



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA

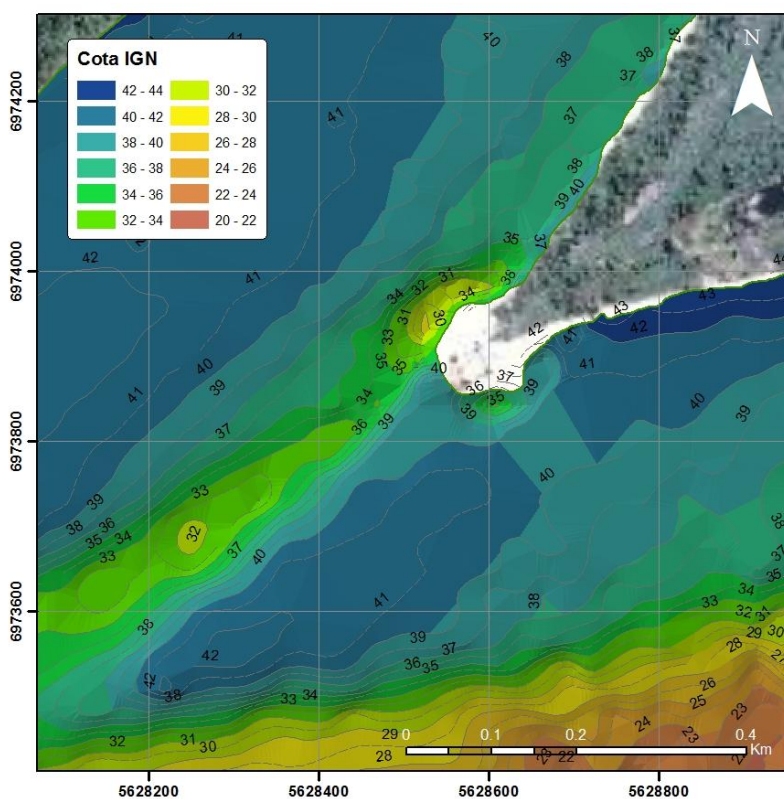
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS

SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS

REPÚBLICA ARGENTINA

ESTUDIO DE EROSIÓN PARA LA COLA DE LA ISLA GUÁSCARAS

Primer Informe



Proyecto LHA 341
Informe LHA 01-341-13
Ezeiza, Agosto de 2013

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Nicolás D. BADANO

Ing. Emilio A. LECERTÚA

INFORME PRODUCIDO POR

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

ESTUDIO DE EROSIÓN PARA LA COLA DE LA ISLA GUÁSCARAS

Primer Informe

RESUMEN

Se presenta un análisis de la evolución morfológica reciente en torno a la cola de la Isla Guáscaras, que discrimina cambios regionales asociados a la dinámica del flujo de cambios locales relacionados a la obra de protección. Se describe la implementación y validación de un modelo hidrodinámico bidimensional preliminar para representar a las corrientes en ambos brazos del río. Se efectúa un cálculo de erosión local en torno a los espigones mediante una fórmula empírica.

Descriptores temáticos: Morfología Fluvial, Erosión Local, Modelación Numérica, Fórmulas Empíricas

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	2
2	ANÁLISIS MORFOLÓGICO	4
2.1	Antecedentes	4
2.2	Obra de Recomposición	6
2.3	Relevamientos batimétricos	8
2.4	Evolución hidrológica	16
2.5	Erosión al pie de la obra	19
2.6	Granulometría	20
3	MODELACIÓN	23
3.1	Estrategia de modelación	23
3.2	Implementación de modelo 2D	24
3.3	Validación de modelo 2D	28
4	EROSIÓN LOCAL	33
4.1	Fórmula de cálculo	33
4.2	Aplicación de fórmula	35
5	CONCLUSIONES	37

1 INTRODUCCIÓN

La Torre 465 de la LEAT (Línea de Alta Tensión) de 500 kV entre la ET (Estación Transformadora) Paso de la Patria y la ET Resistencia, que transporta energía desde la central hidroeléctrica de Yacyretá, fue fundada sobre la punta de la cola de la Isla Guáscaras, ubicada sobre el río Paraná entre la localidad de Paso de la Patria, Prov. de Corrientes, y la Isla del Cerrito, Prov. del Chaco. La construcción de la torre data de 1994.

Desde fines de la década del 90 se observó un proceso de erosión de esa punta. Este se tornó particularmente acelerado durante la primera parte de la década del 2000, provocando prácticamente la desaparición de la parte de la isla donde se asienta la torre, dejando a ésta esencialmente en aguas abiertas, lo cual la tornaba más vulnerable a una falla estructural frente tanto a la acción hidrodinámica durante las crecientes, como al peligro por la colisión de una embarcación. En función de los estudios llevados a cabo durante 2006, en el año 2008 se construyó una obra para recomponer la cola de la isla. En la Figura 1.1 se muestra una imagen satelital actual de la cola de la isla.

Esta obra cumplió con el objetivo de recomposición propuesto. No obstante, en el año 2012 se detectó una erosión significativa sobre la margen del riacho Guáscaras, lo cual plantea una nueva amenaza.

El objetivo de este estudio es efectuar un diagnóstico sobre el problema de erosión observado, y un pronóstico sobre la eficacia de soluciones estructurales propuestas por el Comitente.

En este Primer Informe se efectúa un análisis de la evolución morfológica del río Paraná en el entorno de la obra (capítulo 2), se presenta la modelación preliminar de la hidrodinámica en torno a la Isla Guáscaras (capítulo 3), y se llevan a cabo cálculos de erosión local en torno a los espigones de la obra (capítulo 4). En las Conclusiones (capítulo 5) se sintetizan aspectos que hacen al diagnóstico de situación.



Figura 1.1. Imagen de la cola de la Isla Guáscaras.

2 ANÁLISIS MORFOLÓGICO

2.1 Antecedentes

En uno de los estudios antecedentes se llevó a cabo un detallado análisis de la evolución morfológica histórica de la Isla Guáscaras¹. En base a ella se forjó una interpretación de esa evolución, válida hasta el 2006, que a continuación se repite:

- El tramo del río Paraná que contiene a la Isla Guáscaras muestra una *alta actividad geomorfológica* desde que se dispone de registros (1921). Ha habido formación y destrucción de islas (Islas Tres Hermanas), evolución de riachos hacia la conformación de un brazo (riacho Guáscaras y brazo secundario del Paraná) o hacia su casi desaparición (riacho Sequito), y erosión o recuperación de márgenes (Isla Guáscaras).
- Esta actividad debe responder a *cambios en la distribución de corrientes y carga sedimentaria ingresantes* al tramo, que muy probablemente estén asociados a variaciones que se producen en la *confluencia de los ríos Paraguay y Paraná*. Es decir, lo que se observa en el tramo en estudio es la respuesta del sistema a solicitaciones que provienen de aguas arriba.
- El *riacho Guáscaras* pasó de ser un curso casi insignificante (1921) a constituirse en un *brazo significativo* del río Paraná, que transporta entre el 10 y el 20% del caudal total. Sufre *sedimentación* ante la persistencia de *bajos caudales* (como en el presente²), debido a la alta concentración de finos que transporta el agua sobre esa margen, que es por donde el Paraná recepta al Paraguay, y por donde éste recibe al Bermejo, fuente primaria de esos sedimentos. Pero también se erosiona ante el pasaje de una crecida (como en 2004).
- En la confluencia del riacho Guáscaras con el río Paraná se desarrolla un *escalón de fondo*, con una caída brusca de al menos 6 m (Figura 2.1). Esto produce la formación de un torbellino de eje longitudinal que mantiene una *hoya erosiva* al pie del escalón (hoya menor).
- Las *Islas Tres Hermanas* se conformaron como *afloramientos de bancos*, para luego erosionarse y desaparecer como tales. Actualmente *permanecen como bancos* que crecen o decrecen en función de la evolución hidrológica del río y que dividen a éste en los dos brazos: el secundario que va por el centro, y se usa como canal

¹ Menéndez, A.N., Pelliccia, C.A., "Estudio de la Protección de la Fundación de la Torre 465 de la Línea de 55 kV de YACYLEC. Diagnóstico sobre la evolución morfológica de la cola de la Isla Guáscaras y recomendaciones para su control", Informe para YACYLEC S.A., octubre 2006.

² Se refiere al año 2006.

navegable, y el primario que corre adyacente a la margen correntina (margen izquierda). En el encuentro de esos dos brazos, y por efecto de torbellinos de eje longitudinal, también se conforma una *hoya de erosión* (hoya mayor), cuya profundidad es variable en función de la evolución del régimen hidrológico (Figura 2.1).

- La *desaparición* de las Islas Tres Hermanas puede deberse a la acción de los *mayores caudales* que se registraron desde los años 70 en el río Paraná. En particular, se desarrolló el *Brazo Secundario* del río Paraná (entre las Islas Tres Hermanas y la Isla Guáscaras), que en 1985 pasó a conducir sólo un 8% menos que el Brazo Principal. La persistencia de bajos caudales, como los que se registran usualmente desde 1999³, podría dar lugar a una reversión al menos parcial de esta tendencia.
- La forma actual de la *Isla Guáscaras* ya aparece bien definida 30 años atrás. Pero ha mostrado una tendencia continua hacia el *afinamiento*, es decir, ha habido una erosión neta de sus márgenes, compatible con la persistencia de relativamente altos caudales.
- La *punta de su cola* de la Isla Guáscaras se había mantenido *relativamente estable* desde al menos los años 70. La inestabilidad parece dispararse con el pasaje de la *gran onda de crecida de 1998*.
- La erosión posterior de la punta posiblemente sólo sea el desarrollo de esa crisis, en la *búsqueda de una nueva situación de equilibrio medio* entre las fuerzas erosivas de la corriente y las resistivas del suelo, moduladas continuamente en función del régimen hidrológico. Es decir, se busca una nueva punta.
- La *falla de la margen izquierda de la cola*, que se detecta en el relevamiento de 2005, puede haber sido disparada por la *crecida* (ordinaria) de 2004, que ya estaba dejando su marca en el relevamiento de 2004 como una canalización adyacente a la margen izquierda de la cola que comunicaba con la hoya menor.
- La *erosión continua de la barranca subacuática* sobre la que estaba asentada la torre en 2003, que se produce en los últimos años⁴, es seguramente el resultado de la acción conjunta del torbellino de eje longitudinal al escalón de fondo, los vórtices de estela al final de la isla y los torbellinos de eje vertical producidos por las propias pilas de la torre, que terminarán de 'limpiar' esos residuos arenosos del desmoronamiento de la punta.

³ Esta observación era válida para el año 2006.

⁴ Se refiere al periodo anterior a 2006.

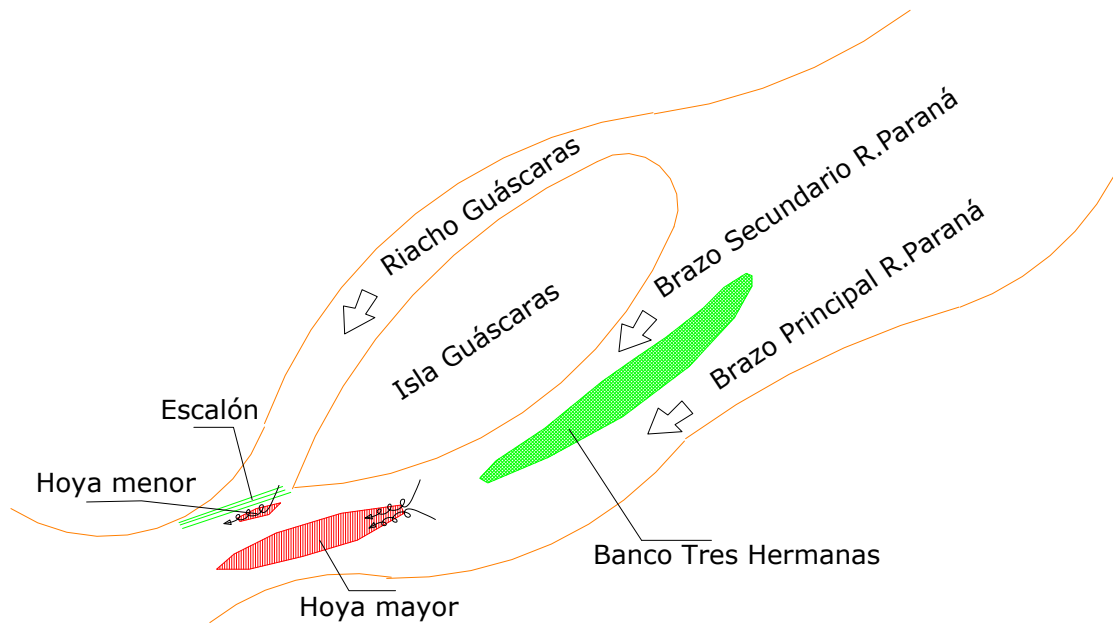
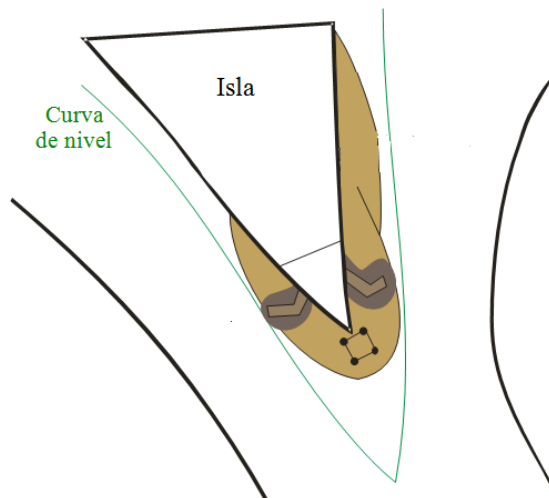


Figura 2.1. Características morfológicas en torno a la Isla Guáscaras.

