

MODELACIÓN 1D Y 2D (OPTIMIZADO) DE UN TRAMO DEL RÍO PARANÁ PARA EL DISEÑO DE LA CONEXIÓN GOYA -RECONQUISTA

Gerardo Hillman¹, Cecilia Pozzi Piacenza¹, Mariano Corral¹, Mariana Pagot¹, Andrés Rodríguez¹, Juan Hopwood² y Julio Cardini².

¹ Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.
Av. Filloy s/n. Ciudad Universitaria. Córdoba. Te.: 0351-4334446. E-mail: gerardo.hillman@gmail.com

² Serman & Asociados S.A. Buenos Aires.

RESUMEN

Se presenta la descripción de las tareas asociadas al análisis hidrodinámico de un tramo del Río Paraná a la altura de las ciudades de Goya y Reconquista.

El modelo matemático bidimensional fue aplicado a partir de la valoración objetiva de variables hidráulicas como velocidades, profundidades, sobreelevaciones o niveles resultantes de la superficie libre del agua, utilizando también como elemento de comparación y de análisis, las líneas de escurrimiento preferencial del flujo ante la presencia de la obra y su contraste con las situación actual (sin puente).

Se destaca que con el objeto de optimizar los tiempos de cálculo se desarrolló un nuevo algoritmo de cálculo respetando las ecuaciones de gobierno y el esquema de elementos finitos. Este nuevo desarrollo computacional consistió en la paralelización de los procesos de cálculo, permitiendo disminuir el tiempo de proceso unas 27 veces respecto al esquema original.

ABSTRACT

A detailed hydrodynamic modeling of large rivers as Paraná River (Argentina) it is a complex and necessary work to the proper design of the number and dimensions of bridges along the large alluvial plain (near 40 Km). Recently the final Project study was carried out based on this hydrodynamic results. At the bridge location the Parana River mean discharge is near 17,000 m³/s while the design discharges were adopted around 60,000 m³/s and 80,000 m³/s, for 100 and 1,000 years of recurrence period. New topobathymetric and hydraulic data were used, and a refined grid was required. The computational time was strongly increased with a paralleling strategy for the 2DH model. Calibrations include a comparison with two selected floods, several measured water levels in points inside the domain, and Landsat images for flow pattern. New results obtained with this methodology are presented including two cases: natural river and the projected work.

INTRODUCCIÓN

Se presenta la descripción de las tareas asociadas al análisis hidrodinámico de un tramo del Río Paraná. El modelo matemático bidimensional generado fue aplicado a partir de la valoración objetiva de variables hidráulicas como velocidades, profundidades, sobreelevaciones o niveles resultantes de la superficie libre del agua, utilizando también como elemento de comparación y de análisis, las líneas de escurrimiento preferencial del flujo ante la presencia de la obra y su contraste con las situación actual (sin puente).

Se introduce el modelo matemático y sus ecuaciones de gobierno, describiendo capacidades y limitaciones del mismo. Un nuevo desarrollo computacional, la estrategia de paralelización, permitió incrementar el tiempo de cálculo demostrando una mejora de 27 veces en el tiempo de cálculo de la opción original (Andreotti et al, 2009).

Se presentan dos modelaciones asociando las mismas a las crecientes de larga duración del año 1983 y de duración normal del año 1998 respectivamente.

Definidos los polígonos de rugosidades se simulan escenarios sin puente y con puente para los caudales de recurrencia centenaria de 63400 m³/s y de recurrencia milenaria de 82700

m³/s.

Se presenta la alternativa seleccionada a partir de la evaluación de sobreelevaciones, velocidades medias en puentes y las líneas de corriente resultantes.

EL MODELO HIDRODINÁMICO

La herramienta utilizada para la modelación del escurrimiento bidimensional ha sido el RMA2©. Este es un modelo numérico hidrodinámico en elementos finitos bidimensional (2DH – dos Dimensiones Horizontales), promediado en la vertical, para simular flujos naturales a superficie libre, donde el movimiento es esencialmente horizontal y puede ser descripto por una aproximación bidimensional debido a que la aceleración vertical es pequeña en comparación con la componente horizontal.

El modelo RMA2© calcula la solución por elementos finitos de las ecuaciones de Navier–Stokes, que derivan directamente de la 2ª Ley de Newton ($F = ma$), bajo la formulación de Reynolds para flujos turbulentos.

Este modelo calcula los niveles de la superficie libre y las componentes horizontales medias de la velocidad para flujo subcrítico en campos bidimensionales de flujo. Las pérdidas friccionales se estiman a través de la ecuación de Manning, mientras que para caracterizar la turbulencia se utilizan coeficientes de viscosidad de remolino. El modelo permite analizar tanto flujos permanentes como impermanentes.

CASO DE ESTUDIO

El modelo se aplicó en un entorno de unos 80 km de longitud por unos 40 km de ancho, centrando el dominio de cálculo en la traza propuesta para el puente. Se procesó e incorporó la información topobatimétrica, diferenciándose las principales estructuras geo y fluviomorfológicas a partir de polígonos, que a su vez fueron analizados para la asignación de la rugosidad asociada. Una vez compatibilizada la información de base, se adoptaron distintos criterios de mallado, con el objetivo de resaltar las principales estructuras fluviales y vías preferenciales de escurrimiento, aportando mayor resolución, en términos de dimensiones de elementos, en aquellas regiones de principal interés como las cercanías de la zona de traza, la ubicación de los albardones, islas del cauce principal y cauces menores definidos como el Río Mini y el Río Amores.

