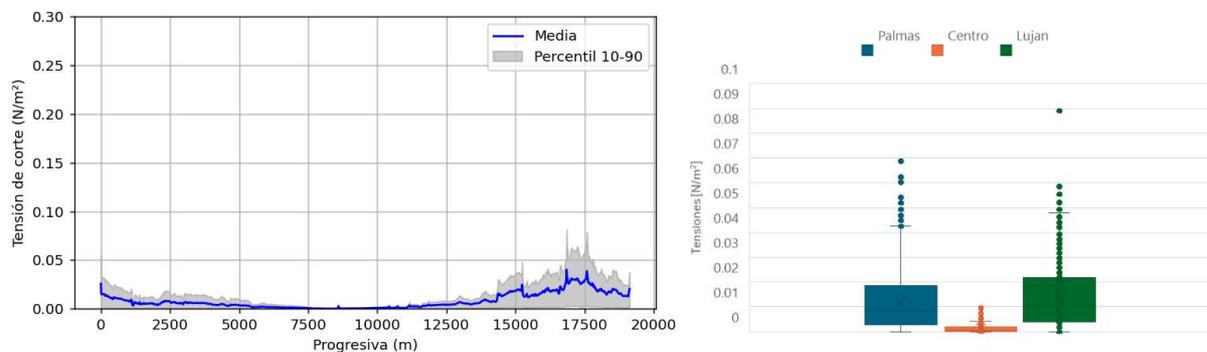


Figura 7: Perfil y boxplot de tensiones de corte en la condición actual.

4.2.2. Efecto de crecidas del Paraná

El efecto de crecidas del Paraná, se tubo en cuenta superponiendo sobreelevaciones del nivel sobre las condiciones de marea media en los extremos del arroyo. En este sentido, primero se realizó un análisis armónico a las series de nivel de superficie en la desembocadura del arroyo Carapachay sobre el Paraná de las Palmas y el Luján. Se obtuvieron las componentes de marea astronómica principales en cada punto (Tabla 2). Se observa que las componentes M2, O1 y N2 en ambos puntos representan aproximadamente el 70 % de la amplitud de marea. Adicionalmente, las fases de dichas componentes sobre el río Luján son 10.6, 7.3 y 10.2 radianes menores que sobre el Paraná de las Palmas, indicando que la onda tiene los máximos con antelación.

Componente	Luján		Palmas	
	A[m]	ϕ [rad]	A[m]	ϕ [rad]
M2	0.228	243.7	0.168	254.3
O1	0.138	235.6	0.114	242.9
N2	0.082	204.1	0.062	214.3
K1	0.082	39.8	0.007	46.8
S2	0.037	340.3	0.027	352.4
Q1	0.046	209.1	0.039	215.8
M4	0.021	26.6	0.017	35.1

Tabla 2: Componentes astronómicas de marea.

Las condiciones de borde astronómicas fueron incorporadas con sobreelevaciones del Paraná de las Palmas respecto al Luján igual a 0, 10, 20, 30 y 40 cm. Las tensiones de corte medianas obtenidas de las simulaciones (véase la Fig. 8) en los puntos cercanos a los extremos del curso muestran un aumento sostenido y prácticamente lineal a medida que la sobreelevación aumenta. Sin embargo, en el centro del curso se observa un comportamiento exponencial, con un abrupto incremento de la tensión mediana a partir de los 20 cm de sobreelevación, implicando que el dominio del comportamiento astronómico proveniente del Río de la Plata halla allí su límite.

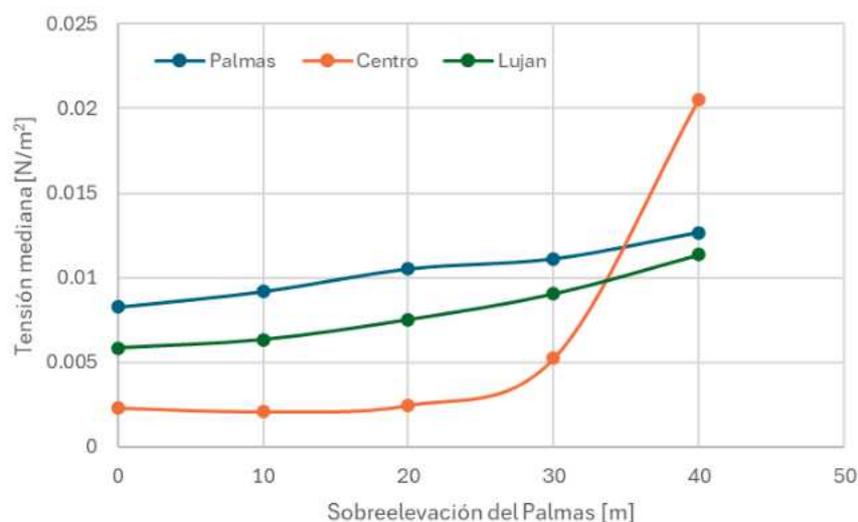


Figura 8: Tensiones en función de la sobreelevación del Palmas.