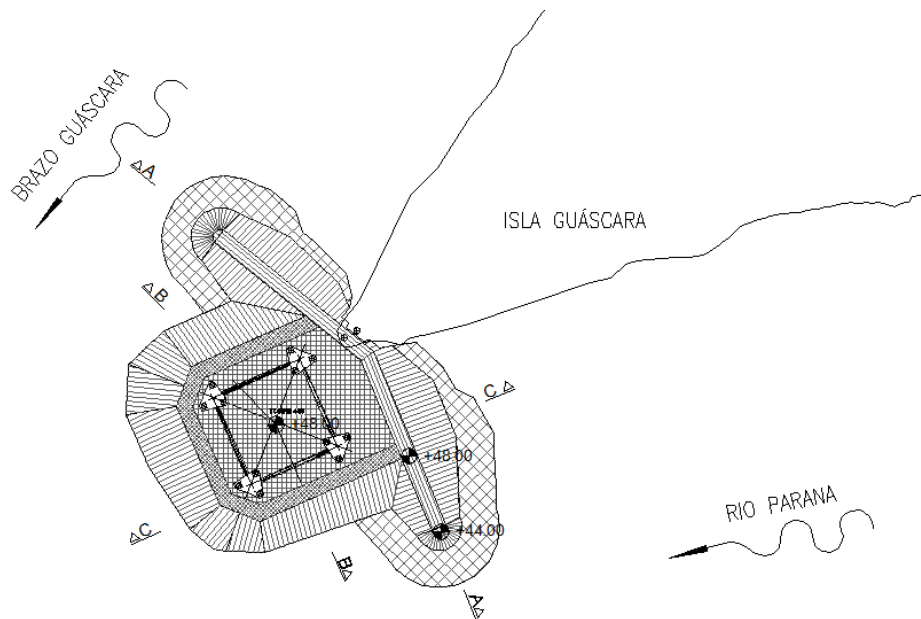
2.2 Obra de Recomposición

La obra propuesta en 2006 para la recomposición de la cola de la Isla Guáscaras se esquematiza en la Figura 2.2a⁵. En esencia, consiste en un relleno por refulado de arena de río, protegido por espigones deflectores de roca de tamaño graduado, sobre un núcleo conformado por geotubos. En el año 2008 se construyó la obra (Figura 2.2b), con dos espigones, uno a cada lado de la cola.

⁵ Menéndez, A.N., Pelliccia, C.A., "Estudio de la Protección de la Fundación de la Torre 465 de la Línea de 55 kV de YACYLEC. Diagnóstico sobre la evolución morfológica de la cola de la Isla Guáscaras y recomendaciones para su control", Informe para YACYLEC S.A., octubre 2006.



a) Obra propuesta



b) Obra construida

Figura 2.2. Esquema de la obra propuesta para la recomposición de la cola de la Isla Guáscaras.

2.3 Relevamientos batimétricos

Se analizaron los datos de relevamientos batimétricos efectuados entre 2006 y 2012 en torno a la cola de la Isla Guáscaras, de modo de llevar a cabo una interpretación de la evolución morfológica reciente. Específicamente, se utilizaron los efectuados por EVARSA en las siguientes fechas:

- i. 15/Nov/06
- ii. 30/Ene/08
- iii. 18/Ago/08
- iv. 25/Feb/09
- v. 08/Feb/12

Los últimos tres son posteriores a la ejecución de la obra.

Para producir una interpretación significativa, los datos fueron incorporados a un GIS (Sistema de Información Geográfica), sobre el cual se produjeron mapas de elevación en formato color. El procesamiento para lograr este producto requirió de una laboriosa tarea manual, ya que los datos fueron suministrados en formato AutoCAD como curvas de nivel discontinuas, y con la elevación especificada como números adjuntos. Los resultados se muestran en la Figura 2.3, donde se representan las curvas de nivel provistas (en línea continua para las elevaciones pares y punteada para las impares), junto con las zonas de nivel (espaciadas cada 2 m) que surgen del procesamiento efectuado con el GIS sobre un MDE (modelo digital de elevación) construido en base a la técnica de TIN ('Triangulated Irregular Network'). Se observa que ambas resultan muy consistentes entre sí.

Para noviembre de 2006 (Figura 2.3a) se observa:

- La hoya mayor sobre el río Paraná, con una cota mínima menor a 28 m IGN.
- Cotas del orden de 40 m IGN sobre la margen izquierda de la Isla Guáscaras.
- La desembocadura del riacho Guáscaras, con un canal principal central a cota del orden de 39 m IGN, y un muy angosto canal secundario sobre la margen izquierda de la Isla Guáscaras, que alcanza profundidades algo menores.
- El escalón en la desembocadura del riacho Guáscaras.
- La hoya menor, con una cota mínima del orden de 28 m IGN.

En enero de 2008 (Figura 2.3b) se distinguen los siguientes cambios:

- Un angostamiento y profundización de la hoya mayor, que alcanza cotas mínimas menores a 23 m IGN.
- Sedimentación hacia la izquierda de la cola de la Isla Guáscaras.
- Sedimentación entre el canal principal y el secundario del riacho Guáscaras.
- Ensanchamiento del canal secundario del riacho Guáscaras.
- Un corrimiento hacia aguas abajo del escalón a la desembocadura del riacho Guáscaras.
- Un corrimiento consecuente de la hoya menor hacia el centro del río Paraná.

En agosto de 2008 (Figura 2.3c), con la obra recién construida, se observa:

- Un mayor angostamiento y profundización de la hoya mayor, que alcanza cotas mínimas menores a 21 m IGN.
- Cotas algo menores sobre la izquierda de la cola de la Isla Guáscaras.
- Mayor sedimentación entre el canal principal y el secundario del riacho Guáscaras.
- Un angostamiento del canal principal y del secundario del riacho Guáscaras; en este último además se produce sedimentación.
- Un nuevo corrimiento hacia aguas abajo del escalón a la desembocadura del riacho Guáscaras.
- Un nuevo corrimiento consecuente de la hoya menor hacia el centro del río Paraná, que prácticamente la alinea con la hoya mayor, y su profundización hasta cotas mínimas menores a 26 m IGN.

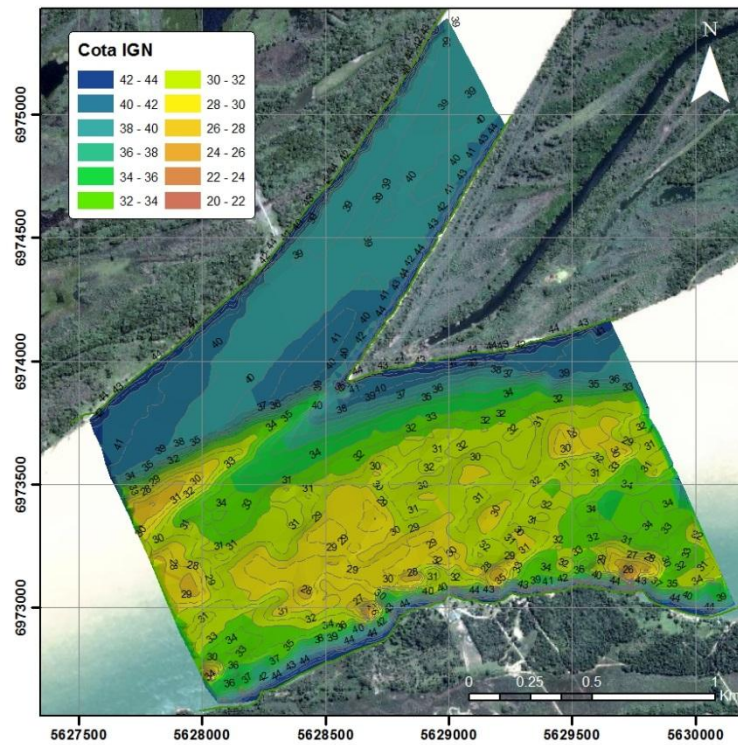
Para febrero de 2009 (Figura 2.3d) se identifican los siguientes rasgos:

- Un corrimiento de la hoya mayor hacia aguas abajo.
- Sedimentación sobre la izquierda de la cola de la Isla Guáscaras.
- Incremento de la sedimentación entre el canal principal y el secundario del riacho Guáscaras.
- Relativamente poco cambio en los canales principal y secundario del riacho Guáscaras.
- Un empinamiento del escalón a la desembocadura del riacho Guáscaras.
- Un colapso de la hoya menor con la hoya mayor, y un atisbo de formación de una nueva hoya menor, con cotas mínimas inferiores a 28 m IGN.

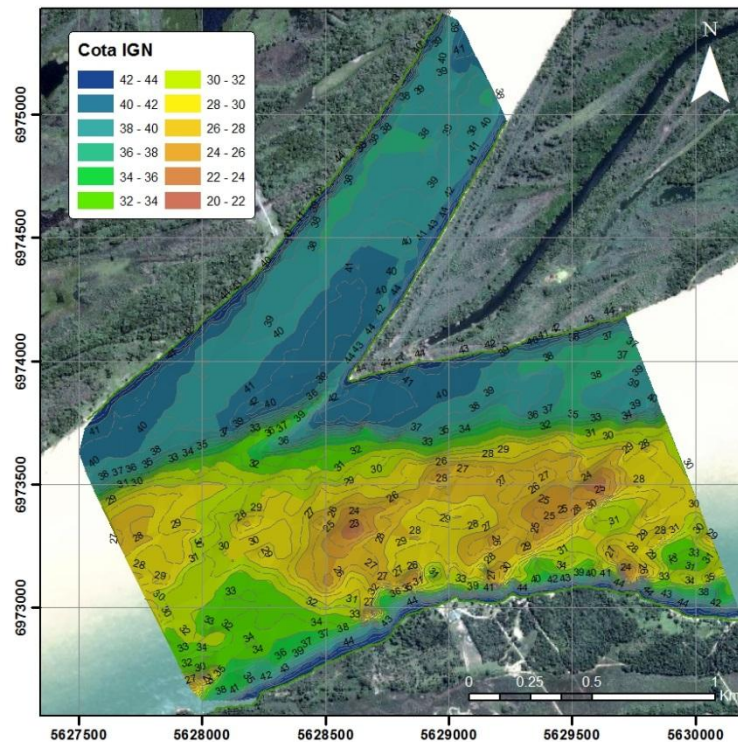
En febrero de 2012 (Figura 2.3d) se producen los siguientes cambios:

- Una expansión en ambas direcciones y una profundización de la hoya mayor, que alcanza cotas mínimas inferiores a 19 m IGN.
- Erosión sobre la izquierda de la cola de la Isla Guáscaras.
- Desplazamiento del canal principal del riacho Guáscaras hacia la margen izquierda, hasta prácticamente colapsar con el secundario.
- Profundización del canal secundario del riacho Guáscaras, que alcanza cotas mínimas inferiores a 35 m IGN cerca de la punta de la Isla Guáscaras.
- Un desplazamiento hacia aguas abajo del escalón a la desembocadura del riacho Guáscaras.
- Una profundización de la nueva hoya menor, que alcanza cotas mínimas inferiores a 23 m IGN, y su desplazamiento hacia el centro del río Paraná hasta casi alinearse con la hoya mayor.

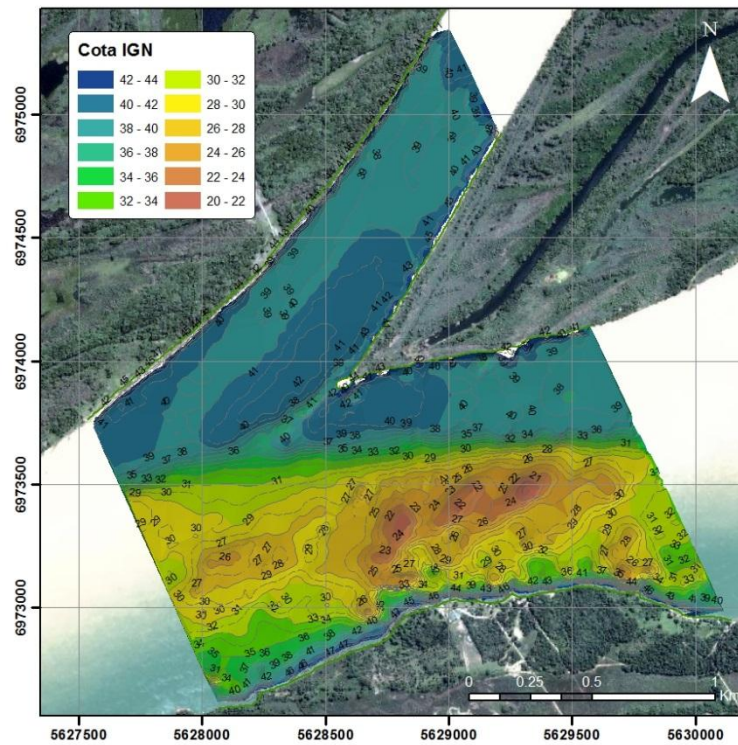
Nótese que los mayores cambios cualitativos se producen entre Nov/06 y Ene/08, por un lado, y entre Feb/09 y Feb/12, por el otro. En efecto, durante el primer intervalo de tiempo se registra sobre el río Paraná una profundización significativa de la hoya mayor – del orden de los 5 m – acompañada de una concentración del flujo, y sobre el riacho Guáscaras un ensanchamiento notable del canal secundario; por su parte, durante el segundo intervalo de tiempo se verifica sobre el río Paraná una nueva profundización significativa de la hoya mayor, y sobre el riacho Guáscaras un cambio en el patrón de flujo acompañado de una profundización significativa – del orden de los 4 m – del canal secundario.