Resuelto el modelo en su información básica se propuso el siguiente esquema de simulaciones:

Simulaciones sin puente: se buscó calibrar el modelo para crecientes observadas en el año 1998 (50600 m³/s) asociado a un escenario de rugosidad alta y 1983 (60215 m³/s) asociado a un escenario de rugosidad baja y a su vez también se incluyeron escenarios de 100 y 1000 años de recurrencia con 63400 m³/s y 82700 m³/s respectivamente (crecidas de proyecto).

Simulaciones con puente: partiendo del modelo calibrado, se incorporó la estructura diseñada, en sus distintas alternativas, compuesta por terraplenes, puentes aliviaderos y viaducto principal. Los resultados obtenidos, permitieron valorar sobreelevaciones del pelo de agua, velocidades máximas y medias en los distintos componentes del puente y la distribución de caudales a lo largo de la transecta que intercepta el cauce y la llanura fluvial. Las simulaciones realizadas para comparar las distintas alternativas de puente se efectuaron para caudales de 82700 m³/s, considerando escenarios de rugosidad baja y alta. Para la alternativa ganadora, presentada en este trabajo, también se incluyeron simulaciones de 63400 m³/s

(rugosidad alta y baja), 50600 m³/s (escenario de rugosidad alta, creciente de 1998) y 60215 m³/s (escenario de rugosidad baja, creciente de 1983).

Cabe aclarar que para la simulación con puente se requirió incorporar un nueva malla de cálculo, refinada en aquellos sectores de interés particularmente en los puentes proyectados. A continuación se detallan los datos de entrada del modelo.

DATOS TOPO-BATIMÉTRICOS

Esta información está constituida por todos los relevamientos topográficos de campo, relevamiento batimétrico y restitución fotogramétrica. La información fue procesada resultando un conjunto de puntos con posición (x,y,z). Con todos los antecedentes se elaboró un modelo digital del terreno para el cauce principal, con el objeto de representar adecuadamente las distintas unidades fluviales presentes en el mismo y evitar interpolaciones erróneas al momento de incorporar la información de la llanura de inundación. En la Figura 1 se observa el modelo digital del terreno superpuesto al modelo resultante.

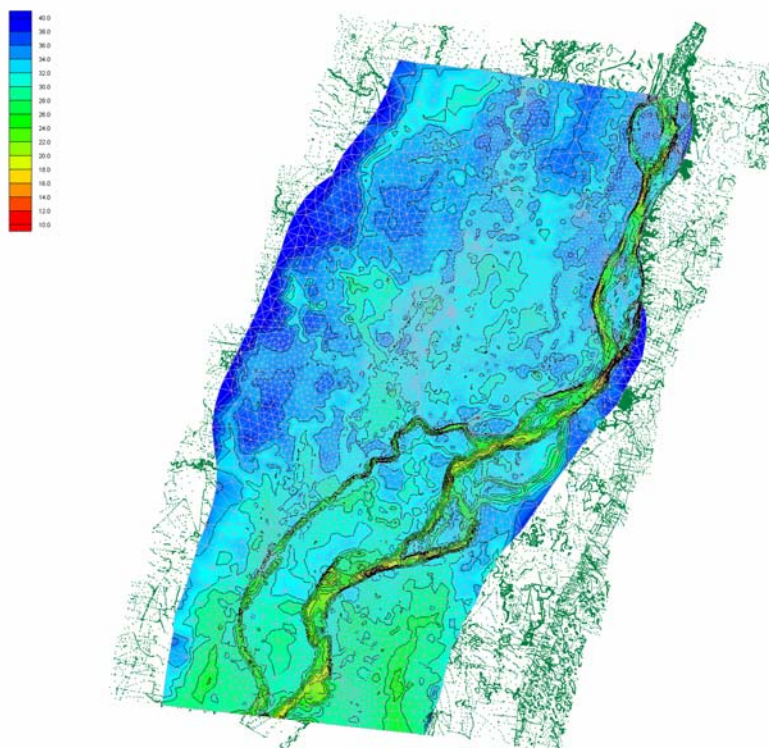


Figura1.- Modelo digital del terreno representado en el modelo resultante.

