



INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA SEDIMENTACIÓN EN CANALES DE NAVEGACIÓN

Leandro D. Kazimierski^{1,2}, Mariano Re^{1,2} y Ángel N. Menéndez^{1,2}

¹ Programa de Hidráulica Computacional - Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua, Argentina

² Laboratorio de Modelación Matemática - Facultad de Ingeniería – Universidad de Buenos Aires, Argentina

E-mail: leandrokaz@gmail.com - Web: <http://laboratorios.fi.uba.ar/lmm/> <http://www.ina.gov.ar/>

RESUMEN

En el contexto del Cambio Climático, resulta necesario evaluar el impacto que podría tener la modificación de alguno de los forzantes del sistema, de acuerdo a proyecciones plausibles, sobre la sedimentación en los canales de navegación de la ruta troncal ‘*Santa Fe al Océano*’, en el Río Paraná. En este trabajo se aplica una metodología basada en la modelación matemática para evaluar impactos en términos de volúmenes de dragado de mantenimiento para distintos escenarios de cambio en los caudales del Río Paraná. El tramo estudiado corresponde al ‘*Paso Borghi*’, un paso crítico relevante del Paraná Inferior, donde el mantenimiento del canal de navegación es de vital importancia para la actividad económica de la región.

ABSTRACT

In the context of Climate Change, it is necessary to assess the potential impact that modification of some of the system driving forces, according to plausible projections, might have on sedimentation in the navigation channels of the oceanic vessels route ‘*Santa Fe to the Ocean*’, on the Paraná River. A methodology based on mathematical modeling is applied to assess impacts in terms of maintenance dredging volumes, for various scenarios of change in the discharge of the Paraná River. The study zone corresponds to ‘*Paso Borghi*’, a critical stretch at the Lower Paraná, where maintenance of the navigation channel is critical for the economic activity of the region.

INTRODUCCIÓN

La ruta de navegación troncal '*Santa Fe al Océano*', en el Río Paraná, es naturalmente navegable en la mayor parte de su recorrido. Los problemas de falta de dimensiones del canal navegable se producen en zonas muy localizadas que constituyen los denominados pasos críticos, lugares en donde la deposición del sedimento transportado por la corriente obliga a periódicas y sistemáticas operaciones de dragado de mantenimiento.

Como herramienta para la gestión de la ruta de navegación, las estimaciones de volúmenes de dragado de mantenimiento en los pasos críticos son necesarias, entre otras, para: i) evaluar alternativas de alineación de los canales a ser construidos, ii) diseñar las operaciones de dragado con el objetivo de optimizarlas, y iii) predecir los dragados de mantenimiento futuros para proyectos de profundización.

En el contexto del Cambio Climático, resulta necesario evaluar el impacto que podría tener sobre la ruta de navegación la modificación de alguno de los forzantes del sistema de acuerdo a distintas proyecciones de escenarios plausibles.

En este trabajo se aplica una metodología basada en la modelación matemática para evaluar impactos en términos de volúmenes de dragado de mantenimiento para distintos escenarios de cambio en los caudales del Río Paraná. El tramo estudiado corresponde al Paso Borghi (Figura 1), un paso crítico relevante del Paraná Inferior, cercano a la ciudad de Rosario, donde el mantenimiento del canal de navegación es de vital importancia para la actividad económica de la región.

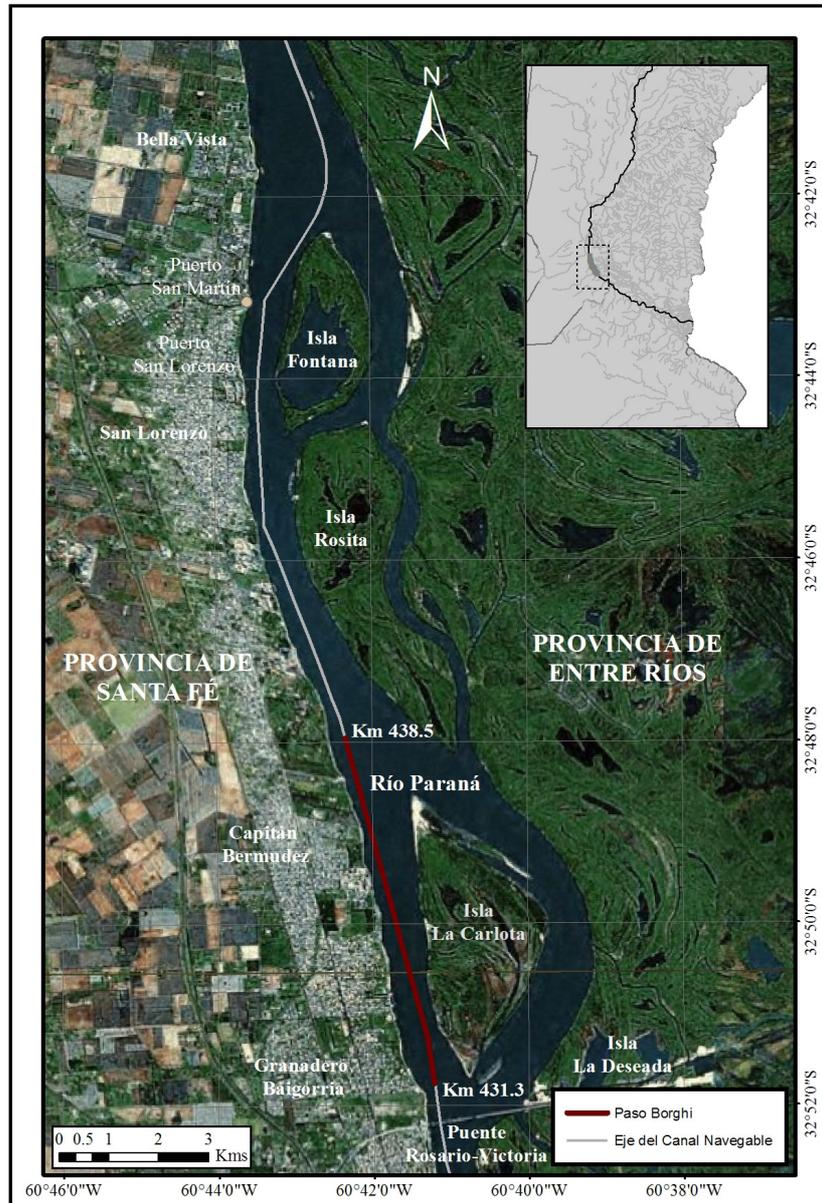


Figura 1.- Ubicación del Paso Borghi.

INFORMACIÓN DE BASE

Se contó con la información de relevamientos batimétricos y volúmenes de dragado en Paso Borghi para el período 11/Mar/2008 – 11/Mar/2009 provisto por el *Órgano de Control de Concesiones de Redragado y Señalización* perteneciente a la *Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables* (SSPyVN). Este conjunto de datos permitió caracterizar los ritmos de sedimentación y la periodicidad de mantenimiento en este paso crítico.