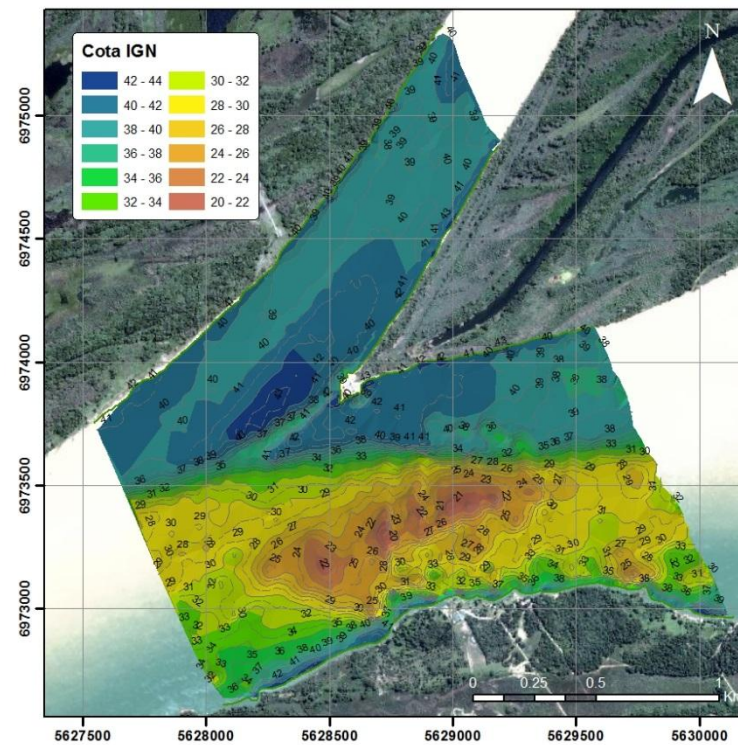
a) Noviembre de 2006



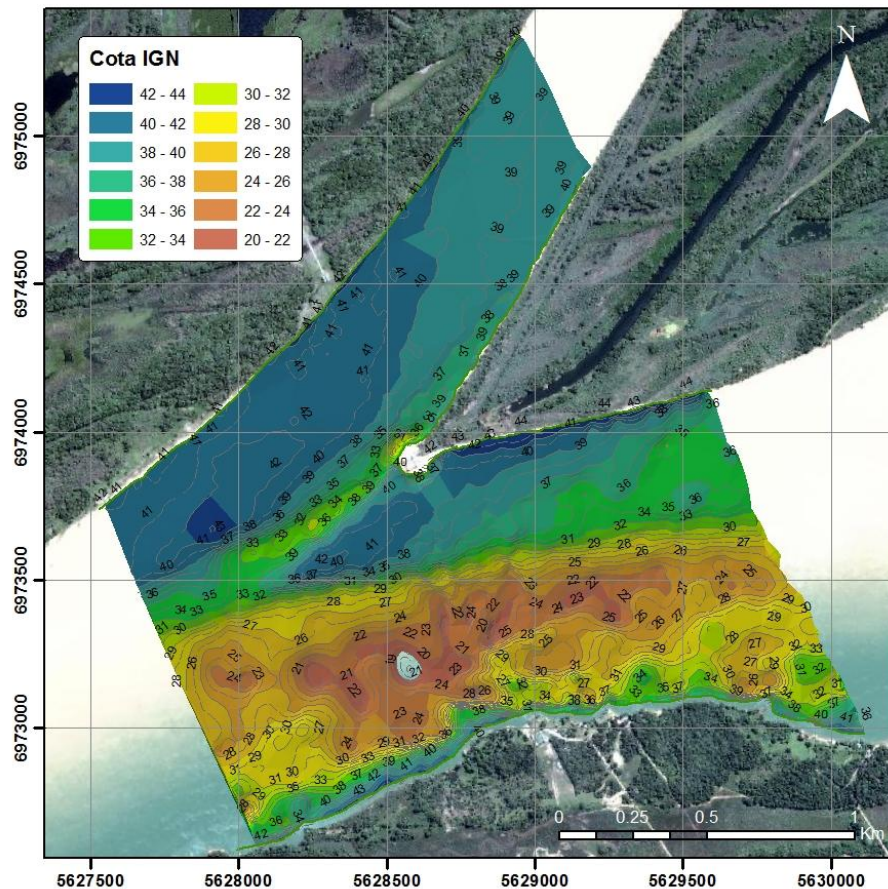
b) Enero de 2008



c) Agosto de 2008



d) Febrero de 2009



e) Febrero de 2012

Figura 2.3. Relevamientos batimétricos.

La descripción anterior corresponde a la configuración morfológica de sobre una escala espacial del orden del ancho del río. Para analizar el comportamiento morfológico de detalle en torno a la cola de la isla – zona de la obra –, en la Figura 2.4 se presentan ampliaciones para esa zona. Se observa claramente la aparición de la cola recompuesta desde agosto de 2008; el crecimiento posterior del área seca se debe a que los correspondientes niveles de agua del río fueron sucesivamente menores (4,08 m, 3,15 m y 2,66 m, respectivamente, en la escala de Corrientes).

En noviembre de 2006 (Figura 2.4a) se observa:

- Barrancas relativamente extendidas hacia ambos márgenes de la isla.
- Hacia el río Paraná, cotas superiores a 41 m IGN al final de la barranca adyacente a la isla, y una pequeña hoya con cotas mínimas inferiores a 38 m IGN adyacente a la torre.
- Hacia el riacho Guáscaras, cotas inferiores a 40 m IGN sobre el canal secundario.

Para enero de 2008 (Figura 2.4b) se observa:

- Un empinamiento de la barranca sobre la margen izquierda de la isla.
- Sedimentación hacia el río Paraná, desapareciendo la pequeña hoya adyacente a la torre.
- Hacia el riacho Guáscaras, ampliación del canal secundario.

Del primer relevamiento luego de la construcción de la obra, en agosto de 2008 (Figura 2.4c), surgen las siguientes observaciones:

- Empinamiento de las barrancas en ambos márgenes.
- Hacia el río Paraná, formación de una pequeña hoya adyacente a la obra, con cota mínima menor a 39 m IGN.
- Hacia el riacho Guáscaras, angostamiento del canal secundario y aparición de una pequeña hoya sobre éste, adyacente a la obra, donde la cota mínima también es menor a 39 m IGN.

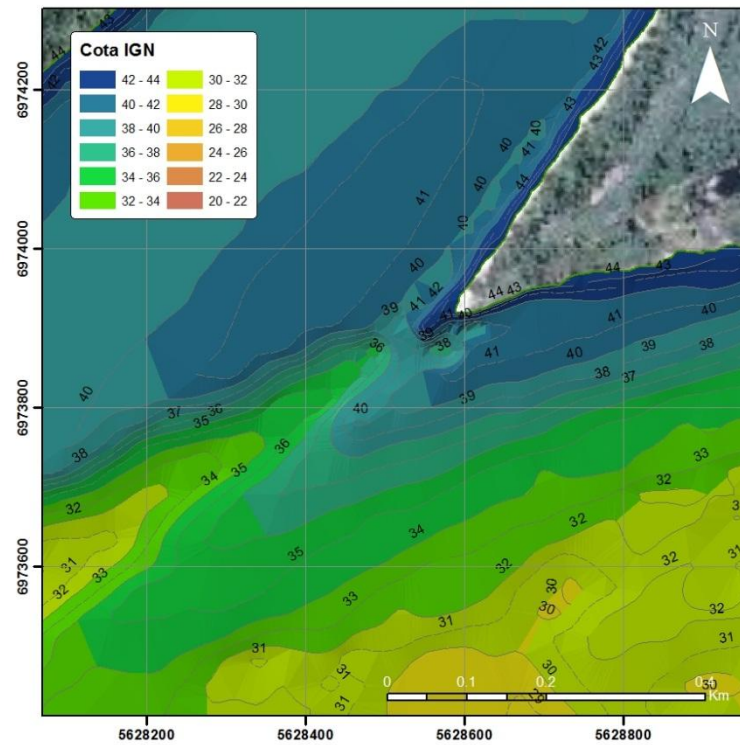
Para febrero de 2009 (Figura 2.4d) se observa:

- La casi desaparición de barrancas extendidas sobre ambos márgenes de la isla, salvo por la zona de playa aguas arriba del espigón de margen izquierda.
- La pequeña hoya del lado del río Paraná se agranda y profundiza, llegando a una cota mínima menor a 38 m IGN – es decir, una erosión de alrededor de 1 m respecto de agosto de 2008.
- La pequeña hoya del lado del riacho Guáscaras también se agranda y se profundiza, alcanzando una cota mínima menor a 37 m IGN – es decir, una erosión de alrededor de 2 m respecto de agosto de 2008.

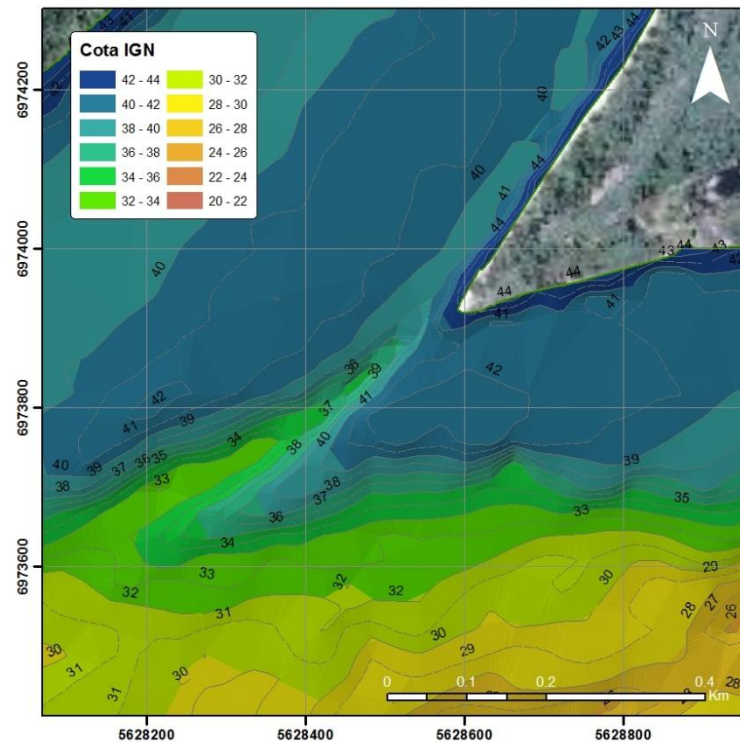
En febrero de 2012 (Figura 2.4e) se observa:

- Reaparición de una barranca extendida sobre margen izquierda de la isla, aguas arriba de la obra.
- Concentración de la hoya del lado del río Paraná hacia aguas abajo del espigón, alcanzando una cota mínima algo menor a 34 m IGN – es decir, una erosión de alrededor de 4 m respecto de febrero de 2009 y de 5 m respecto de agosto de 2008.
- Análogamente, concentración de la hoya del lado del riacho Guáscaras hacia aguas abajo del correspondiente espigón, llegando a una cota mínima menor a 30 m IGN – es decir, una erosión de alrededor de 7 m respecto de febrero de 2009 y de 9 m respecto de agosto de 2008 –, pero dentro de una tendencia en la que todo el canal secundario del riacho se profundizó aproximadamente 4 m – por lo que la profundización efectiva total desde 2008 sería de aproximadamente 5 m.

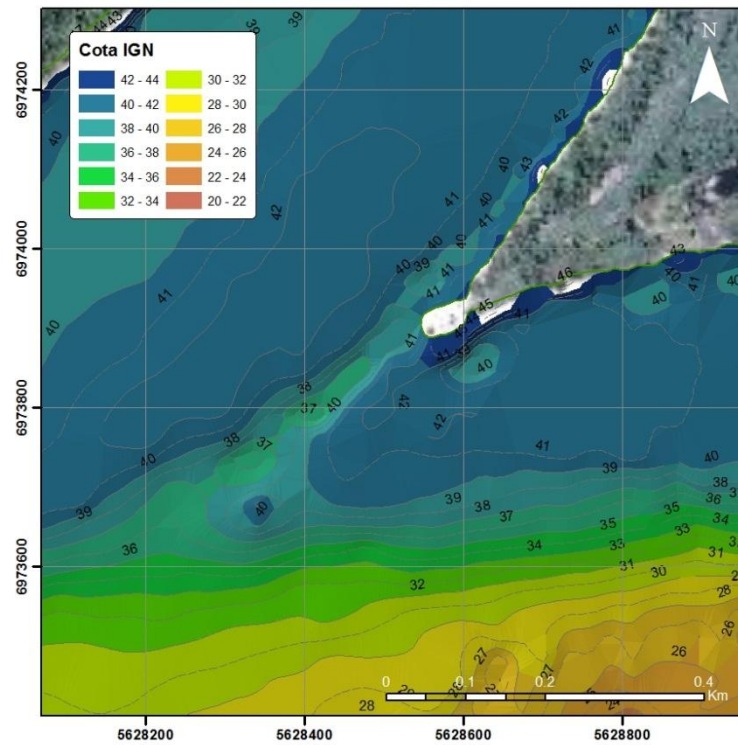
Las dos hoyas de erosión están asociadas a la presencia de los respectivos espigones. Desde su detección, en agosto de 2008, hasta el último relevamiento analizado, en febrero de 2012, estas hoyas se han consolidado y profundizado en alrededor de 5 m.



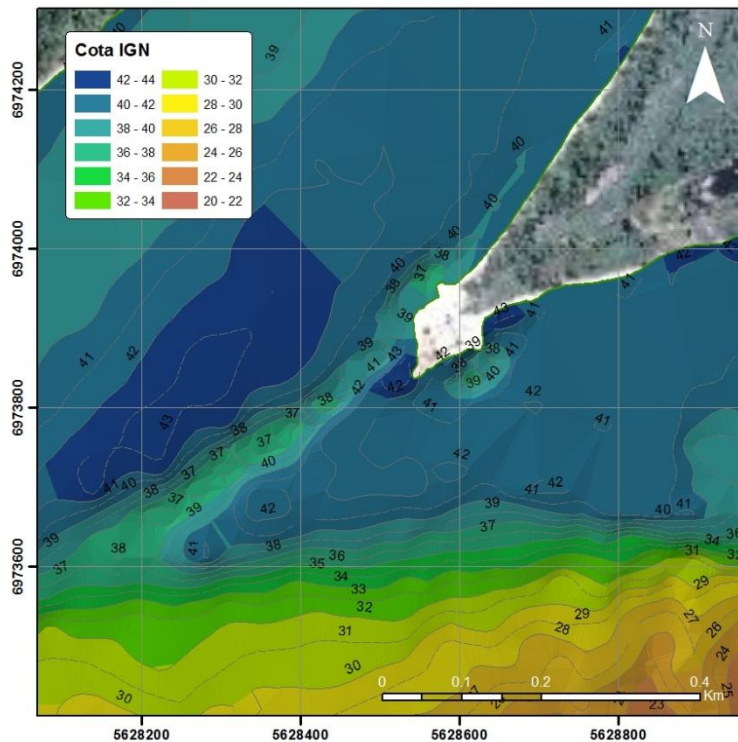
a) Noviembre de 2006



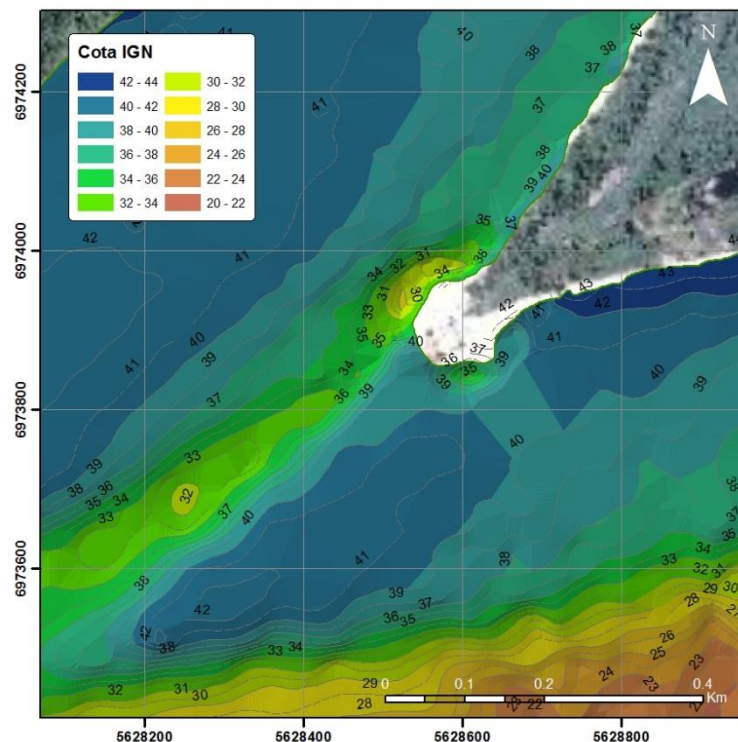
b) Enero de 2008



c) Agosto de 2008



d) Febrero de 2009



e) Febrero de 2012

Figura 2.4. Detalle de relevamientos batimétricos en torno a la obra.