POLÍGONOS DE RUGOSIDAD

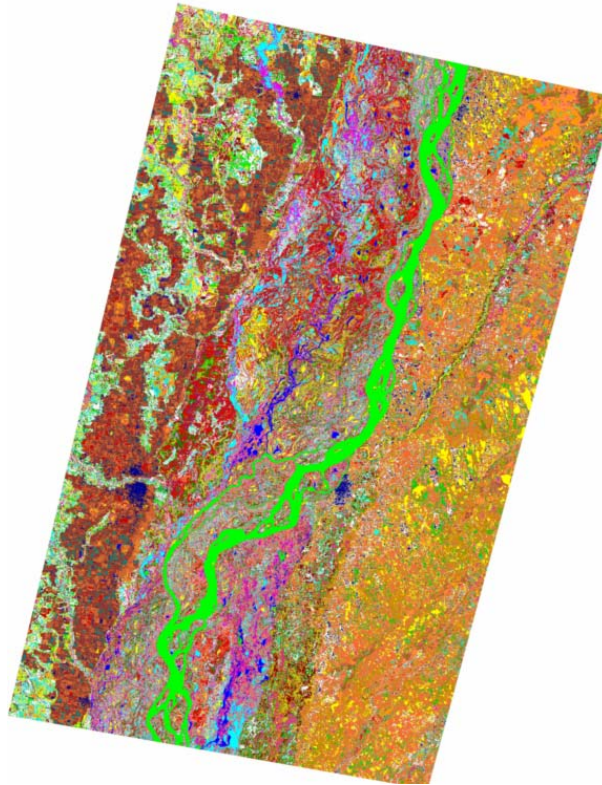
En el modelo numérico la rugosidad se representó a través de la asignación de distintos materiales encerrados en poligonales. Para caracterizar las distintas rugosidades asociadas al tramo en estudio, se realizó el procesamiento de imágenes satelitales y el apoyo en campo necesario para la validación de las clasificaciones resultantes.

En la Tabla 1 se presentan los valores de los coeficientes de rugosidad..

Tabla 1.- Coeficientes de rugosidad de manning

"n" de Manning	Rugosidad alta	Rugosidad baja
Polígono 1	0.024	0.022
Polígono 2	0.170	0.090
Polígono 3	0.120	0.060
Polígono 4	0.07	0.060
Polígono 5	0.140	0.060
Polígono 6	0.030	0.025
Polígono 7	0.030	0.025
Polígono 8	0.025	0.025
Polígono 9	0.050	0.050
Polígono 10	0.130	0.100
Polígono 11	0.130	0.130
Polígono 12	0.120	0.080

En la Figura 2 se presenta una de las imágenes satelitales utilizadas en la clasificación y en la Figura 3 se presentan los polígonos de rugosidad resultantes utilizados en el modelo 2D

**Figura2.-** Modelo digital del terreno representado en el modelo resultante.

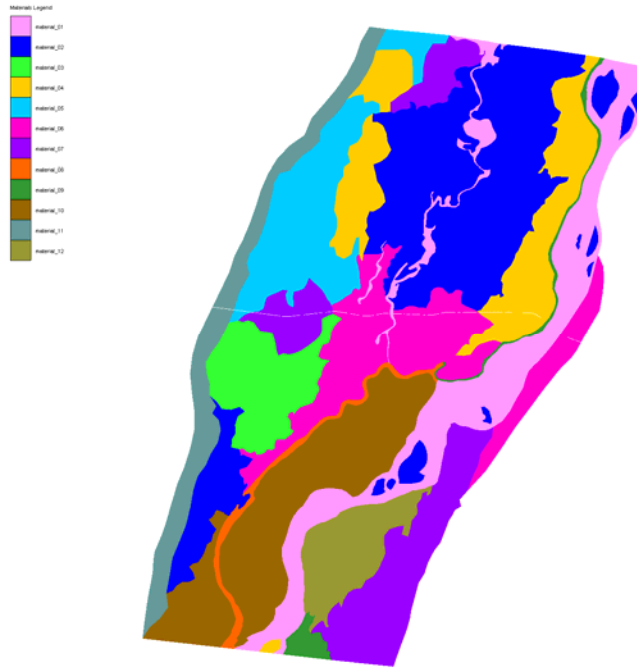


Figura 2.- Polígonos de rugosidad resultantes.

MALLA DE ELEMENTOS FINITOS

Esta se construye de tal modo que a cada nodo en su posición (x,y) se le asigna la cota mas próxima (z), a partir de un proceso de interpolación estandar. Se elaboraron dos mallas de cálculo, una malla para la simulación sin puente y otra para la simulación con puente. dominio modelado tiene una dimensión de aproximadamente 44 km en la extensión transversal y aproximadamente 77 km de extensión longitudinal. Para la discretización del dominio se han utilizado elementos triangulares y cuadriláteros. Se realizaron dos mallas de cálculo, una para la simulación sin puente (15340 elementos y 32461 nodos) y otra para simulación con puente (18056 elementos y 38527 nodos). Para la representación del dominio circundante a la traza se han utilizado elementos de 300 m de lado en la zona de los cauces de los ríos y de 500 m de lado en la zona correspondiente a la planicie de inundación. En el resto del área modelada, el tamaño de los elementos en el cauce principal del Río Paraná es de 400 m y en la planicie de 900 m. Los riachos se han representado por lo menos con dos elementos. En los bordes exteriores de la malla los elementos tienen 2 km de lado aproximadamente.

Particularmente para la malla de la simulación con puente, el tamaño de los elementos mínima llegó a valores entre 15 y 20 m, asegurando en cada vano de puente un mínimo de cuatro elementos.

En la Figura 4 y Figura 5 se presentan las mallas con puente y sin puente.