En la Figura 2 se presentan los niveles del Río Paraná (observados en Puerto General San Martín), junto con los dragados de mantenimiento realizados en distintas partes del tramo y su volumen asociado, y las fechas en que realizaron relevamientos batimétricos de control. En

general, se observa que en este paso crítico tanto las operaciones de dragado como la ejecución de batimetrías de control tienen una frecuencia de aproximadamente un mes.

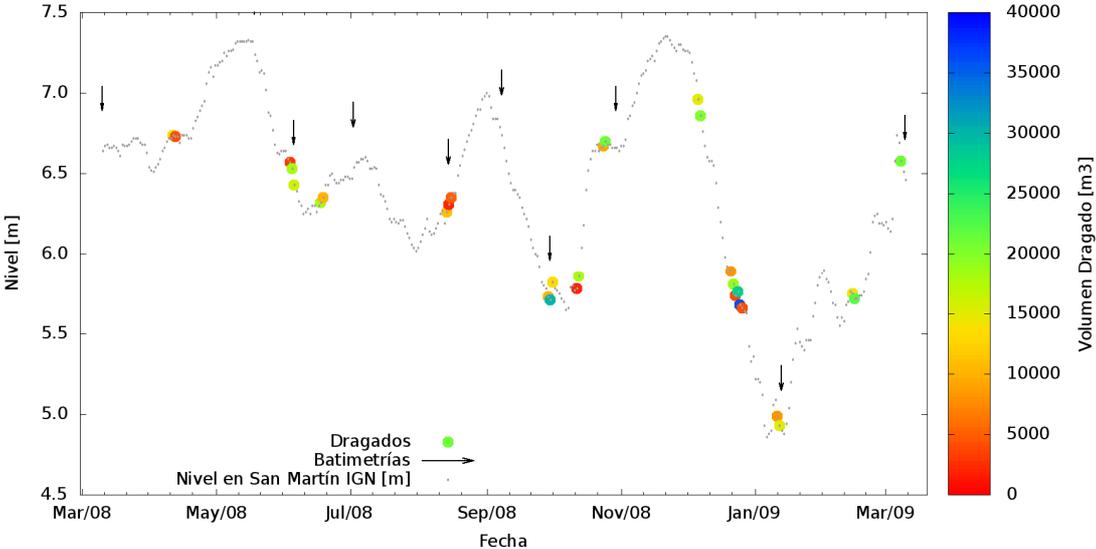


Figura 2.- Fecha y volumen de las operaciones de dragado de mantenimiento durante la temporada 2008-2009 en Paso Borghi (círculos) y fecha de los relevamientos batimétricos (flechas) respecto del nivel en San Martín.

Un análisis más detallado de lo ocurrido con las operaciones de dragado de mantenimiento se presenta en la Figura 3, en donde se indican los volúmenes dragados de acuerdo a la fecha y a la ubicación dentro del paso crítico en que fueron realizadas. Los dragados de mantenimiento en el Paso Borghi durante la temporada 2008-2009 se localizan entre los *km 431.3* y *km 438.5* de la ruta de navegación.

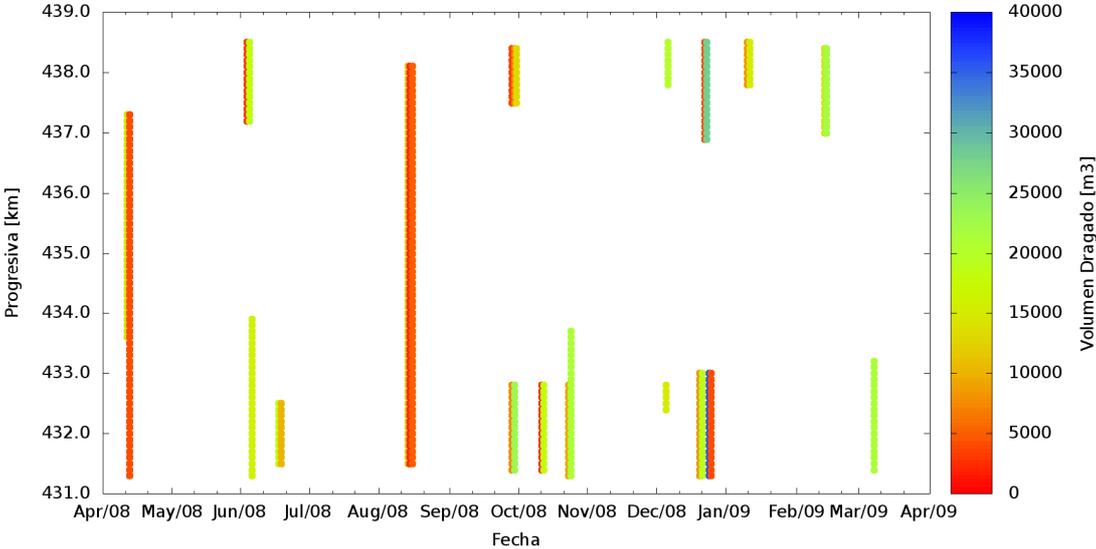


Figura 3.- Fecha, volumen y tramo de realización de operaciones de dragado de mantenimiento durante la temporada 2008-2009 en Paso Borghi.

Aceptando que el volumen dragado en el paso crítico equivale al volumen sedimentado, y con el objetivo de obtener tasas de sedimentación representativas del tramo para la temporada 2008-2009 para calibrar la modelación, se esquematizaron los volúmenes de dragado de acuerdo a la pertenencia a cada uno de los dos tramos donde las operaciones son más

frecuentes y de mayor volumen. En la Figura 4 se muestra la cantidad de volumen dragado en Paso Borghi por cada tramo de ruta de 100 m, donde se observan, consistentemente con lo apreciado en la Figura 3, dos tramos con mayor volumen de operaciones: Paso Borghi Inferior (*km* 431.3 – *km* 433.9) y Paso Borghi Superior (*km* 436.8 – *km* 438.5). A partir de esta información se realizó una esquematización de la sedimentación en el paso, basada en tasas constantes. En la Tabla 1 se presentan las tasas de sedimentación resultantes para cada tramo, de acuerdo a la esquematización planteada.