2.4 Evolución hidrológica

En la Figura 2.5 se muestra la evolución diaria del caudal del río Paraná y el nivel de agua (referido al cero local) en la estación Corrientes desde comienzos de 2003 hasta mayo de 2013. Allí se indican los instantes correspondientes a las cinco campañas de relevamiento batimétrico descriptas en la sección anterior arriba. Se observa que:

- Entre las campañas de noviembre de 2006 y enero de 2008 se produjo una crecida relevante del río Paraná, con un pico principal de alrededor de 29.600 m³/s (marzo de 2007), que seguramente es la causa principal de los cambios morfológicos significativos observados entre esos dos relevamientos.
- La obra fue construida en una etapa de caudales medios del río Paraná (2008), de entre 15.000 y 20.000 m³/s.
- Entre las campañas de febrero de 2009 y febrero de 2012 se produjeron tres crecidas relevantes del río Paraná, que alcanzaron caudales pico de alrededor de 30.900 m³/s (enero de 2010), 29.400 m³/s (marzo de 2011) y 25.800 m³/s (agosto de 2011), las cuales seguramente son las causas principales de los cambios morfológicos significativos observados entre esos dos relevamientos.

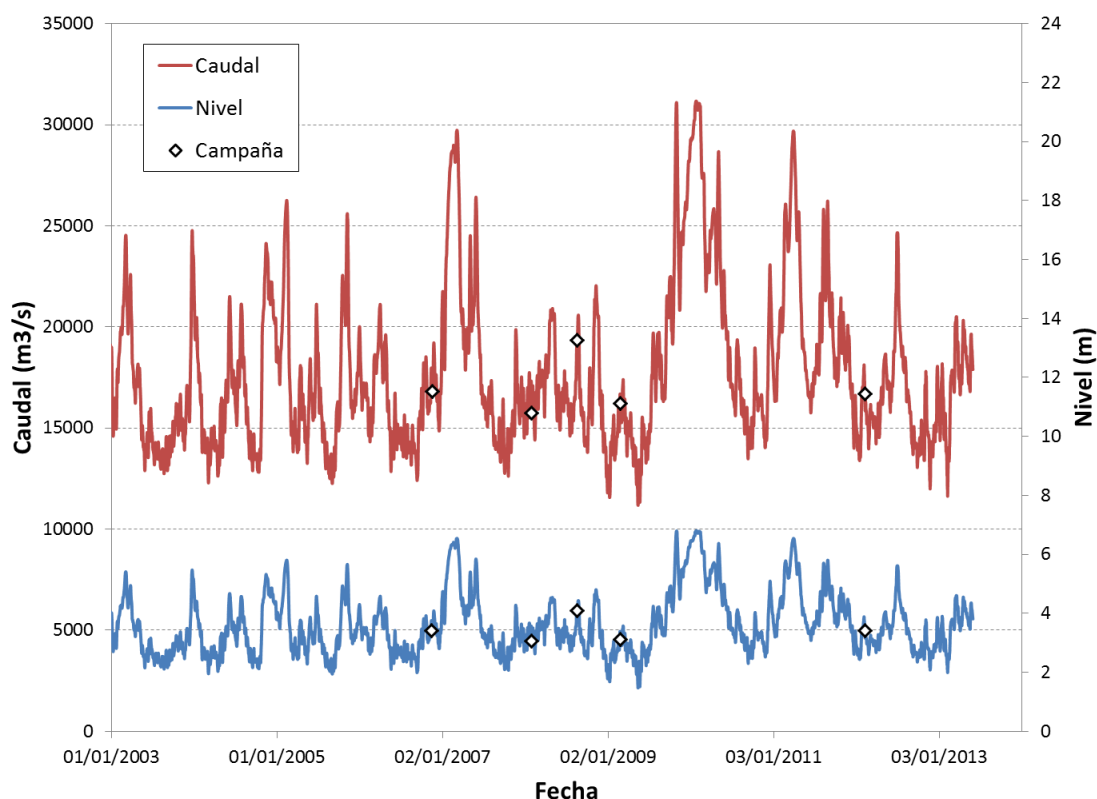
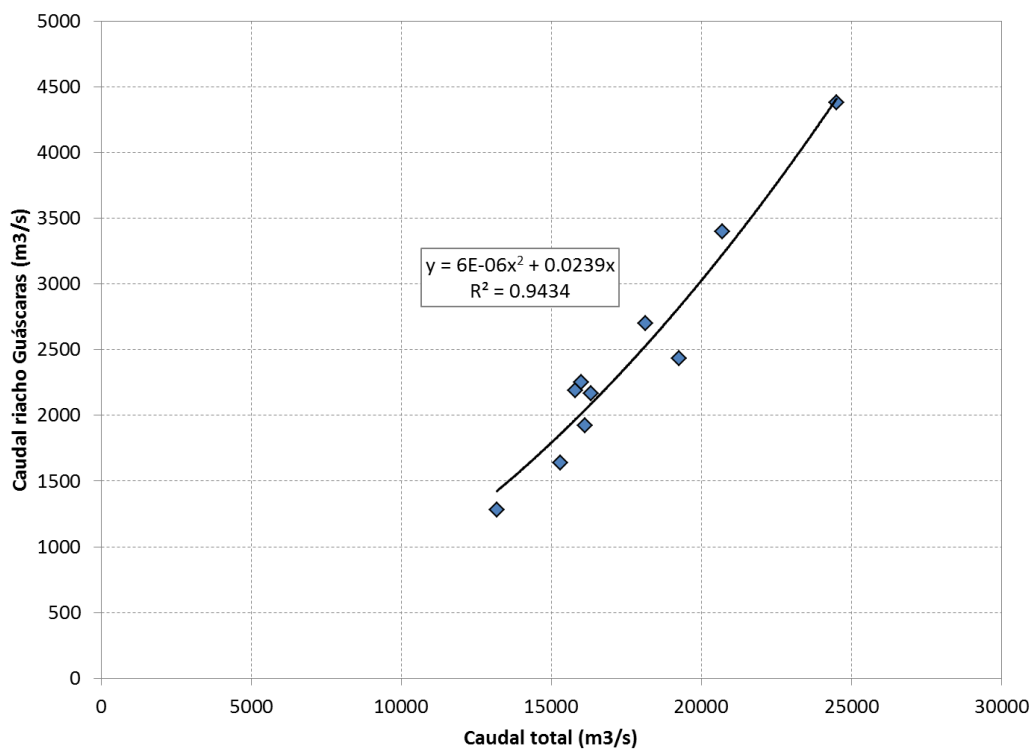
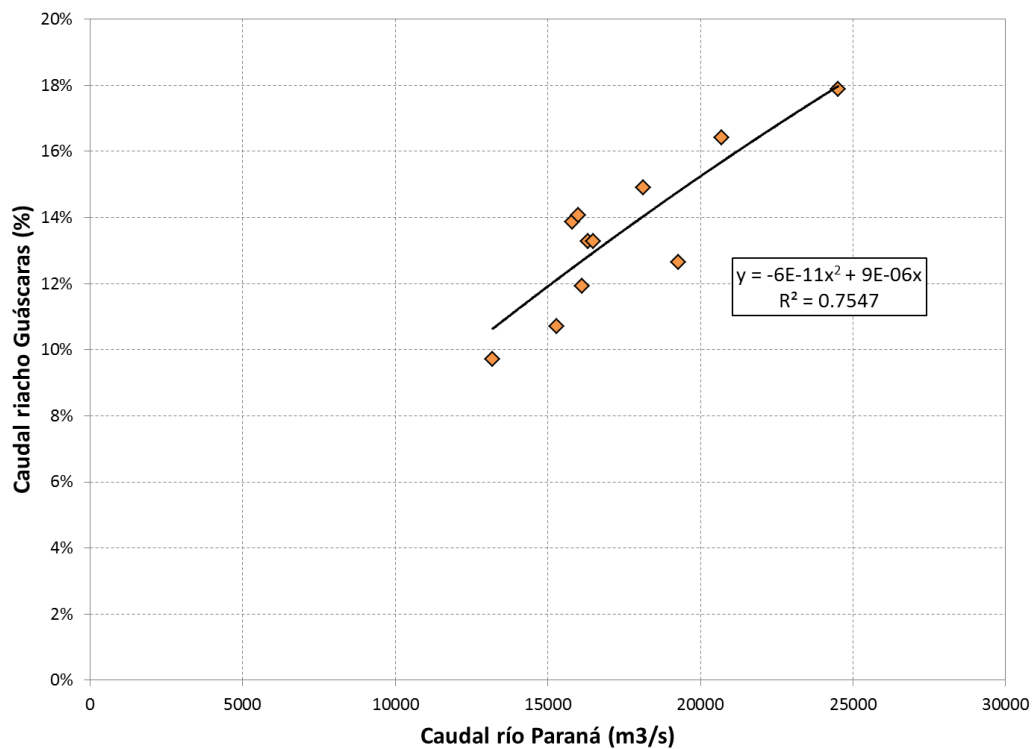


Figura 2.5. Serie temporal de caudal y nivel en Corrientes.

Durante las distintas campañas de relevamiento llevadas adelante por EVARSA se efectuaron aforos de caudal. En particular, se determinó la partición entre el riacho Guáscaras y el río Paraná. Los valores se indican en la Tabla 2.1 y se representan en la Figura 2.6, junto con curvas de ajuste (que se fuerzan a pasar por el origen). Se observa que el caudal del riacho Guáscaras representa entre aproximadamente el 10 y el 20% del caudal total, dentro del rango de medición, y que muestra una correlación significativa – sobre todo su caudal absoluto – con el caudal total. Esto último indica que los cambios batimétricos observados en el riacho Guáscaras no llegan a influir significativamente sobre su resistencia hidráulica, que depende esencialmente del nivel del río.



a) Caudal absoluto.



b) Caudal relativo.

Figura 2.6. Relación entre caudales del riacho Guáscaras y del total del río Paraná.

Tabla 2.1. Caudales aforados.

Fecha	Caudal (m ³ /s)			Fracción Guáscaras
	Guáscaras	Paraná	Total	
set-85	4380	20120	24500	17.9%
set-87	2190	13610	15800	13.9%
ene-03	2250	13750	16000	14.1%
jun-04	3400	17300	20700	16.4%
ago-05	1282	11906	13188	9.7%
mar-06	2700	15430	18130	14.9%
nov-06	2166	14149	16315	13.3%
ene-08	1922	14192	16114	11.9%
ago-08	2436	16831	19267	12.6%
feb-09	1639	13661	15300	10.7%
feb-12	2188	14294	16482	13.3%

2.5 Erosión al pie de la obra

Con fecha 12 de octubre de 2012, la empresa MG Operaciones Fluviales llevó a cabo una inspección subacuática de la protección del basamento de la torre de alta tensión. En esa oportunidad la altura hidrométrica del río en Corrientes era de 2,71 m.

En la Figura 2.7 se indican los 14 puntos de inspección.

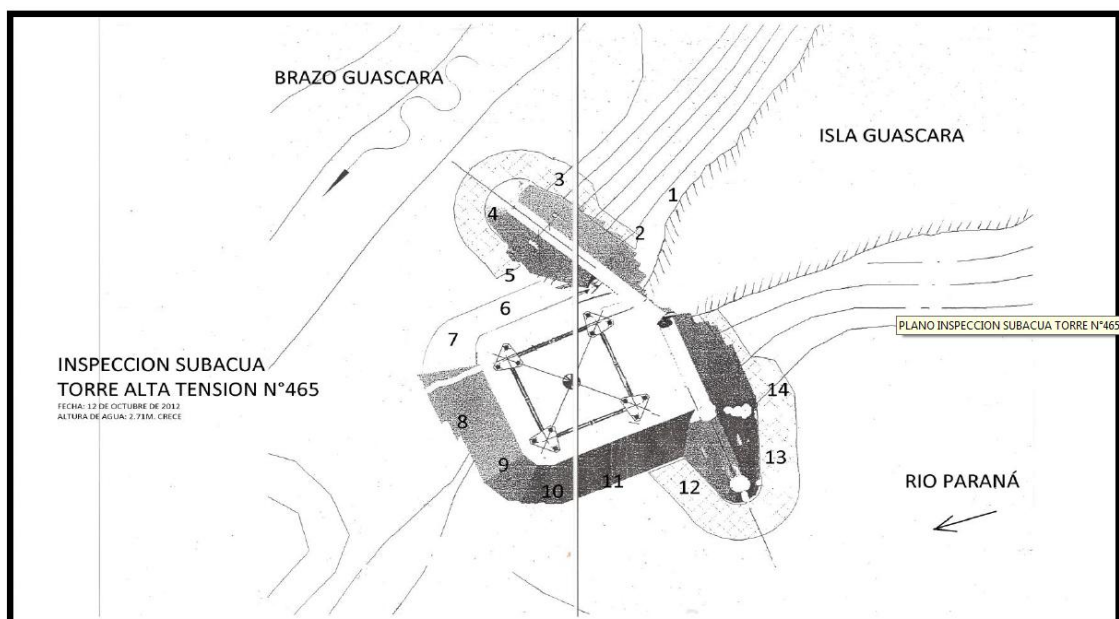


Figura 2.7. Puntos de inspección subacuática.