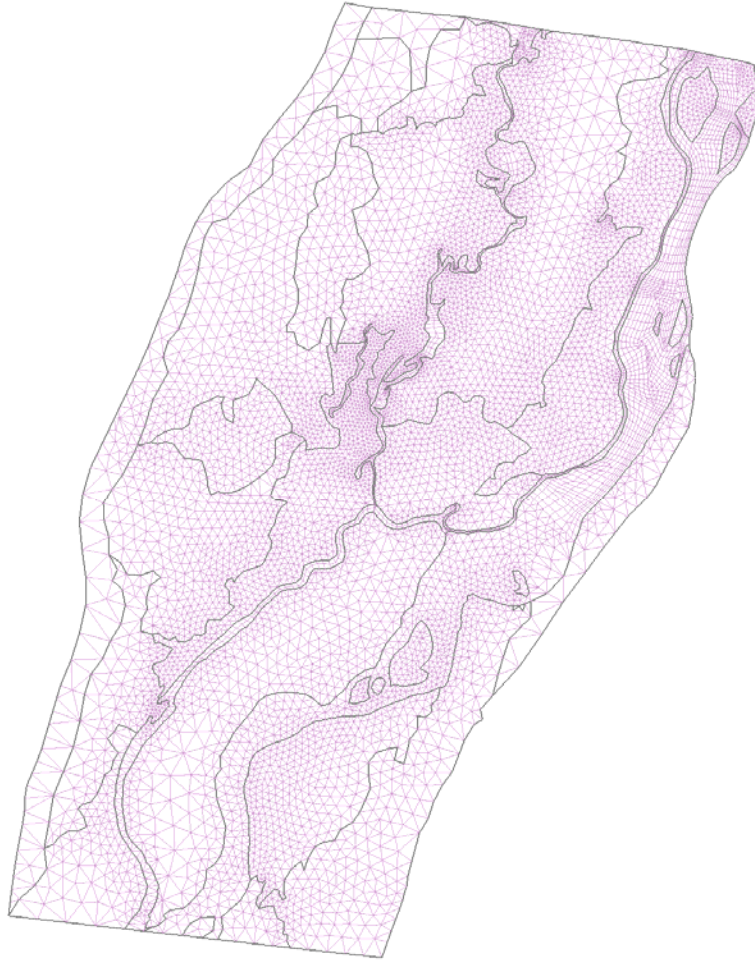


Figura 4.- Dominio de cálculo sin puente

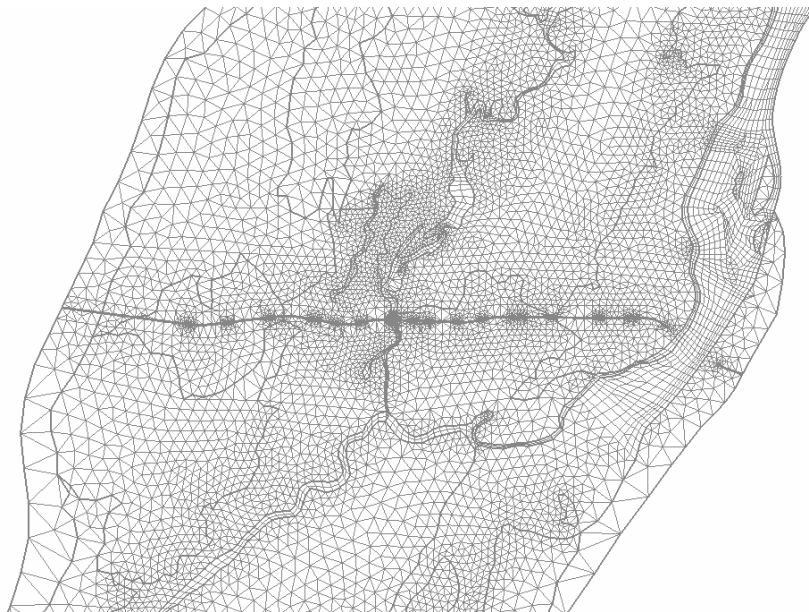


Figura 5.- Dominio de cálculo con puente.

CONDICIONES DE BORDE

Las condiciones de borde se definieron para cada uno de los escenarios hidrológicos. El modelo requirió la definición del caudal en el contorno de aguas arriba, la cota de pelo de agua en el límite inferior y la asignación de coeficientes de rugosidad de Manning para los distintos polígonos que conforman el dominio. Los valores de nivel de agua impuestos en el límite inferior del dominio asignado para cada caudal simulado y para cada escenario de rugosidad, alto y bajo, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.- Condiciones de borde, tirante y caudal

Escenario	WSE (msnm)	Caudal (m ³ /s)
1983	33.50	60215
1998	33.83	50600
63400 alto	34.21	63400
63400 bajo	33.71	63400
82700 alto	34.67	82700
82700 bajo	34.35	82700

Los valores adoptados se determinaron a partir del análisis conjunto de elevación de superficie de agua extrapolada de datos de niveles observados en hidrómetros ubicados sobre el cauce principal (Bella Vista, Goya, Reconquista y Esquina) y la modelación 1D del tramo en estudio.