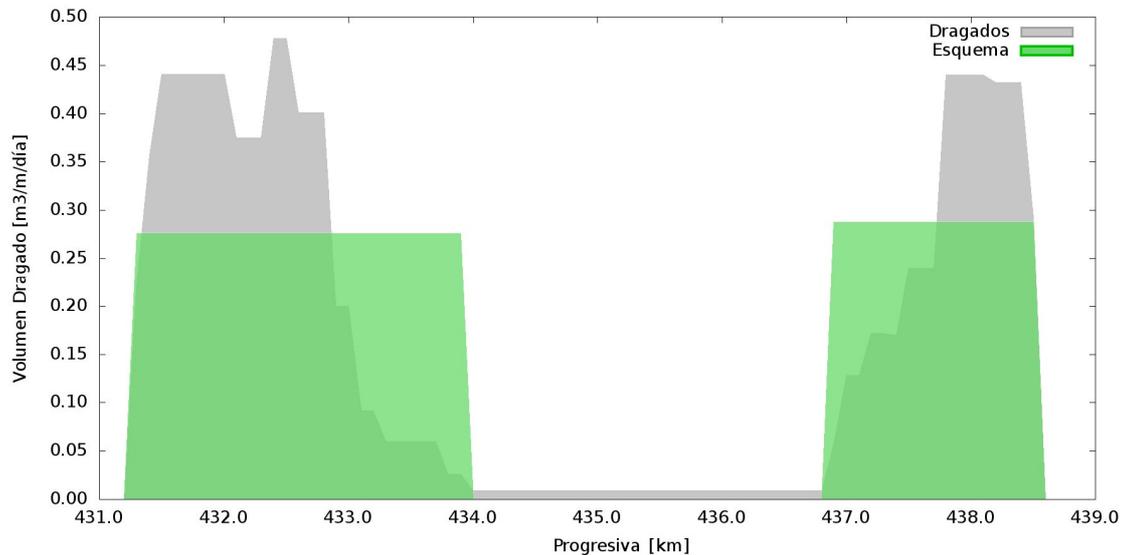


Figura 4.- Esquema de interpretación de los dragados según tramo del Paso Borghi.

Tabla 1.- Tasas de sedimentación y volumen dragado según tramo.

Tramo	Longitud [m]	Tasa de sedimentación [m ³ /m/día]	Volumen dragado Mar2008-Mar2009 [m ³]
Borghi Inferior	2700	0.276	247183
Borghi Superior	1700	0.288	170823

MODELO HIDRODINÁMICO REGIONAL

La metodología desarrollada en este trabajo se basa en la implementación de un modelo hidrodinámico regional, bidimensional en planta (2D-H), utilizando el software HIDROBID II (Menéndez, 1990) en un dominio que va desde el *km* 452 de la ruta de navegación hasta la Conexión Vial Rosario-Victoria, *km* 430 (Figura 1). Este modelo permite generar las condiciones de borde para el modelo de sedimentación en el canal de navegación.

En base a la información batimétrica obtenida a partir de los resultados de la campaña de observaciones en la zona de estudio (UNIBO-FICH, 29/Jun/2009 a 03/Jul/2009), se construyó un modelo digital del terreno sobre una malla espacial rectangular con celdas cuadradas de 20 m de lado, sobre un sistema de coordenadas orientado según las direcciones cardinales (Figura 5). Para la simulación representativa de los días de campaña, como condiciones de borde se impuso un caudal ingresante en el borde de aguas arriba (13740 m³/s) y un valor de nivel en el borde de aguas abajo (5,12 m IGN, valor obtenido a partir de la interpolación lineal de los datos de las reglas de Puerto San Martín y Rosario). El paso temporal de la simulación resultó ser de 1 seg.

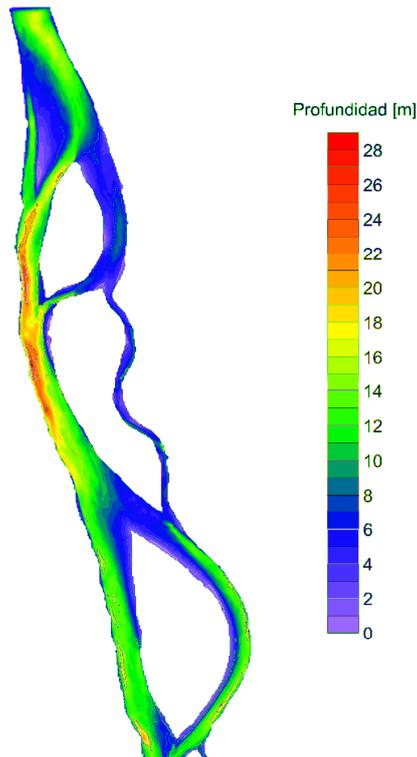


Figura 5.- Modelo digital del terreno

La rugosidad del fondo fue utilizada como variable de calibración (Figura 6), y se caracterizó por medio del coeficiente de rugosidad (n de *Manning*), para el que se adoptó el valor uniforme de 0,025. A modo de validación, en la Figura 7 se presenta la comparación de niveles en Puerto San Martín. En general, se observa un muy buen acuerdo entre las variables observadas y simuladas con el modelo 2D-H.

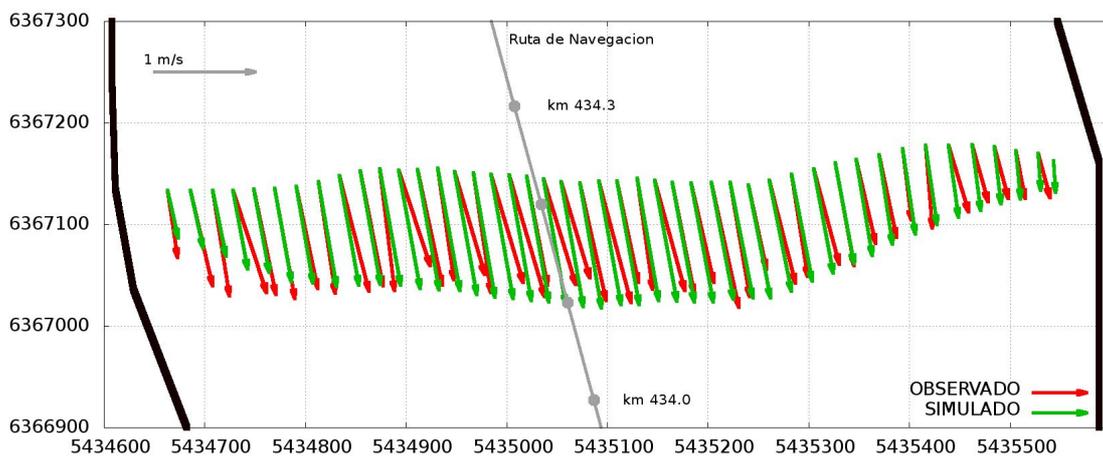


Figura 6.- Velocidad en una sección de Paso Borghi Inferior)

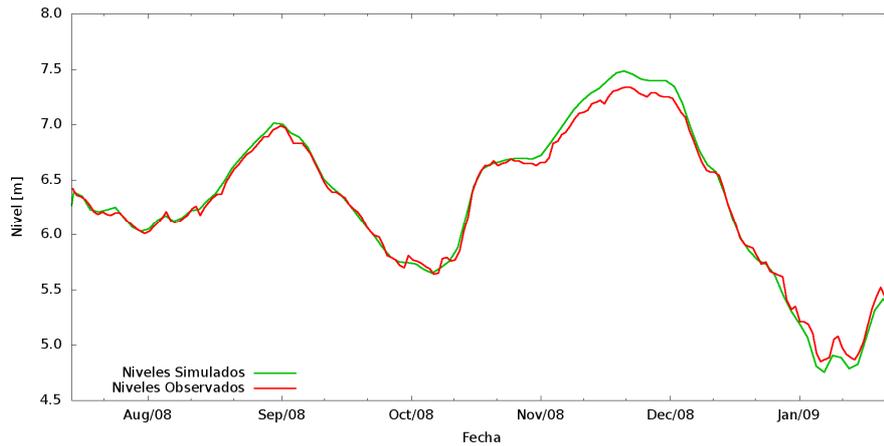


Figura 7.- Niveles simulados y observados en Puerto San Martín.