Las observaciones para cada uno de los puntos fueron las siguientes:

1. Desmoronamiento pronunciado, formándose una barranca de arena donde se visualiza la manta de geotextil; geotubos al descubierto, socavados alrededor de 0,50 m, terminando en una barranca de fango de alrededor de 6 m a pique.
2. Geotubos al descubierto; barranca de alrededor de 6 m a pique.
3. Buen pie a 12 m de profundidad; troncos y árboles en el fondo.
4. Desmoronamiento del talud de piedra, de aproximadamente 3 m sobre la superficie; geotubos al descubierto siguiendo la línea transversal del espigón.
5. Geotubos al descubierto en la línea longitudinal de aproximadamente 6 m; desmoronamiento pronunciado a alrededor de 20 m aguas abajo sobre la misma línea, que llega hasta la base.
6. 8 brazas de geotubo al descubierto (a alrededor de 30 m del espigón).
7. Desmoronamiento de piedra superficial hasta la base del lecho.
8. Casi toda la línea de geotubos al descubierto; desmoronamiento de piedra llegando al Paraná.
9. Sedimentación, formando una playada sobre la curva.
10. Aproximadamente 4 m de geotubos al descubierto.
11. Piedras y sedimentación en el fondo.
12. Aumulación de sedimento, formando un banco de arena con declive suave hacia el canal.
13. Aproximadamente 8 m de geotubos al descubierto.
14. Playada con buen pie.

En síntesis, se detectó erosión al pie de la obra a todo lo largo de la margen del riacho Guáscaras y la cara de aguas abajo de la obra, mientras que sobre la margen del río Paraná las erosiones son puntuales, localizadas en el extremo de aguas arriba del espigón (punto 13), y en el extremo de aguas abajo de la cola de la isla (punto 10). La erosión sobre la margen del riacho Guáscaras se consideran esencialmente asociada a la profundización del canal secundario. Por su parte, las erosiones puntuales sobre la margen del río Paraná están seguramente ligadas a las altas velocidades locales de la corriente en esos puntos.

2.6 Granulometría

En marzo de 2006, durante la campaña de relevamiento batimétrico llevada adelante por EVARSA, se tomaron muestras de sedimento de fondo, las cuales fueron analizadas para determinar su composición granulométrica. Los puntos de toma de muestra se indican en la Figura 2.8.

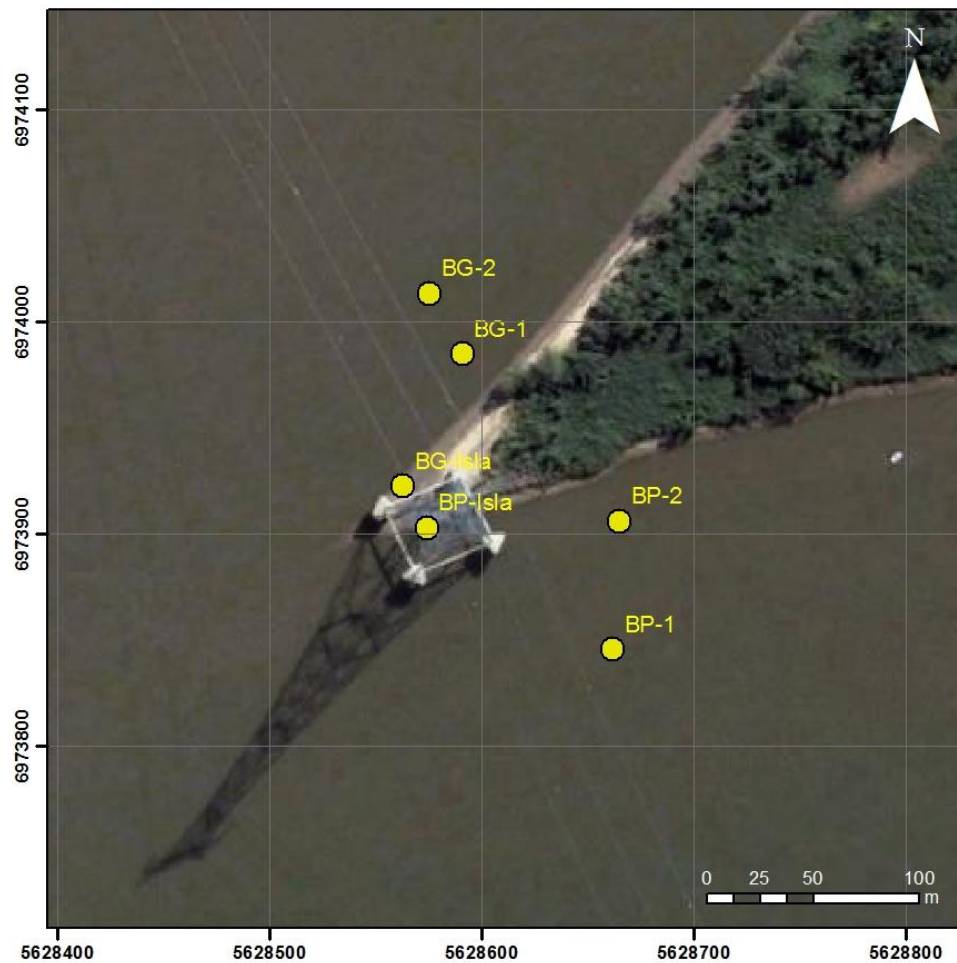


Figura 2.8. Puntos de toma de muestras de sedimento de fondo.

Las curvas granulométricas resultantes de los análisis se muestran en la Figura 2.9. La muestra BG-1 se considera anómala, ya que resulta inconsistente con las restantes, por lo que se la descarta como representativa. Las restantes indican distribuciones concentradas, con los diámetros medios indicados en la Tabla 2.2 (obtenidos mediante interpolación logarítmica), indicativos de arenas finas a medianas.

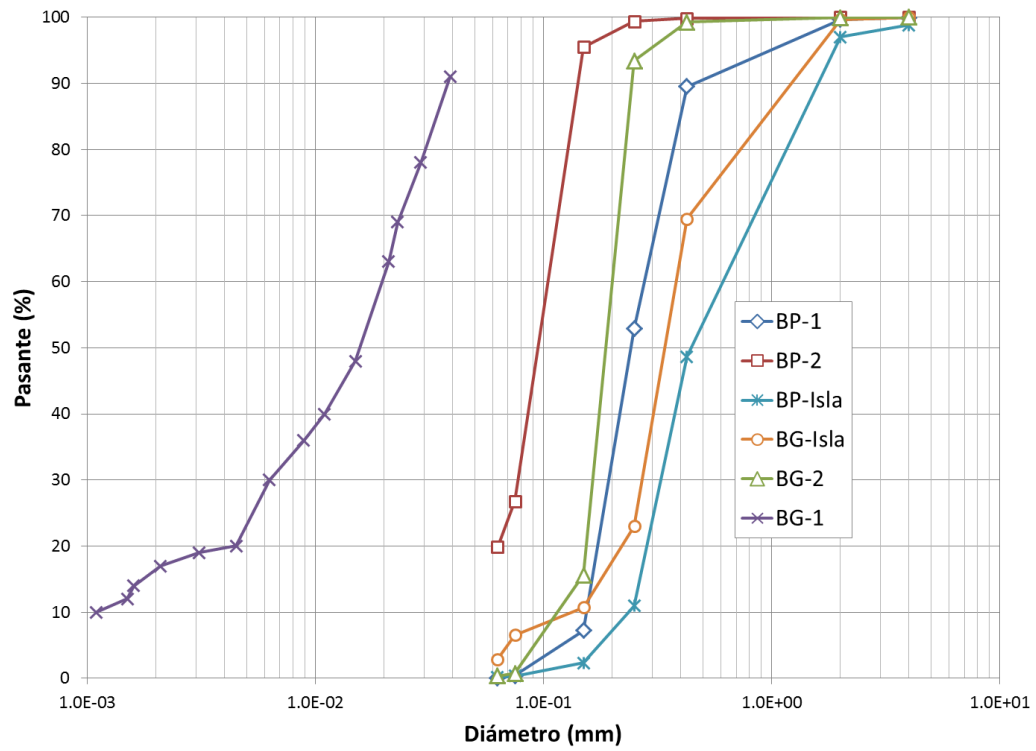


Figura 2.9. Granulometría de muestras de sedimento de fondo.

Tabla 2.2. Diámetro medio de muestras de sedimento de fondo.

Muestra	d50 (um)
BP-1	242
BP-2	95
BP-Isla	444
BG-Isla	340
BG-2	188

3 MODELACIÓN

3.1 Estrategia de modelación

Para simular numéricamente el problema se plantean dos escalas de modelación:

- Una escala regional, incluyendo la isla completa, sobre la cual se implementa un modelo hidrodinámico bidimensional (2D) en planta, de modo de resolver la partición de caudales entre el río Paraná y el riacho Guáscaras, y proveer condiciones de borde al modelo local.
- Una escala local, en torno a la zona-problema, donde se plantea un modelo hidrodinámico y morfológico tridimensional (3D), de modo de determinar la evolución del lecho bajo la acción de arrastre de las corrientes de agua.

Se utiliza el código abierto de dominio público OpenFOAM⁶. Este código puede simular una gran variedad de problemas (flujos de fluidos involucrando reacciones químicas, turbulencia, transferencia de calor, etc.). Consiste en un conjunto de módulos, que incluye *solvers* ("solucionadores") para problemas específicos, utilidades para efectuar pre y posprocesamientos, librerías, etc. Resuelve sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales mediante el método de los volúmenes finitos. Efectúa procesamiento en paralelo, mediante descomposición de dominio.

Para la modelación 2D se resuelven numéricamente las ecuaciones para aguas poco profundas. El *solver* se basa en el método PISO⁷.

Para la modelación 3D se resuelven numéricamente las ecuaciones de Reynolds. Se utiliza un método implícito iterativo sobre las variables presión-velocidad⁸.

Para la generación de la grilla de cálculo se aplicó el utilitario Gmsh⁹. Es un generador automático de mallas tridimensionales con un motor tipo CAD y un posprocesador.

⁶ <http://www.openfoam.com/>

⁷ Badano, N.D., Sabarots Gerbec, M., Re, M., Menéndez, A.N., *A coupled hydro-sedimentologic model to assess the advance of the Parana River Delta Front*, River Flow 2012, Proceedings of the Sixth International Conference on Fluvial Hydraulics, 5-7 September, 2012, San José, Costa Rica.

⁸ Menéndez, A.N., Badano, N.D., *Interaction between Hydraulic and Numerical Models for the Design of Hydraulic Structures*. In "Hydrodynamics – Optimizing Methods and Tools", H.E. Schulz, A.L. Andrade Simoes, R. Jahara Lobosco (Eds.), InTech, October 2011, <http://www.intechopen.com/articles/show/title/interaction-between-hydraulic-and-numerical-models-for-the-design-of-hydraulic-structures>

⁹ <http://geuz.org/gmsh/>

3.2 Implementación de modelo 2D

La Figura 3.1 indica, sobre una imagen satelital, el dominio seleccionado para la modelación 2D. Se extiende desde sendas zonas de estrechamiento del río ubicadas aguas arriba y aguas abajo de la Isla Guáscaras. La elección de zonas de estrechamiento resulta recomendable, ya que allí suelen producirse condiciones de flujo totalmente desarrolladas, es decir, sin zonas de separación en las márgenes.



Figura 3.1. Dominio de modelación 2D.

En esta etapa, a la espera de los relevamientos actualizados de toda la zona de modelación, el MDE (Modelo Digital de Elevación) del lecho se construyó a partir del relevamiento batimétrico de 2006 para la zona en torno a la cola de la Isla Guáscaras, y de 5 secciones transversales relevadas durante 2011 por Hidrovía S.A. para la Dirección Nacional de Vías Navegables (DNVN). El relleno de datos faltantes se efectuó construyendo en forma criteriosa curvas de nivel. En la Figura 3.2 se muestra el MDE del lecho resultante.

En la Figura 3.3 se presenta la grilla de cálculo construida, conformada de 68,000 elementos triangulares. Se observa que se ha densificado en torno a las márgenes de la Isla Guáscaras. El paso medio de malla es de 10 m hasta una distancia de alrededor de 50 m de la costa de la Isla Guáscaras, y crece al alejarse de la isla hasta alcanzar 50 m a los 500 m de la costa.