El paso de cálculo utilizado para el modo dinámico fue de 0,1 horas durante 150 horas, lo que equivale a 1500 pasos de cálculo. A través de esta estrategia de modelación, se logró estabilizar el modelo aproximadamente en la hora 100, con el objeto que durante las 50 horas restantes el mismo simule un régimen permanente. Una vez resuelta la simulación dinámica, se sometió el modelo a una simulación de régimen permanente utilizando como solución de partida el último paso de la solución dinámica, permitiendo de esta manera generar soluciones de menor tamaño computacional y fácilmente manipulables desde el punto de vista de la edición y revisión de los resultados.

PUNTOS DE CONTROL O CALIBRACIÓN

Conforman este grupo de puntos, los limnómetros ubicados dentro del dominio como el limnómetro del puerto de Goya y el de Reconquista, los cuales poseen registros continuos de datos y han permitido establecer la cota de pelo de agua para las crecientes de referencia (1983 y 1998). Se incorporaron también como puntos de control referencias fijas relevadas en campo donde se ha constatado la cota o nivel de inundación observado en crecientes precedentes. Los mismos se encuentran distribuidos a lo largo del dominio de cálculo.

ESTRATEGIA DE VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN

La información disponible y utilizada para la calibración de las rugosidades consistió en relevamientos realizados en campo de puntos característicos como niveles de resaca o marcas de agua y comentarios de pobladores entrevistados, distribuidos en el dominio de análisis, los cuales permitieron identificar la cota a la que llegó el agua en la creciente de 1998 (escenario de rugosidad alta).

Para evaluar la creciente de 1983 (Escenario de rugosidad baja) se utilizó la información de los hidrómetros de Goya y Reconquista, siendo ambas lecturas, 35.89 msnm y 34.41 msnm respectivamente.

Con el objeto de calibrar los valores de rugosidad para los distintos polígonos, se propusieron distintas combinaciones, modelándose para cada escenario, mas de 20 casos. Los resultados obtenidos permitieron comparar los valores de la elevación de la superficie de agua obtenidos del modelo con los observados en campo. Una vez que se aproximaron los resultados a los observados, se verificó el comportamiento general del modelo contrastando las líneas de corriente obtenidas con las relevadas de imágenes satelitales disponibles.

En la Figura 6 se muestra la ubicación de los puntos de control en el dominio de cálculo y el la Figura 7 se muestran los valores de wse computados vs. observdos en los puntos de control.

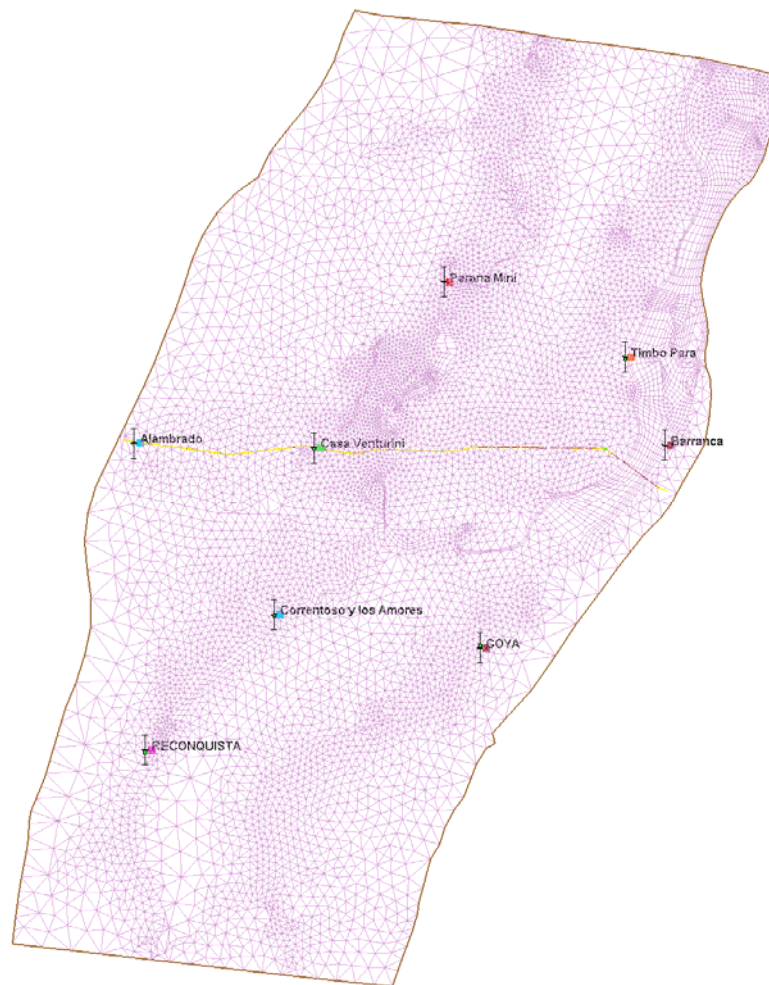


Figura 6.- Ubicación de los puntos de control en el dominio de cálculo.