MODELO DE SEDIMENTACIÓN EN CANALES DE NAVEGACIÓN

Software AGRADA

Las tasas de sedimentación en el canal de navegación se calculan con el software AGRADA (Menéndez, 1994), que simula numéricamente los procesos de sedimentación en canales de navegación de acuerdo al accionar de las corrientes, incluyendo tanto el transporte de sedimentos de fondo como en suspensión, y que está basado en un modelo hidrodinámico paramétrico y un modelo de transporte por advección y difusión turbulenta bidimensionales en corte (2D-V).

El modelo hidrodinámico se plantea a partir de un análisis bidimensional en corte (Figura 8a), donde el plano de análisis coincide con el alineado con la corriente (Figura 8b). Sobre ese plano es necesario conocer el perfil vertical de ambas componentes de la velocidad (horizontal y vertical), la distribución de la tensión de corte contra el fondo y el perfil vertical del coeficiente de mezcla turbulenta. Dado que las variaciones del nivel del fondo debido al proceso de sedimentación se producen sobre escalas de tiempo largas comparadas con las hidrodinámicas, puede suponerse que las condiciones hidrodinámicas se adaptan instantáneamente a esos cambios.

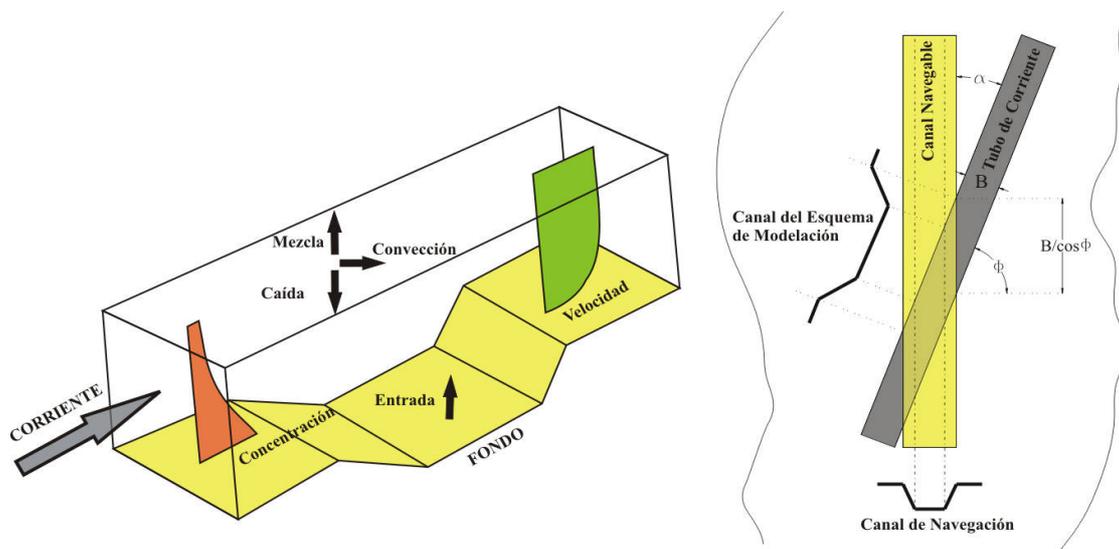


Figura 8.- Esquema de modelación 2D-V.

La distribución vertical de la componente horizontal de la velocidad (eje x) se plantea a partir de la siguiente familia paramétrica de funciones, en donde se tiene en cuenta una componente logarítmica y una componente de estela (van Rijn, 1987):

$$u(x, z) = A_1(x) \cdot \ln(z/z_0) \cdot u_h(x) + A_2(x) \cdot F(\eta) \cdot u_h(x) \quad (1)$$

donde z es la coordenada vertical medida desde el fondo, z_0 es la altura del punto de velocidad cero (cuyo valor es aproximadamente $ks/30$, siendo ks altura efectiva de rugosidad), u_h la velocidad en superficie, u_{h0} la velocidad superficial de equilibrio, A_1 y A_2 las constantes locales (independientes de z), $\eta = (z-z_0) / (h-z_0)$ la coordenada vertical adimensional, $h(x)$ es la profundidad local y $F(\eta) = 2\eta^t - \eta^{2t}$.

El perfil de velocidades está totalmente determinado si se conocen A_1 , A_2 , t y u_h . Las constantes A_1 y A_2 se relacionan a través de la condición $u(z=h)=u_h$. Otra relación entre A_1 , t y u_h surge de imponer que el caudal que atraviesa la sección de control es un valor conocido Q . Una tercera ecuación resulta de la observación hecha por van Rijn (1987), en donde la velocidad u a media profundidad ($z=h/2$) es aproximadamente igual a la velocidad de equilibrio en ese punto. De estas relaciones surgen dos valores de t : uno corresponde a la familia de perfiles desacelerados ($u_h > u_{h0}$) y la otra a la de los acelerados ($u_h < u_{h0}$). Para completar la formulación del modelo se requiere una cuarta relación estableciéndose una ecuación de evolución de alguno de los parámetros básicos: en este caso, según van Rijn (1987), se propone una para la velocidad superficial (resuelta mediante un método de Runge-Kutta de cuarto orden). Conocido el perfil de la componente horizontal de la velocidad, la distribución de la componente vertical w surge de integrar sobre la vertical la ecuación de continuidad. Para el cálculo de la velocidad de corte se supone que el perfil de la componente horizontal es puramente logarítmico en las inmediaciones del fondo. El coeficiente de mezcla se plantea según una distribución paramétrica.