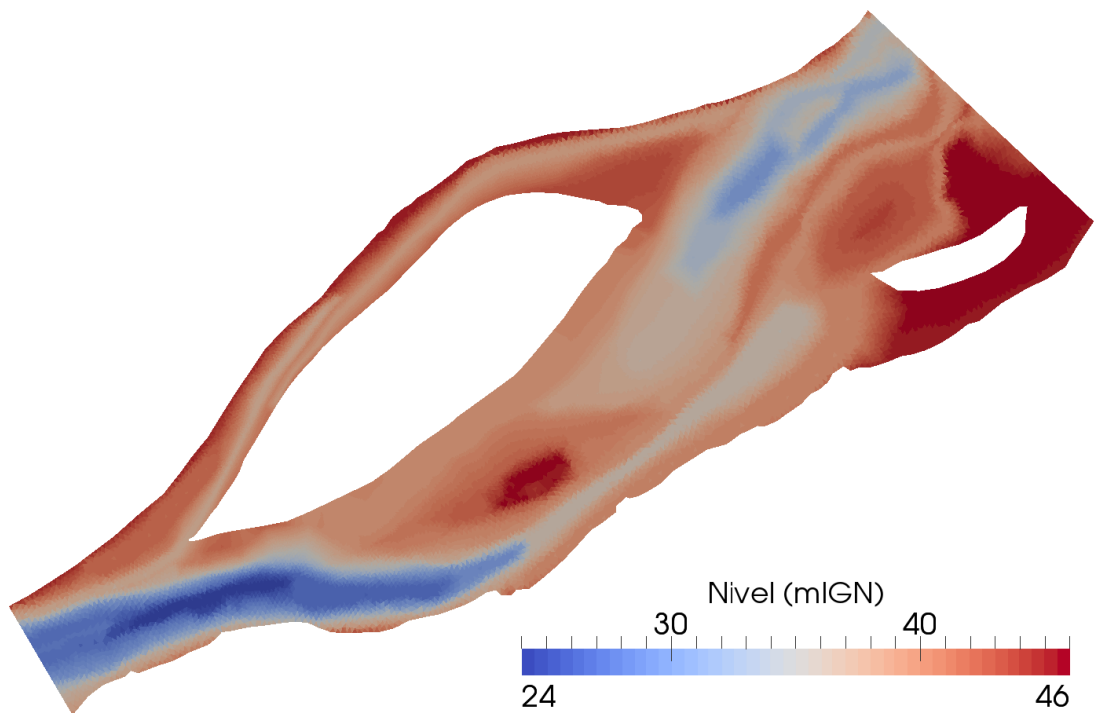


Figura 3.2. MDE del lecho.



Figura 3.3. Grilla de cálculo.

La resistencia hidráulica se parametrizó por medio del coeficiente de rugosidad de Manning. A este se le asignó a priori un valor de 0,020, a ajustar eventualmente durante la calibración. La viscosidad de torbellino se fijó en 1,5 m²/s; de todos modos, su efecto es insignificante.

Las condiciones de borde son el caudal en el contorno de aguas arriba, que actúa como forzante del flujo (y que se distribuye lateralmente en base al método de la distribución lateral¹⁰), y el nivel aguas abajo, que actúa como un condicionante del flujo. Estos no son independientes. Para obtener la relación entre ellos se procedió de la siguiente manera:

- Se utilizan los datos existentes de aforos en la estación Corrientes (sobre el período 1980-2012) para establecer, mediante ajuste, una curva altura-caudal. Esta se indica en la Figura 3.4 (la altura está referida al cero local), y es válida para el rango de medición.
- Se utilizaron los resultados del modelo hidrodinámico unidimensional *MOAGAB* del INA¹¹, que incluye el Alto Paraná y el Paraná Medio hasta la estación Empedrado, para establecer, mediante ajuste, una relación entre los niveles de agua en las estaciones Paso de la Patria – representativa de la zona de estudio – y Corrientes. Esta se indica en la Figura 3.5, y es válida en el rango de medición.
- Combinando ambas curvas, se obtuvo la relación entre el caudal y el nivel en Paso de la Patria, mostrado en la Figura 3.6, junto a la similar para Corrientes como referencia.

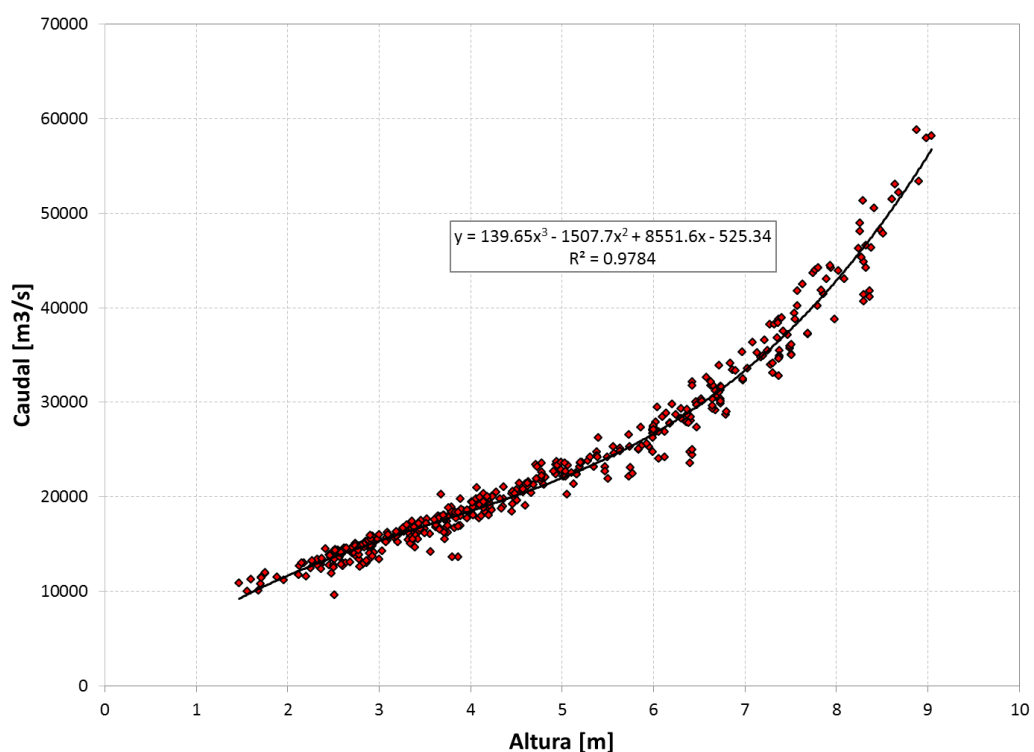


Figura 3.4. Relación altura-caudal en Corrientes.

¹⁰ Weber, J.F., Menéndez, A.N., Tarrab, L., *Distribución Lateral de Velocidades en Cauces Naturales*, Ingeniería del Agua, Vol. 12, Nº 3, Setiembre 2005, 277-289

¹¹ Desarrollado para estudios relacionados al Plan de Acción frente a Emergencias de la Entidad Binacional Yacyretá.

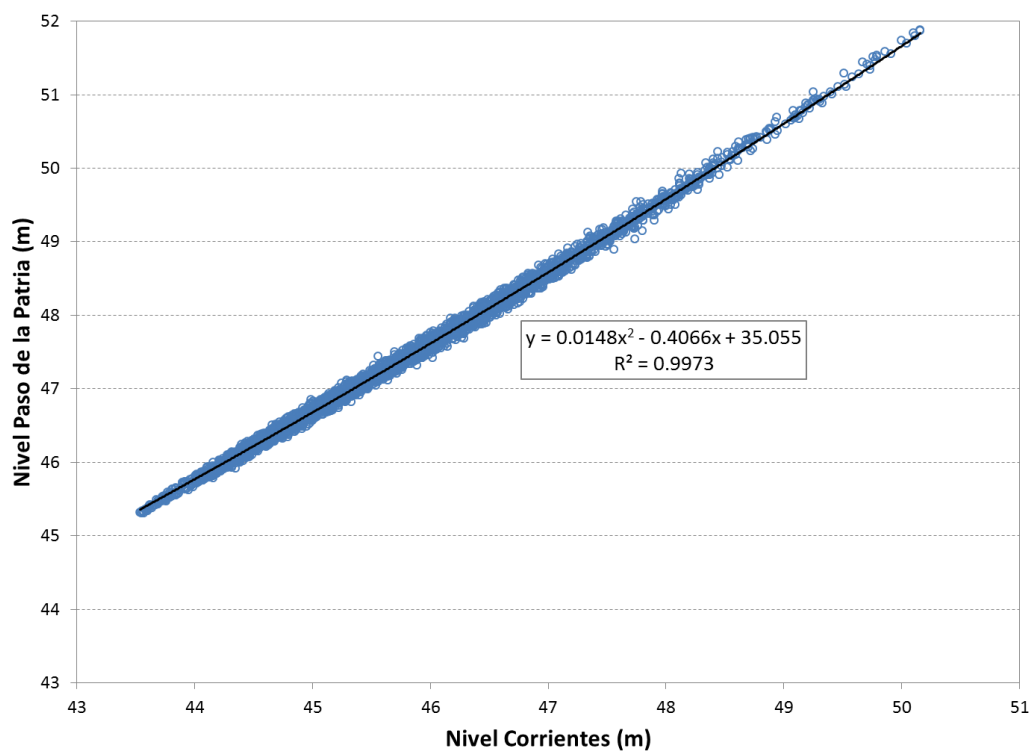


Figura 3.5. Relación entre niveles en Paso de la Patria y en Corrientes.

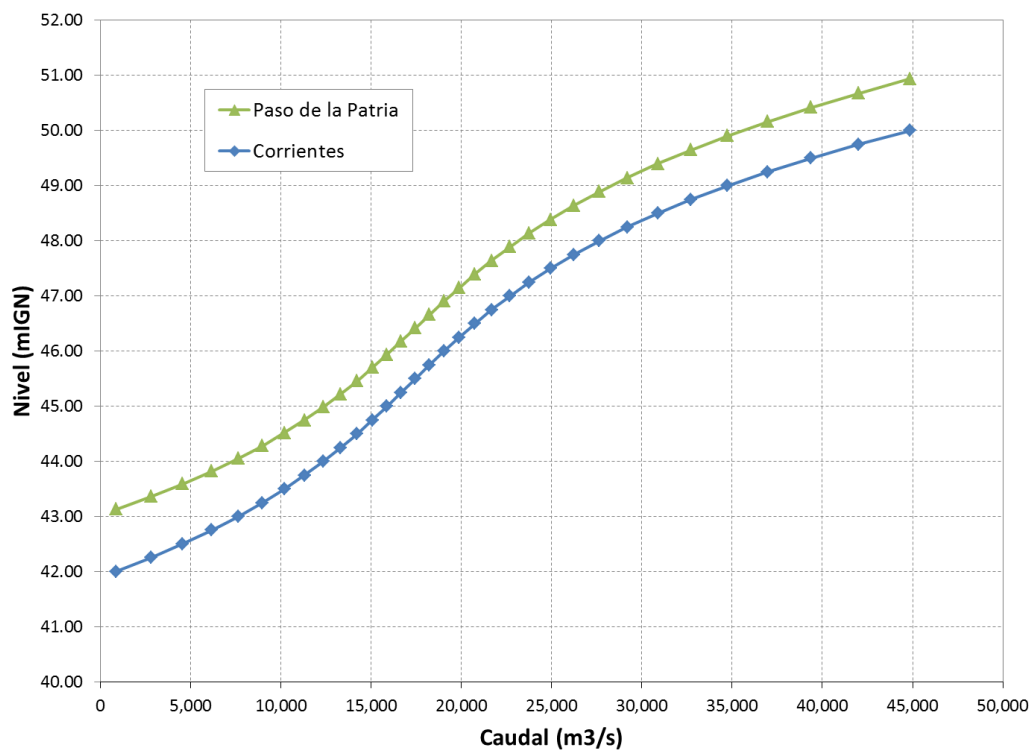
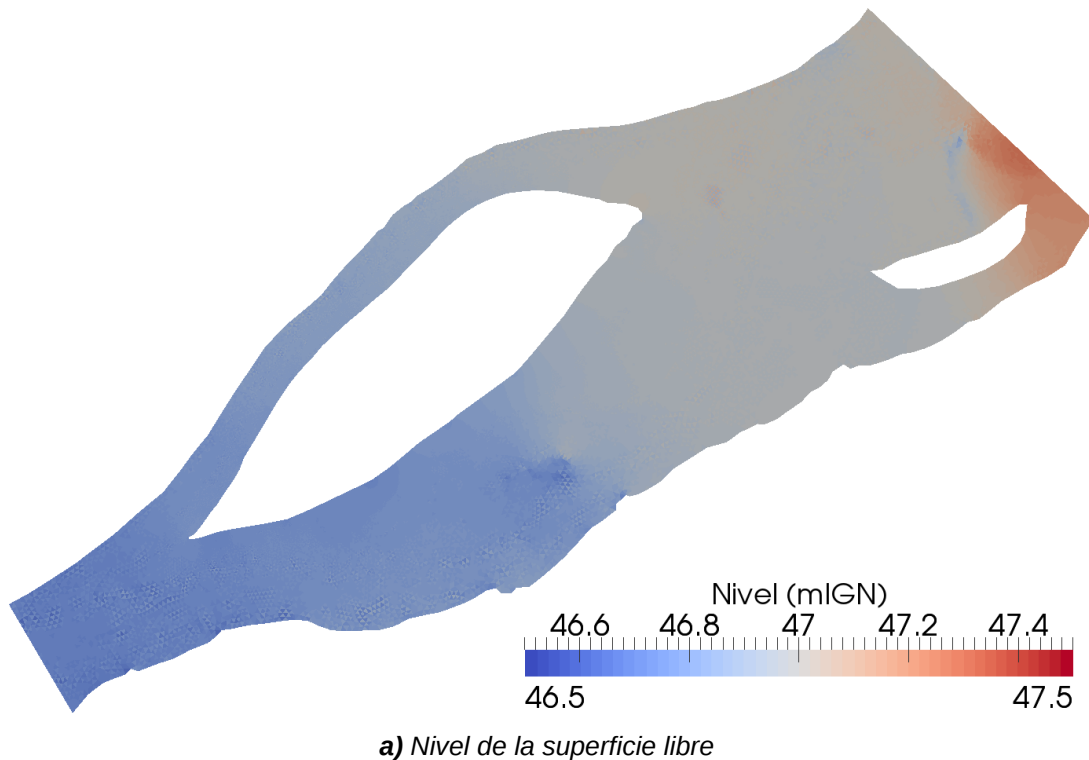


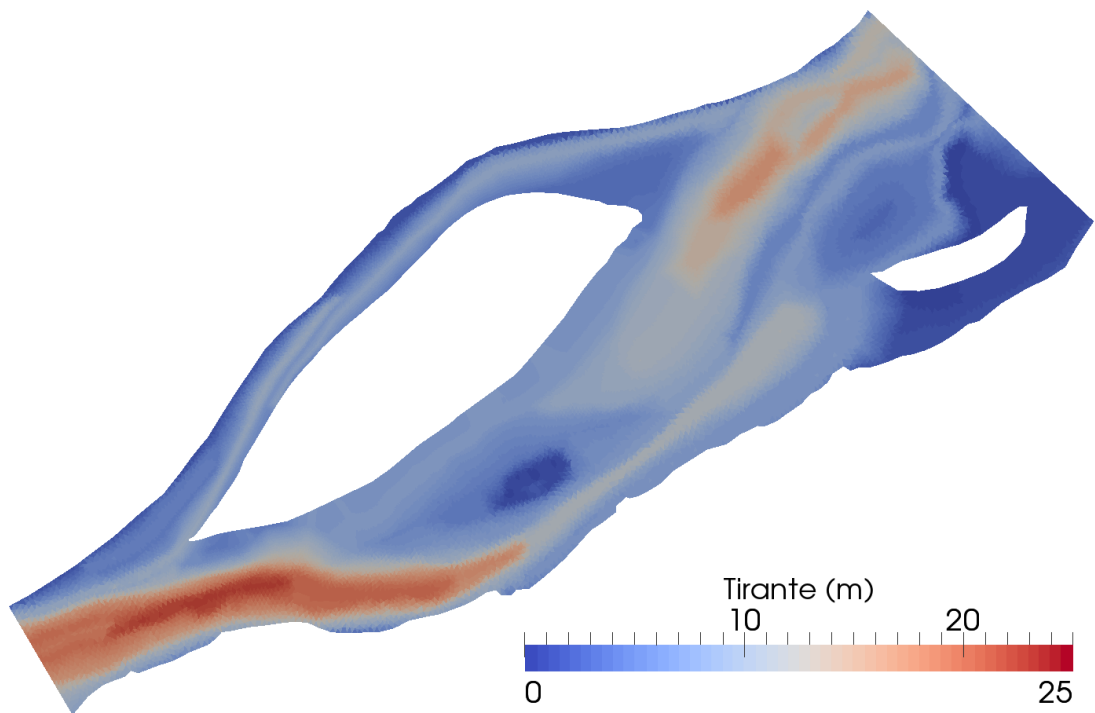
Figura 3.6. Relación entre nivel y caudal.