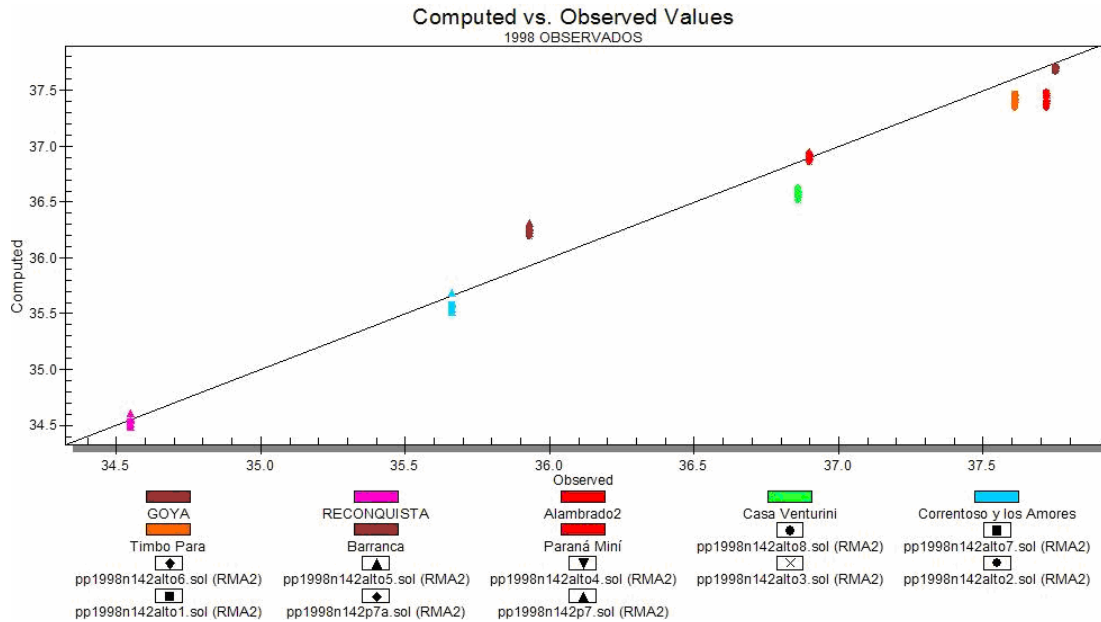


Figura 7.- Valores de tirante modelados vs. observados.

En la Figura 8 se muestra como ejemplo, para la crecida de 1983, la comparación entre las líneas de escurrimiento obtenidas mediante la simulación 2D (color rosa) y las líneas de escurrimiento relevadas en la imagen satelital del 4-6-1983 (color azul). En rojo la traza del puente.

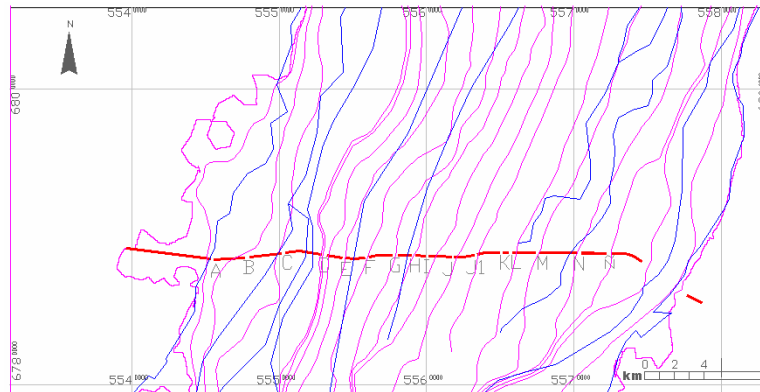


Figura 8.- Líneas de escurrimiento simulación e imagen satelital.

RESULTADOS

SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Una vez definidas las rugosidades para los dos escenarios, se simularon los casos de estudio asociados a 100 años (63400 m³/s) y 1000 años (82700 m³/s) de tiempo de recurrencia en los modelos con y sin puente. La comparación de los resultados tuvo como objetivo principal determinar:

- 1 La sobreelevación en la superficie libre como consecuencia de la presencia de la obra.
- 2 La redistribución de caudales entre planicie y cauce principal.
- 3 Las velocidades medias resultantes de la concentración de caudales en la planicie de inundación.

A partir de los aspectos mencionados, se propusieron y compararon alternativas hasta arribar a la configuración seleccionada como definitiva. Considerando la configuración del anteproyecto, se analizaron siete casos, planteando en cada uno ampliación de luces de puente en planicie, optimización de las dimensiones del puente principal y reubicación de puentes a lo largo de la traza. Se destaca que el número de puentes se mantuvo constante.

Se presentan en este trabajo los resultados asociados a la alternativa ganadora correspondiente al caudal de 1000 años de tiempo de recurrencia (82700 m³/s) (Tabla 3).