La modelación del transporte de sedimentos de fondo dispone de una variedad de fórmulas de transporte para los casos en que las condiciones hidrodinámicas son de equilibrio local. Pero cuando se producen variaciones bruscas en el fondo, como es en este caso donde la corriente atraviesa un canal de navegación dragado, el perfil de velocidades vertical se aparta de las condiciones de equilibrio. De todos modos, dado que la escala de movimiento asociada al transporte de fondo es mucho menor que la hidrodinámica, puede considerarse que ese transporte se ajusta instantáneamente a las condiciones locales. Esto significa que no es necesario desarrollar una ecuación de evolución del transporte, sino simplemente una fórmula más general. Suponiendo una distribución normal para la tensión de corte contra el fondo, van Rijn (1987) propone la siguiente formulación para el caudal sólido específico de sedimento no cohesivo (Q_{sf}):

$$\frac{Q_{sf}}{b \cdot d_{50} \cdot (g \cdot d_{50})^{1/2}} = 0.053 \cdot \sqrt{\Delta} \cdot D_*^{-0.3} \cdot T_m^{2.1} \quad (2)$$

donde d_{50} es el diámetro medio de la partícula, D_* el tamaño adimensional de la partícula, Δ su densidad relativa, b el ancho de un volumen de control alineado localmente con la corriente, g la aceleración de la gravedad, y T_m es el valor medio del parámetro de estado, cuyo valor

instantáneo se expresa en términos de las tensiones de fondo críticas instantáneas para iniciación del movimiento y de la desviación estándar de la distribución estadística de la tensión de corte media contra el fondo.

Los mecanismos principales de transporte del sedimento en suspensión son la advección longitudinal (en la dirección de la corriente), la advección efectiva vertical y la difusión turbulenta según la vertical; expresados matemáticamente en la siguiente ecuación (van Rijn, 1987):

$$\frac{\partial(b \cdot u \cdot c)}{\partial x} + \frac{\partial(b \cdot (w - w_s) \cdot c)}{\partial \zeta} = \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(b \cdot \varepsilon_s \cdot \frac{\partial c}{\partial \zeta} \right) \quad (3)$$

donde c es la concentración volumétrica de sedimento, w_s la velocidad de caída del sedimento y ε_s el coeficiente de mezcla total. Esta es una ecuación diferencial de tipo parabólico para la función c , que requiere condiciones de borde en el fondo (se supone una condición de equilibrio local, *deposición = erosión*), la superficie libre (flujo de sedimento nulo) y la superficie de entrada del volumen de control (perfil de la concentración en equilibrio local, *advección neta vertical = difusión turbulenta*). Esta ecuación se resuelve numéricamente, discretizada sobre una malla de elementos finitos cuadrangulares, utilizando el método de Petrov-Galerkin.

Conocida la distribución vertical de concentración de sedimento en suspensión, el caudal sólido volumétrico se calcula por integración. El transporte total surge de sumar cargas de fondo y en suspensión.

En el modelo de evolución del lecho la diferencia de transporte sólido total induce variaciones en el nivel del fondo. Planteando la continuidad del sedimento se obtiene

$$\frac{\partial(b \cdot z_f)}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \cdot \frac{\partial Q_{sf}}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

donde z_f es la cota de fondo y p es la porosidad. Conocida la distribución longitudinal del caudal sólido Q_s , se resuelve numéricamente esta ecuación con el método de Lax obteniéndose como resultado la variación de la cota del fondo.

Implementación

Para calcular las tasas de sedimentación, cada uno de los subtramos del paso crítico en estudio (Paso Borghi Superior y Paso Borghi Inferior) fueron discretizados cada 500 m determinándose para cada uno de ellos una sección representativa esquematizada a partir del análisis de la información batimétrica disponible (Figura 9). Por lo tanto, el Paso Borghi Superior consta de tres submodelos y el Paso Borghi Inferior de cinco.

La esquematización de la sección de cada uno de los submodelos respeta una solera del canal de 116 m y taludes de 1:5 según lo indicado por la SSPyVN. Para todos los submodelos la discretización vertical consiste en 25 celdas distribuidas logarítmicamente con el objetivo de tener una mejor representación en el fondo, y la horizontal consiste en 500 celdas de 2 m

(determinando un dominio de 1000 m de longitud, que es lo suficientemente extenso como para evitar efectos de borde).