3.3 Validación de modelo 2D

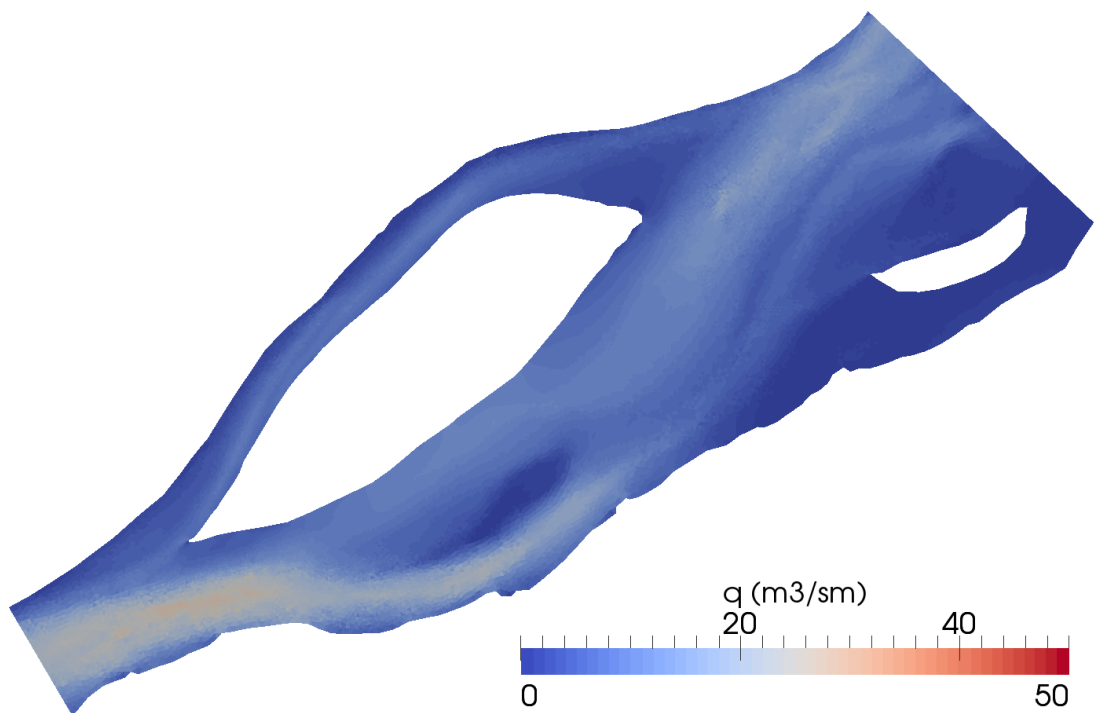
Para validar el modelo 2D preliminar se utilizó como referencia la curva de partición de caudales entre el riacho Guáscaras y el río Paraná presentada en la sección 2.4.

Se efectuó ensayos para tres caudales, dentro del rango de las mediciones: 14.000 m³/s, 18.400 m³/s (representativo de condiciones medias) y 22.000 m³/s. Los niveles de aguas abajo correspondientes se obtuvieron de la curva de la Figura 3.6. En la Figura 3.7 se presentan, a título ilustrativo, las distribuciones de distintas variables provistas por el modelo para el caso del caudal medio. Se observa que sobre la margen izquierda del borde superior existen muy bajas profundidades, que se manifiestan también en bajos caudales específicos (por unidad de ancho).

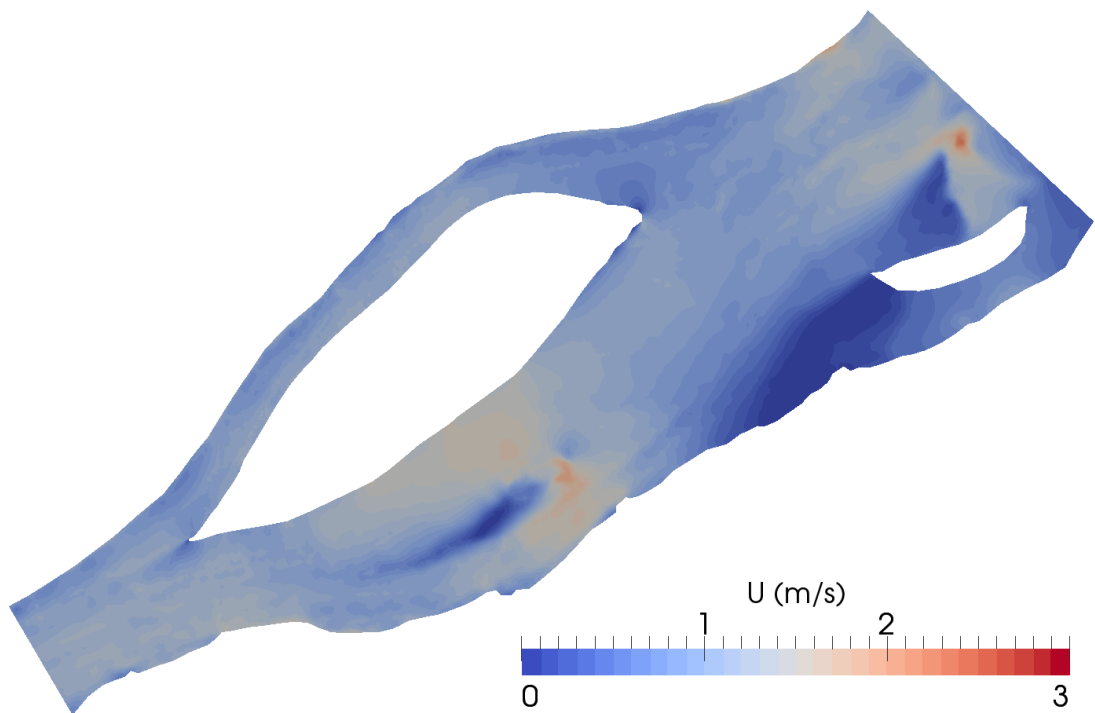




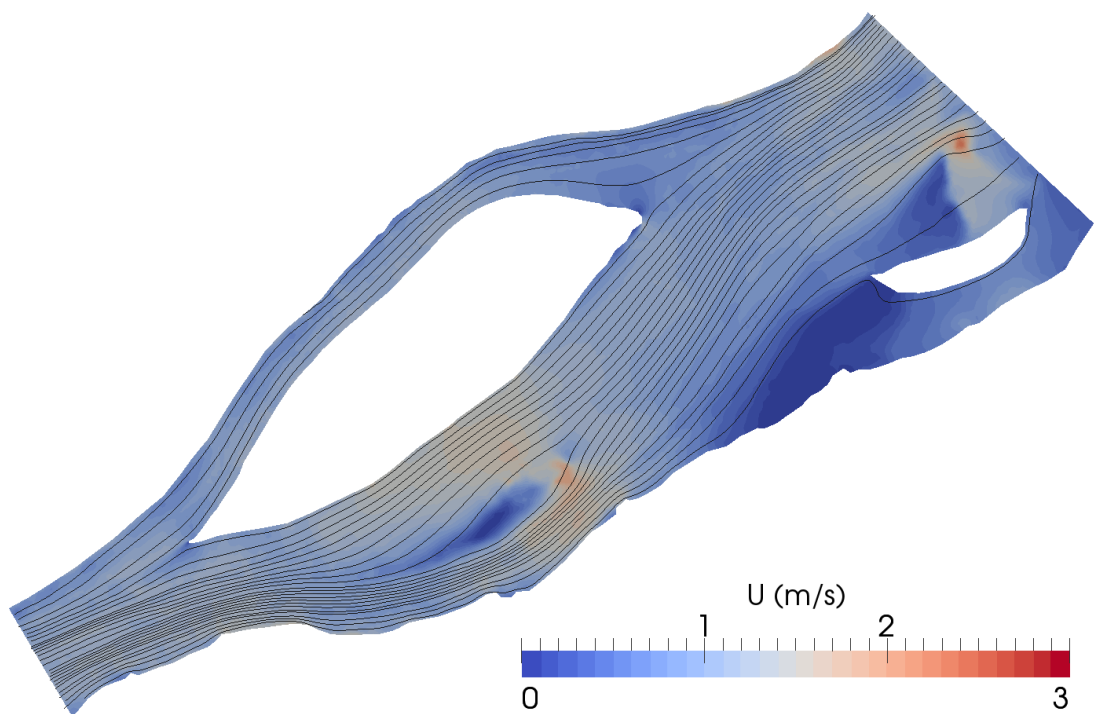
b) Tirante



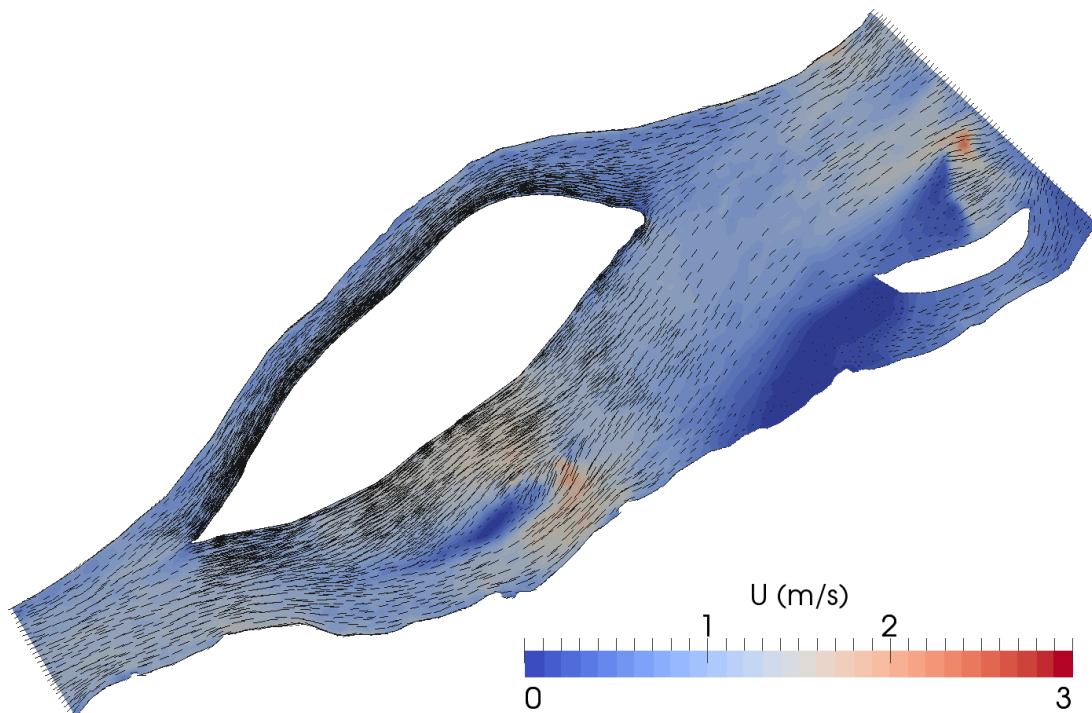
c) Caudal específico (q)



d) Velocidad



d) Velocidad y líneas de corriente



d) Velocidad y campo de velocidades

Figura 3.7. Distribución de variables hidrodinámicas de acuerdo al modelo 2D para un caudal de $18.400 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Figura 3.8 muestra la partición de caudal entre los dos brazos de acuerdo al modelo, superpuesta sobre los resultados de las mediciones en términos del caudal absoluto del riacho Guáscaras (que es el que presenta mejor nivel de correlación con el caudal total). Se observa un acuerdo satisfactorio. Esto no sólo es indicativo de la buena performance del modelo, sino que también reafirma la robustez de la partición frente al detalle de la batimetría del riacho Guáscaras.