Tabla 3.- Resultados para Q = 82700m³/s, rugosidad alta

Puente	L (m)	V _{media} (m/s)	WSE _{media} (m)	Q (m ³ /s)	%Q
A	175	2.36	3.91	1210.7	1.5
B	315	1.97	4.25	2191.1	2.7
C	280	1.92	4.59	1986.9	2.4
D	350	1.55	6.91	3134.6	3.8
E	245	1.69	5.51	1887.2	2.3
F	245	1.70	6.11	2063.8	2.5
G	385	1.55	5.88	3144.8	3.8
H	245	1.47	6.75	1934.2	2.3
I	210	1.73	5.15	1469.8	1.8
J	210	1.73	5.15	1458.6	1.8
J1	245	1.72	5.59	1875.4	2.3
K	245	1.54	4.94	1529.0	1.8
L	245	1.53	5.24	1590.6	1.9
M	245	1.69	4.87	1631.4	2.0
N	245	1.84	5.09	1790.7	2.2
Ñ	350	1.37	4.29	1700	2.1
PPAL	3850	1.03	9.71	50812.6	61.4
				82700.0	100

En la Figura 9 se presenta, para el caudal de 82700 m³/s (rugosidad alta), el campo de velocidad modelado.

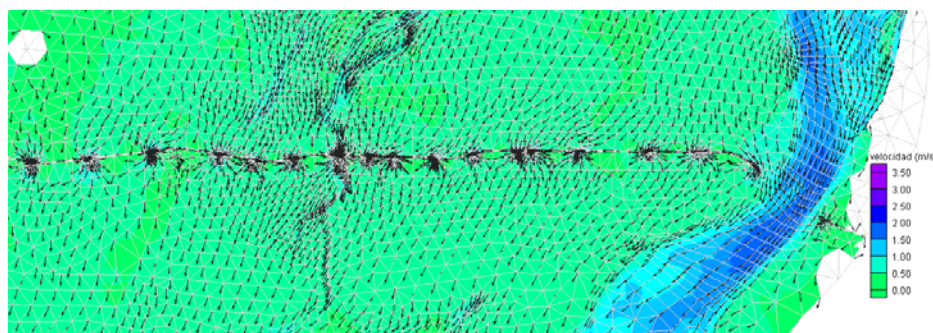


Figura 9.- Campo de velocidades Q 82700 m³/s rugosidad alta.

En la Figura 10 se muestran las sobreelevaciones para el caudal de 82700 m³/s (rugosidad alta).

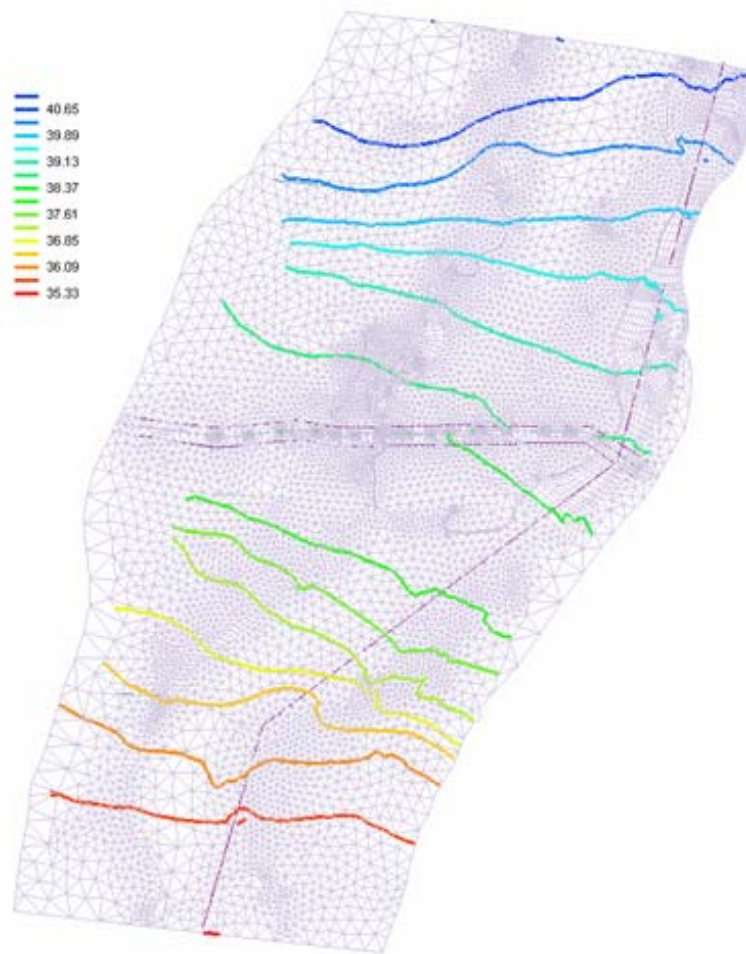


Figura 10.- WSE Q 82700 m³/s rugosidad alta

COMPARACIÓN DE LÍNEAS DE CORRIENTE

Se realizó la comparación de líneas de corriente generadas en las simulaciones con y sin obra. Este análisis se utilizó durante la etapa de propuesta de alternativas a los efectos de evaluar la reubicación y ampliación de puentes. Los resultados mostrados permitieron ajustar y confirmar la localización de los puentes mostrando consistencia en los patrones de flujo con y sin obra (Figuras 11, 12 y 13).