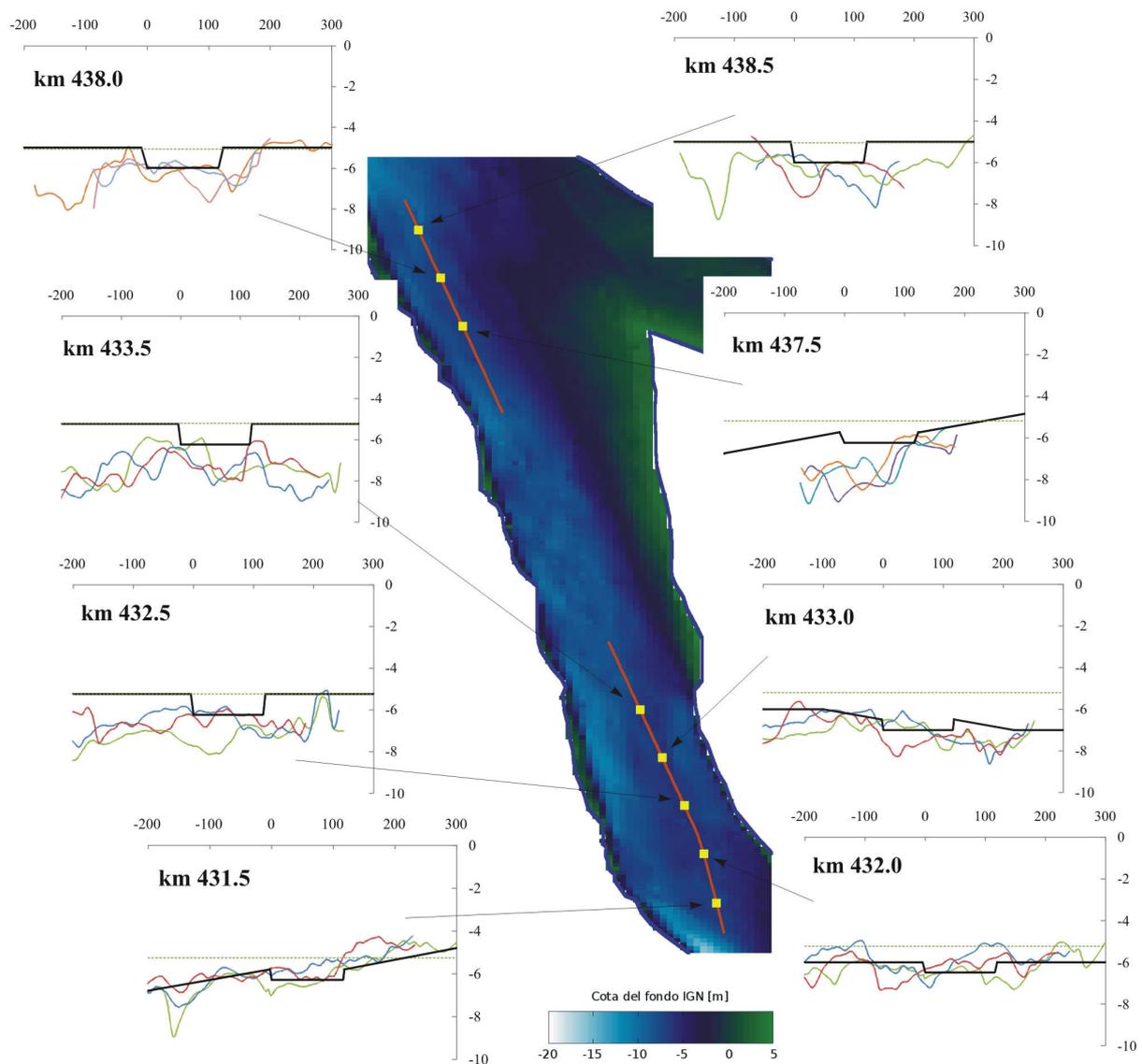


Figura 9.- Esquemización del canal de navegación (grosso) para los distintos sub-tramos basados en las batimetrías de distintas fechas (colores) respetando el calado mínimo (puntos).

Las variables hidrodinámicas para la modelación 2D-V (caudal específico, el tirante y el ángulo entre el eje del canal y la dirección de la corriente para cada submodelo) se esquematizaron a partir de los resultados obtenidos del modelo hidrodinámico regional (2D-H). Postprocesando los resultados de la simulación hidrodinámica media del período de estudio ($Q = 15570 \text{ m}^3/\text{s}$), se obtuvieron tubos de flujo cada $250 \text{ m}^3/\text{s}$ cuyo ancho y dirección media en cada uno de los submodelos permitió definir el caudal específico y el ángulo entre el eje del canal y la dirección de la corriente respectivamente.

El sedimento transportado fue caracterizado como una arena de $d_{50} = 260 \text{ }\mu\text{m}$ (Royal Boskalis and Ballast Ham Dredging, 1992), considerándose el mismo tipo para transporte de fondo y suspensión. La velocidad de caída fue calculada según la formulación de van Rijn (1987).

El volumen sedimentado se calcula como la diferencia de volumen entre el canal original y el canal modificado entre veriles (Figura 10) promediándose la tasa de sedimentación resultante luego del período de simulación.

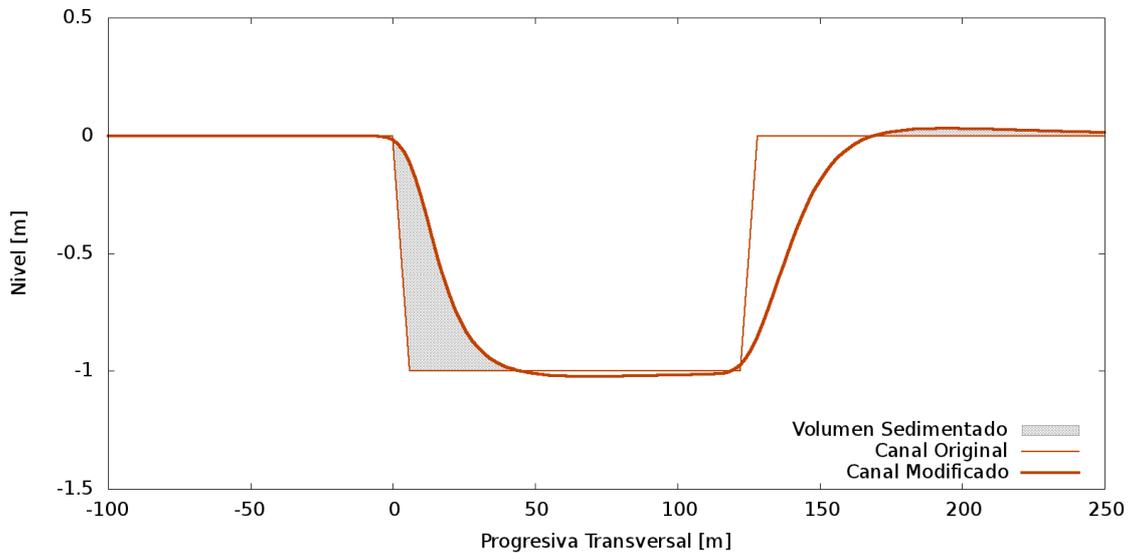


Figura 10.- Esquema de cálculo de volumen sedimentado.

En las Figuras 11 y 12, se comparan las tasas de sedimentación media diaria por unidad de ancho obtenidas en cada uno de los submodelos para las simulaciones de calibración. La incertidumbre en la correcta definición del ángulo entre el eje del canal y la dirección de las corrientes hizo que ésta variable sea la de calibración.

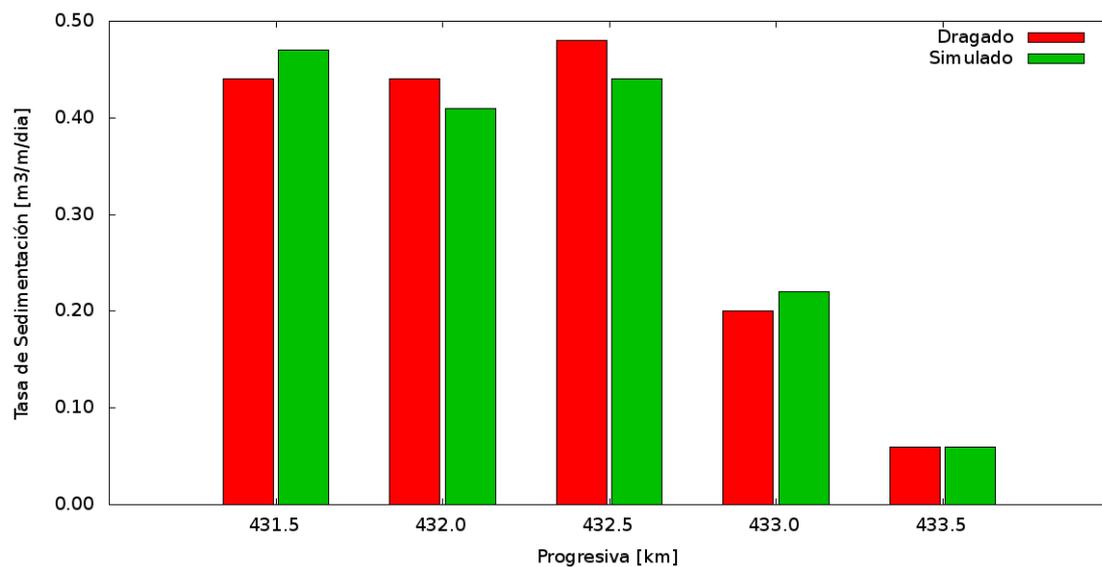


Figura 11.- Calibración en Paso Borghi Inferior.