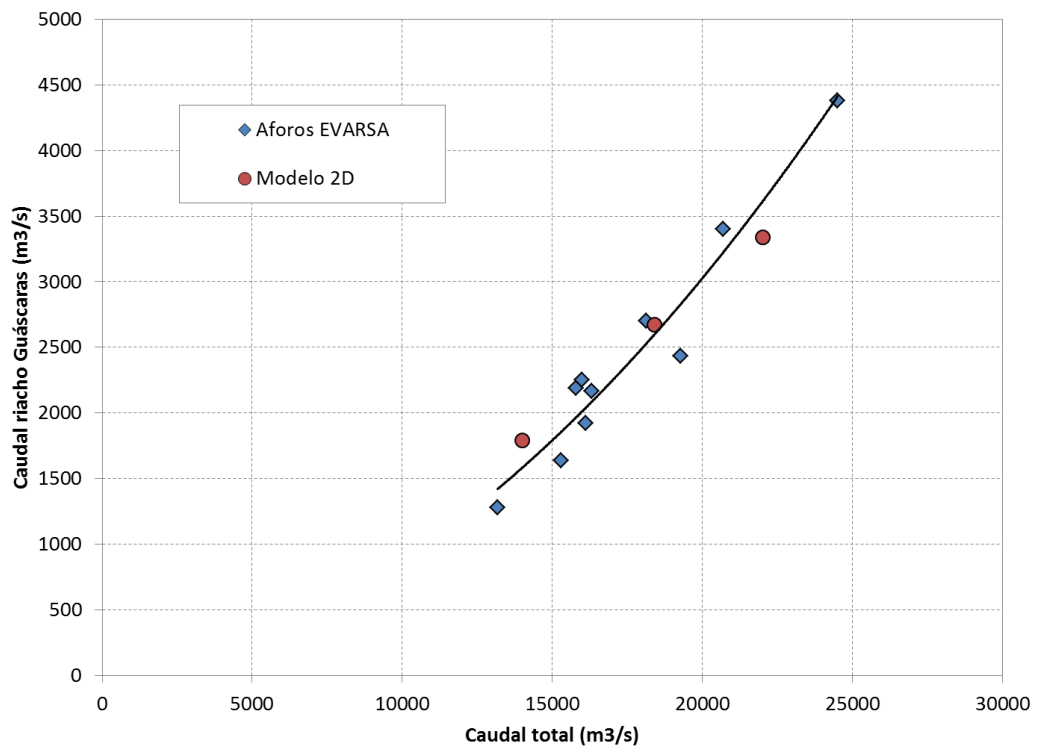


Figura 3.8. Resultados del modelo 2D para la partición de caudales.

4 EROSIÓN LOCAL

4.1 Fórmula de cálculo

La erosión local al pie de estructuras hidráulicas ha sido estimada históricamente en base a fórmulas empíricas, la mayoría de las cuales surgieron de estudios experimentales en canales de laboratorio.

Como paso preliminar a la aplicación de modelación 3D, se llevó a cabo una estimación de profundidad de erosión local esperable en torno a los espigones construidos en la cola de la Isla Guáscaras utilizando la fórmula de Melville para estribos de puentes¹². Esta indica que la máxima profundidad de erosión esperable, d_s , se calcula como:

$$d_s = K_{yL} K_I K_d K_s K_\theta K_G K_t \quad (4.1)$$

donde K_{yL} es el coeficiente de escala de profundidad, K_I el de intensidad de la corriente, K_d el de tamaño de grano, K_s el de forma del estribo, K_θ el de alineación del estribo, K_G el de geometría del canal, y K_t el de tiempo.

El coeficiente de escala de profundidad surge para las siguientes condiciones:

- Velocidad de la corriente igual a la velocidad crítica de erosión
- Sedimento grueso: $L / d_{50} > 50$, donde L es la longitud del estribo y d_{50} el diámetro medio del sedimento.
- Sedimento uniforme, es decir, $\sigma_g < 1,3$, donde σ_g es la desviación estándar geométrica de la distribución de tamaño de grano.
- Estribo de pared vertical.
- Estribo alineado con la corriente (a 90°).
- Canal rectangular.
- Condición de equilibrio final.

¹² Melville, B.W., Coleman, S.E., "Bridge Scour", Water Resources Publications, LLC, 2000.

Entonces, la fórmula que representa el límite superior esperado es la siguiente:

$$K_{yL} = \begin{cases} 2L & \text{si } \frac{L}{h} < 1 \\ 2\sqrt{hL} & \text{si } 1 < \frac{L}{h} < 25 \\ 10h & \text{si } \frac{L}{h} > 25 \end{cases} \quad (4.2)$$

El coeficiente de intensidad de la corriente se calcula como

$$K_I = \begin{cases} \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} & \text{si } \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} < 1 \\ 1 & \text{si } \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} \geq 1 \end{cases} \quad (4.3)$$

donde V es la velocidad de la corriente, V_c la velocidad crítica de erosión y V_a la velocidad para el pico de acorazamiento.

El coeficiente de tamaño de grano se evalúa como

$$K_d = \begin{cases} 0,57 \log \left(2,24 \frac{L}{d_{50}} \right) & \text{si } \frac{L}{d_{50}} \leq 25 \\ 1.0 & \text{si } \frac{L}{d_{50}} > 25 \end{cases} \quad (4.4)$$

Para estribos cuya área horizontal se encoge hacia arriba, como el presente, se sugiere un valor de base del coeficiente de forma del estribo $K_{s0} = 0,76$, que luego debe ser corregido de acuerdo a

$$K_s = \begin{cases} K_{s0} & \text{si } \frac{L}{h} \leq 10 \\ K_{s0} + 0,667(1 - K_{s0}) \left(0,1 \frac{L}{h} - 1 \right) & \text{si } 10 < \frac{L}{h} < 25 \\ 1.0 & \text{si } \frac{L}{h} \geq 25 \end{cases} \quad (4.5)$$

En el caso de estribos alineados a 60° y 120° respecto de la corriente, se sugieren valores de base del coeficiente de alineación del estribo de $K_{\theta 0} = 0,98$ y $K_{\theta 0} = 1,05$, respectivamente, que luego debe ser corregido de acuerdo a

$$K_{\theta} = \begin{cases} K_{\theta 0} & \text{si } \frac{L}{h} \geq 3 \\ K_{\theta 0} + (1 - K_{\theta 0}) \left(1,5 - 0,5 \frac{L}{h}\right) & \text{si } 1 < \frac{L}{h} < 3 \\ 1.0 & \text{si } \frac{L}{h} \leq 1 \end{cases} \quad (4.6)$$

El coeficiente de geometría del canal se establece en $K_G = 1.0$ para un canal simple (sin tramo de planicie de inundación), como en el presente caso.

Para condiciones de lecho vivo, como en el presente caso, el coeficiente de tiempo puede tomarse como $K_t = 1.0$.

4.2 Aplicación de fórmula

Se aplicó la fórmula de Melville al presente problema. Los datos utilizados fueron los siguientes:

- Se consideraron condiciones medias de flujo, infiriéndose valores de las variables hidrodinámicas a partir de los resultados del modelo 2D para condiciones de caudal medio, a saber, $h = 9,5$ m/s para el riacho Guáscaras, $h = 7,5$ m para el río Paraná, y $V = 1$ m/s para ambos. Utilizando el valor de rugosidad de Manning establecido para el modelo 2D surge una velocidad de corte $u_* = 0,045$ m/s.
- A partir de las distribuciones granulométricas mostradas en la sección 2.6, se estimó $d_{50} \approx 250$ m (aproximadamente el promedio aritmético de las 5 muestras) y se consideró sedimento uniforme ($\sigma_g < 1,3$), con lo cual $V_a = V_c$ (no hay acorazamiento). El número de Reynolds asociado al tamaño medio, en términos de la velocidad de corte, es entonces $Re_* = 11$. Esto conduce a un valor de factor de movilidad crítico¹³ $\theta_{sc} = 0,043$, que corresponde a una velocidad crítica de erosión de $V_c = 0,29$ m/s, indicando que se está en condiciones de lecho vivo.
- La longitud del estribo se estima en $L = 40$ m. Entonces $L / h = 4,2$ y $5,3$, respectivamente, y $L / d_{50} = 1,6 \times 10^5$.

Los resultados, discriminando los distintos coeficientes, se presentan en la Tabla 4.1. Se observa que el coeficiente de escala de profundidad es muy alto, y que sólo es reducido por el coeficiente de forma del estribo. Los valores finales, del orden de los 25 m, resultan robustos frente a análisis de sensibilidad a variaciones en los datos de entrada. Nótese que los valores calculados son mucho mayores a los observados hasta el presente. Más allá de las incertidumbres del método de cálculo, que puede conducir a desviaciones considerables, esos valores indican que pueden esperarse grandes profundidades para las fosas de erosión local adyacentes a los espigones.

¹³ Van Rijn, L.C., "Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas", Aqua Publications, 1993.

Tabla 4.1. Cálculo de erosión local.

Factor	Valor	
	Guáscaras	Paraná
K_{yL}	39 m	35 m
K_I	1,0	1,0
K_d	1,0	1,0
K_s	0,67	0,69
K_θ	1,0	1,0
K_G	1,0	1,0
K_t	1,0	1,0
d_s	26 m	24 m

5 CONCLUSIONES

La siguiente es la síntesis de las conclusiones de esta primera etapa del estudio:

- Se producen *cambios morfológicos naturales significativos* en torno a la cola de la Isla Guáscaras, que condicionan la estabilidad de la obra de recomposición. En particular, se producen variaciones en la extensión y profundidad de la hoya mayor de erosión sobre el río Paraná, en la alineación del canal principal del riacho Guáscaras, en el ancho y profundidad del canal secundario del riacho Guáscaras, en la ubicación y empinamiento del escalón a la desembocadura del riacho Guáscaras, y en la localización y profundidad de la hoya de erosión menor al pie del escalón. **Esto indica que la obra está insertada en un ambiente fluvial agresivo, por lo que es necesario un seguimiento continuo de su estado.**
- Las mayores variaciones se producen *por efecto de las crecidas del río Paraná*. En particular, luego de la crecida de 2007 se registró una profundización significativa de la hoya mayor – del orden de los 5 m – y un ensanchamiento notable del canal secundario del riacho Guáscaras, mientras que luego de las crecidas de 2010 y las dos de 2011 se verificó una nueva profundización significativa de la hoya mayor, y un cambio en el patrón de flujo sobre el riacho Guáscaras acompañado de una profundización significativa – del orden de los 4 m – del canal secundario. **De esto surge que es importante efectuar tareas de inspección a posteriori de cada crecida.**
- En el período entre 2006 y 2009 la cola de la Isla Guáscaras sufrió un *empinamiento de las barrancas* sobre ambas márgenes, aguas arriba de la obra, hasta casi la casi desaparición de barrancas extendidas, salvo por la zona de playa aguas arriba del espigón de margen izquierda generada por la acción de ese espigón. En febrero de 2012 se produjo la *reaparición de una barranca extendida* sobre la margen izquierda de la isla, aguas arriba de la obra; pero esto podría estar asociado a un desmoronamiento de la margen. **El empinamiento de las barrancas se interpreta como un indicador de tendencia erosiva general de la cola de la Isla Guáscaras, aguas arriba de la obra.**
- Luego de la construcción de la obra se conformaron sendas *hoyas de erosión* en torno al extremo de los dos espigones. Estas se agrandaron y profundizaron, registrándose una erosión de entre 1 y 2 m entre agosto de 2008 y febrero de 2009 – que representa una tasa media de erosión de entre 35 y 70 cm/mes –, y de alrededor de 5 m entre agosto de 2008 y febrero de 2012 (descontándole a la hoya del riacho Guáscaras los 4 m de reducción de la cota de fondo del canal secundario, sobre el que se asienta) – que representa una tasa media de erosión de alrededor de 15 cm/mes. **La formación de hoyas de erosión en torno al extremo de los espigones es un fenómeno conocido, sobre cuya evolución debe hacerse un seguimiento para determinar cuándo alcanza su estabilización.**

- Las *erosiones al pie de obra detectadas* durante la inspección subacuática de octubre de 2012 a todo lo largo de la margen del riacho Guáscaras y la cara de aguas abajo de la obra se consideran esencialmente asociadas a la *profundización del canal secundario del riacho*. **Esto es una clara indicación del efecto que sobre la obra tienen los significativos cambios morfológicos naturales; al mismo tiempo evidencia la capacidad de resistencia de la obra frente a estos embates, aunque al mismo tiempo reclama acciones suplementarias para garantizar su estabilidad.** Por su parte, las erosiones puntuales sobre la margen del río Paraná (extremo de aguas arriba del espigón y extremo de aguas abajo de la cola de la isla) están seguramente ligadas a las altas velocidades locales de la corriente en esos puntos. **Estas erosiones puntuales se pueden manejar con un adecuado mantenimiento.**
- La *partición de caudal* entre el riacho Guáscaras y el río Paraná depende esencialmente del *nivel del río*, no detectándose la influencia de los cambios batimétricos del riacho Guáscaras. **Esta observación es importante porque indica una estabilidad global del riacho Guáscaras como curso de agua, a pesar de sus variaciones batimétricas.**
- Las *profundidades máximas de erosión* de las fosas generadas por los espigones, de acuerdo a cálculos con una fórmula empírica, resultan del orden de los 25 m, mucho mayores a los observados hasta el presente. Más allá de las incertidumbres del método de cálculo, que puede conducir a desviaciones considerables, esos valores indican que pueden esperarse grandes profundidades para esas fosas. **Esto apoya la idea de extender el espigón del riacho Guáscaras, de modo de evitar que la hoya eventualmente impacte sobre la zona de relleno.**

En síntesis, de esta etapa de los estudios surge que:

- La obra de recomposición está insertada en un ambiente fluvial agresivo, por lo que es necesario un seguimiento continuo de su estado. En particular, es importante efectuar tareas de inspección a posteriori de cada crecida del río Paraná.
- Se manifiesta una tendencia erosiva general de la cola de la Isla Guáscaras, aguas arriba de la obra (salvo por la zona de playa generada por la acción del espigón sobre la margen del río Paraná), por lo que sería conveniente efectuar un seguimiento de este problema.
- A pesar de sus variaciones batimétricas, el riacho Guáscaras muestra una estabilidad global como curso de agua.
- La obra de recomposición ha demostrado gran capacidad de resistencia frente a los embates resultantes de los cambios morfológicos naturales. En particular, frente a la notable profundización del canal secundario del riacho Guáscaras, que ha conducido a erosiones al pie de la obra. Para garantizar la estabilidad futura de la obra, es necesario implementar acciones suplementarias.
- Las erosiones puntuales al pie de obra que se observan sobre la margen del río Paraná se pueden manejar con un adecuado mantenimiento.
- Los espigones de protección generan hoyas de erosión en torno a sus extremos, sobre cuya evolución debe hacerse un seguimiento para determinar cuándo alcanzan su estabilización. En particular, se perfila la necesidad de extender el espigón del riacho Guáscaras, de modo de evitar que la hoya eventualmente impacte sobre la zona de relleno.