5. DISCUSIÓN

Mediante el modelo numérico desarrollado se puede observar el impacto sustancial que medidas antrópicas en cursos como el arroyo Carapachay pueden tener. En particular, se ha mostrado que ante una condición inicial de dragado, las tensiones de corte a lo largo del curso son no sólo menores que las obtenidas con batimetrías más someras, sino también dispares, ubicándose en el centro del mismo un nodo de tensiones donde naturalmente tenderá a haber mayor sedimentación. Mientras tanto, en ambos extremos del curso las tensiones resultan superiores, propiciando entonces en menor medida la sedimentación del material suspendido. Es importante mencionar que toda consideración en términos de sedimentación hecha a partir de estos resultados es relativa a otras ubicaciones en el curso o instancia temporal, en tanto no se conocen las tensiones críticas para el área de estudio.

Adicionalmente, de los resultados obtenidos se puede inferir la evolución temporal de un curso de características similares a las del arroyo Carapachay ante un proceso de dragado como el propuesto en el presente trabajo. Inmediatamente luego del mismo, las tensiones de corte son sustancialmente más bajas que aquellas que naturalmente puede haber, producto de una mayor sección hidrodinámica. Al mismo tiempo, no producto del dragado sino por la superposición de las ondas de marea entrantes por cada extremo del curso, se forma en algún punto intermedio del mismo un nodo de velocidades. Incluso habiendo sedimentación en todo el curso, es en este punto en particular donde la mayor parte de la deposición tomará lugar.

Mediante esta sedimentación asimétrica aquella región donde tiende a darse frecuentemente el nodo de velocidades evoluciona como zona somera, su sección transversal disminuyendo consecuentemente y por ende las tensiones de corte aumentando progresivamente. De acuerdo a los resultados obtenidos, este nodo de velocidades está ligado al comportamiento astronómico del curso, que rige la dinámica general del mismo para sobreelevaciones del río Paraná de las Palmas menores a aproximadamente 35 cm. Una vez sobrepesado dicho umbral no se registra una zona de bajas tensiones de corte en el centro del canal relativamente a sus extremos.

La batimetría actual del arroyo Carapachay parece haber seguido el proceso antes mencionado. Las tensiones de corte han aumentado y principalmente la disparidad entre el centro y los extremos del curso se ha reducido.

En el futuro cercano puede esperarse que la dinámica global del curso esté aún dominada

por la sedimentación, dado que las tensiones medianas simuladas sigue aún por debajo de las tensiones críticas de sedimentación usualmente consideradas para la región. Es de esperar que en algún momento se llegue a un equilibrio dinámico donde procesos erosivos mantengan la batimetría en un rango constante de profundidades. Una alternativa a este equilibrio dinámico es la total colmatación del curso, como se tiene conocimiento de otros cursos del Bajo Delta.

6. CONCLUSIÓN

Se ha desarrollado un modelo numérico capaz de representar la hidrodinámica del arroyo Carapachay. Si bien el ajuste entre simulaciones y observaciones presenta ciertas desviaciones, resulta un avance a trabajos previos (Brok (2022)) en tanto se ha podido captar la inversión del flujo a lo largo del curso. Mediante dicho modelo se analizó indirectamente la dinámica sedimentológica del curso a lo largo del tiempo empleando la variable tensiones de corte. Se ha observado que el dragado del curso implica una abrupta caída en las mismas, fomentando mayor sedimentación. En coexistencia con la general disminución de tensiones y no producto del dragado sino de la geometría y configuración del Delta, producto de la superposición de las dos ondas de marea entrantes por sendos extremos del curso, se forma una región de bajas velocidades donde la sedimentación resulta aún más elevada.

Este estudio resulta el paso inicial de un análisis integral de la compleja red de canales del Delta del río Paraná, en tanto demuestra que mediante la hidrodinámica es factible prever la evolución morfológica de los cursos.

REFERENCIAS

- Brok L. *A Channel Network Morphodynamics in the Lower Paraná Delta: Modelling the Influence of Natural Processes and Anthropogenic Activities on Morphological Changes in the Lower Paraná Delta Channel Network*. MSc Thesis, Hydraulic Engineering at Delft University of Technology (TU Delft), 2022.
- Cortese J.E. *Avance del Frente del Delta del río Paraná: Análisis de los principales factores incidentes en el proceso*. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2022.
- Guizzardi S., Bianchi J., Cortese J., Uriburu Quirno M., y Sabarots Gerbec M. *Forecast System Implementation in the Paraná Delta*. 39th IAHR World Congress (Granada, España), 2022.