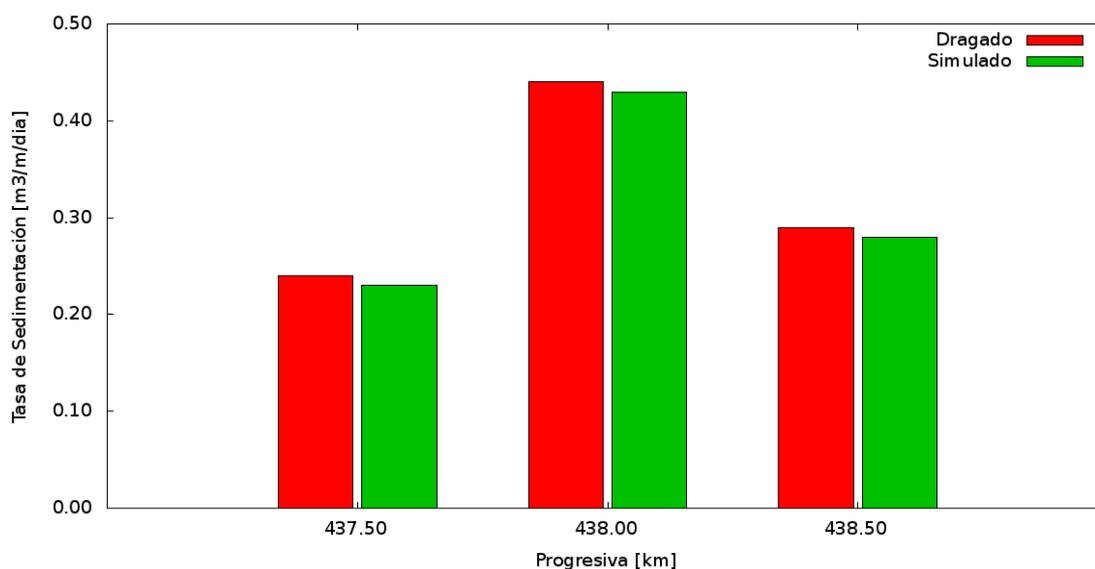


Figura 12.- Calibración en Paso Borghi Superior.

ESCENARIOS FUTUROS

Se plantearon cinco escenarios futuros donde la variable de cambio es el caudal ingresante al sistema. Los escenarios elegidos involucran un aumento o disminución del caudal con respecto al caudal medio anual actual (período 1994-2010). La condición de borde aguas abajo, ubicada en la sección del Puente Rosario-Victoria, se calculó a partir de la generación de una curva nivel-caudal, interpolando linealmente entre los hidrómetros de Rosario y San Martín (Tabla 2). En todos estos escenarios se supuso que la morfología del río Paraná no se ve afectada por el cambio de caudal, es decir, se mantuvieron las cotas de fondo fuera de la zona de dragado (‘explayados’).

Tabla 2.- Condiciones de borde para los distintos escenarios.

Escenario	Caudal [m³/s]	Nivel IGN en la Conexión Vial Rosario-Victoria [m]
Qmedio -20%	13690	5.66
Qmedio -10%	15401	6.40
Caudal Medio	17112	6.89
Qmedio +5%	17968	7.17
Qmedio +10%	18823	7.39
Qmedio +20%	20534	7.70

En primer lugar, se supuso que se mantienen las actuales cotas de dragado, es decir, se supone que, a pesar del cambio de caudal medio, la cota de referencia para la definición del calado requerido no cambia. Esto representaría una situación en la cual la autoridad de gestión de la navegación no asume el cambio hidrológico. Los resultados se muestran en la Figura 13. Se observa que el volumen sedimentado crece con el caudal, que sus tasas de variación son significativamente mayores que las de caudal, y que ese incremento de tasas es mayor para mayores caudales.

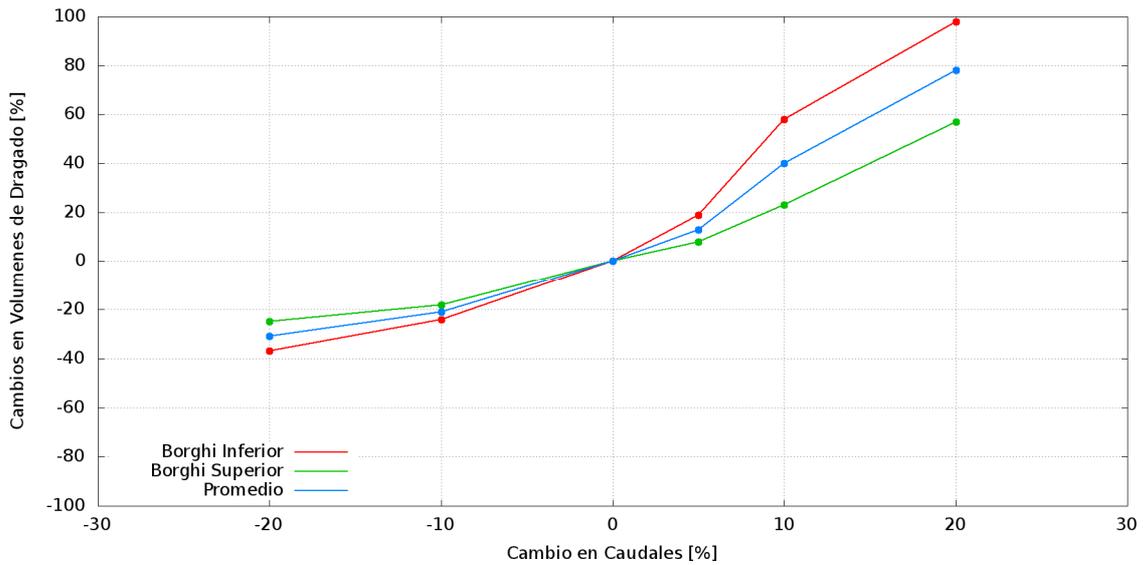


Figura 13.- Variación porcentual del volumen sedimentado para el tramo Borghi Superior (verde), Borghi Inferior (rojo) y promedio (azul) en cada escenario con respecto al caudal medio sin modificación del canal.

En segundo lugar, para cada escenario se ajustó la cota de dragado para reflejar el cambio en la cota de referencia para la definición del calado requerido, en función del cambio de caudal medio (sería el caso en que la autoridad de gestión adapta la regulación al cambio hidrológico observado). Se supuso que esa cota de referencia varía en la misma cantidad que el nivel de agua asociado al caudal medio (Figura 14).

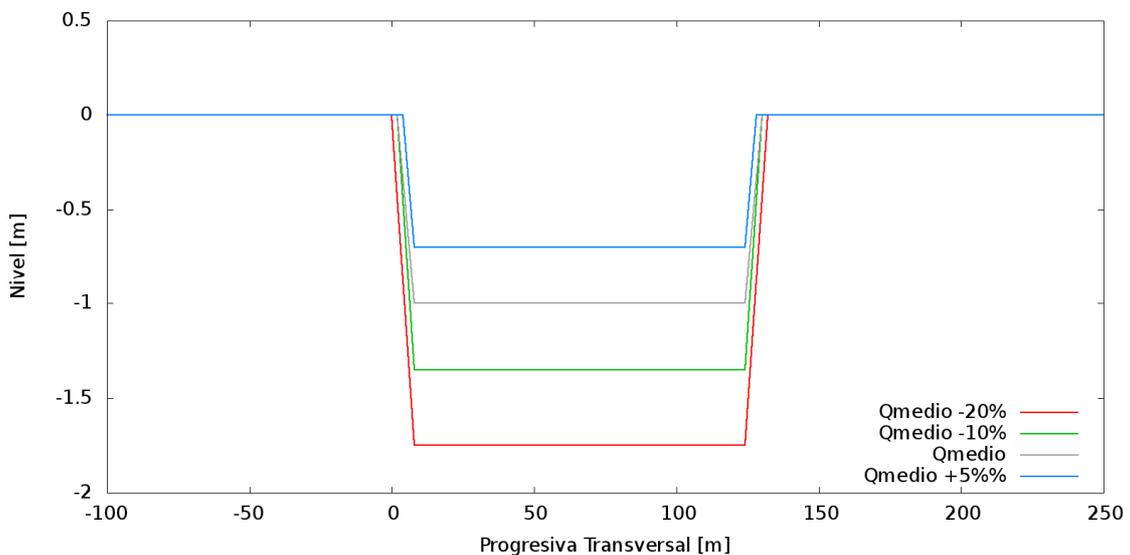


Figura 14.- Esquemas de modificación de solera.

Los resultados se presentan en la Figura 15. Se observa que ahora la tendencia es opuesta, es decir, el volumen a dragar crece cuando el caudal medio disminuye, ya que la disminución correspondiente en la profundidad de agua obliga a aumentar la profundidad del canal navegable, ocasionando una mayor sedimentación. Las tasas de variación de la sedimentación son ahora moderadamente superiores a las de caudal. Para aumentos mayores al 5% del caudal medio no sería necesaria la realización de dragado, dado que la profundidad natural del río otorgaría el calado requerido.

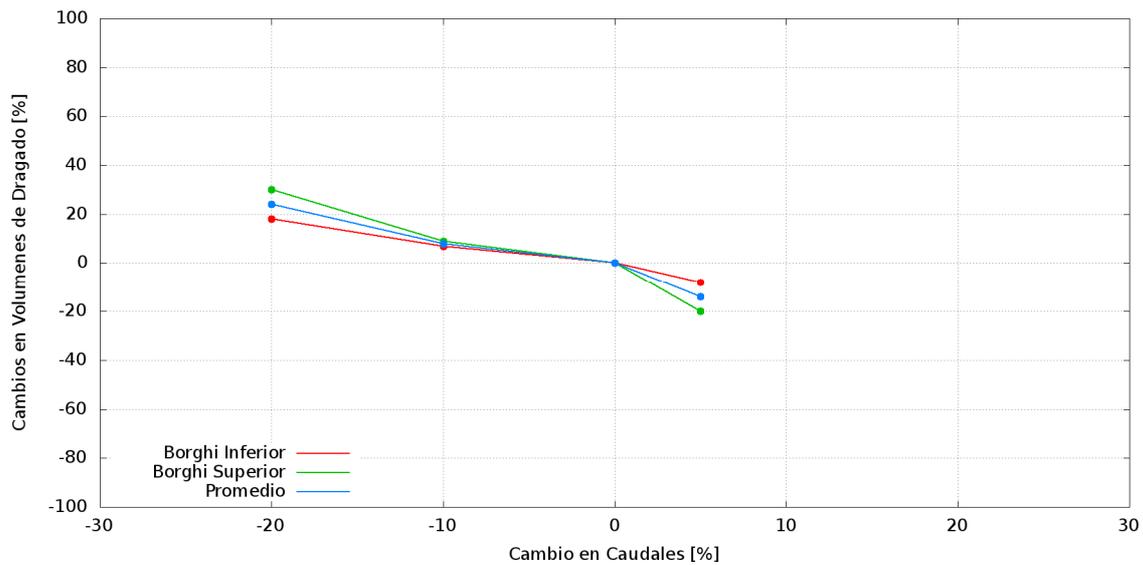


Figura 15.- Variación porcentual del volumen sedimentado para el tramo Borghi Superior (verde), Borghi Inferior (rojo) y Promedio (azul) en cada escenario con respecto al caudal medio con modificación del canal.

CONCLUSIONES

Si se supone que la morfología del río Paraná no se verá afectada significativamente por una variación de caudal asociada al Cambio Climático, entonces el volumen sedimentado en el canal de navegación del Paso Borghi, manteniendo las actuales cotas de dragado (es decir, sin adaptación de la regulación al cambio hidrológico), crecerá con el caudal, sus tasas de variación serán significativamente mayores que las de caudal, y ese incremento de tasas será mayor para mayores caudales. Si, en cambio, se supone que se ajustan las cotas de dragado para adaptar la regulación al cambio hidrológico, el volumen a dragar ahora crece cuando el caudal disminuye, con tasas de variación de la sedimentación sólo moderadamente superiores a las de caudal.

La metodología de análisis presentada, y aplicada al caso particular del Paso Borghi del río Paraná, se considera adecuada para estimar las consecuencias del Cambio Climático sobre los volúmenes de dragado de mantenimiento de los canales de navegación.

Agradecimiento. La investigación que condujo a estos resultados fue financiada por el Programa Marco N° 7 de la Comunidad Europea (FP7/2007-2013) bajo el proyecto N° 212492 (CLARIS LPB: A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies in La Plata Basin). El Órgano de Control de Concesiones de Redragado y Señalización perteneciente a la Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables (SSPyVN) proveyó información de volúmenes de dragado y relevamientos batimétricos, y el Departamento de Ingeniería Civil – Sección Hidráulica de la Universidad de Bolonia, Italia (DISTART-UNIBO) y el Centro Internacional de Estudios de Grandes Ríos (FICH-UNL) colaboraron con información de caudales, velocidades y batimétrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Menéndez, A.N. (1990): “Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos”, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 6 (1).

Menéndez, A.N. (1994): “Simulación numérica de la sedimentación en canales de navegación”, *Información Tecnológica - Revista Latinoamericana*, 5 (4).

Royal Boskalis and Ballast Ham Dredging (1992): “Ruta de Navegación de Ultramar San Martín – Océano”, Informe para la licitación del dragado de la vía navegable, Dirección de Vías Navegables, Argentina.

van Rijn, L.C. (1987): Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport, *Delft Hydraulics Communication*, 382.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



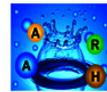
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