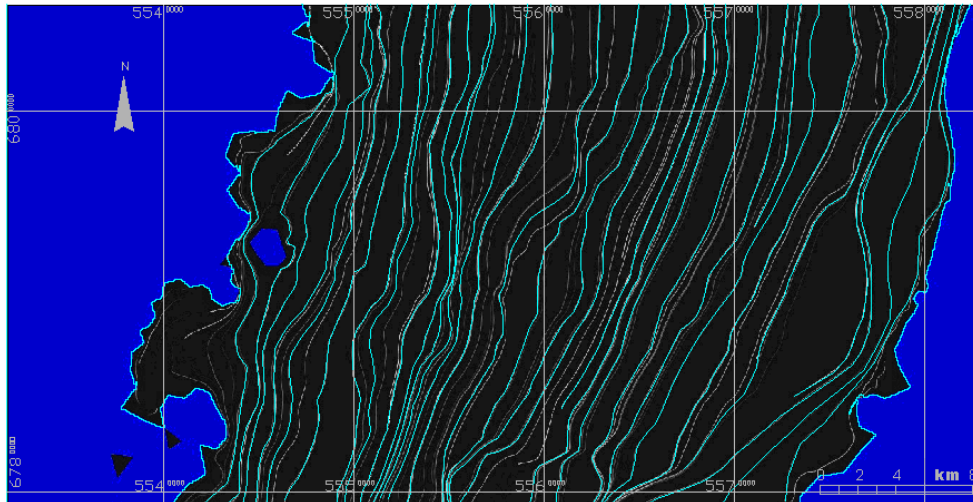


Figura 11.- Líneas de escurrimiento simulación 2D sin obra. Q 82700 m³/s rugosidad alta

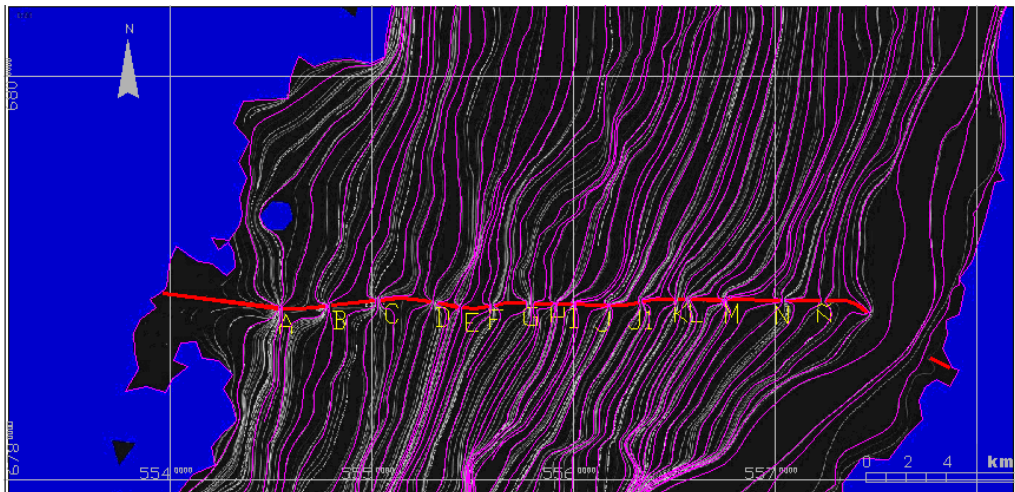


Figura 12.- Líneas de escurrimiento simulación 2D con obra. Q 82700 m³/s rugosidad alta

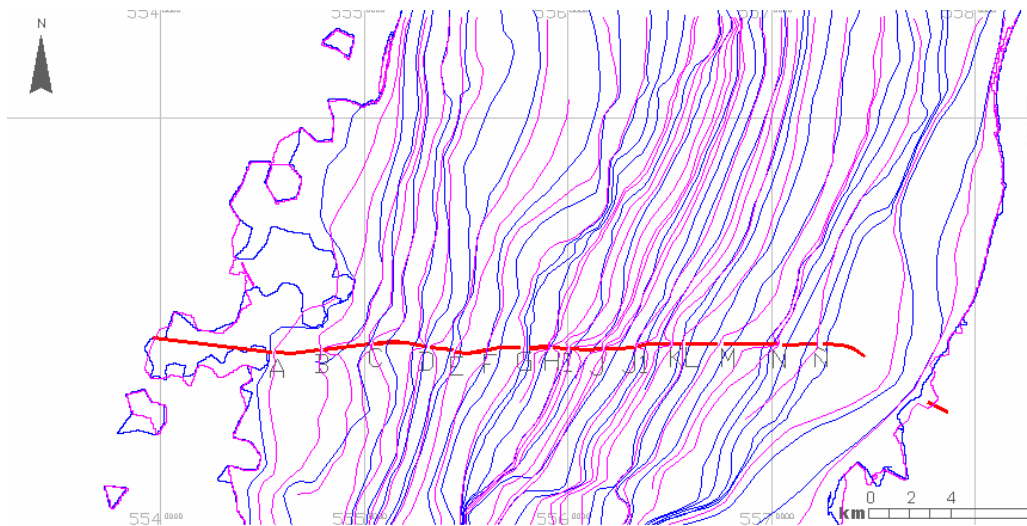


Figura 13.- Comparación líneas de escurrimiento 2D con y sin obra. Q 82700 m³/s rugosidad alta

CONCLUSIONES

La metodología utilizada implicó analizar un dominio de gran tamaño (80 x 40 km), incluyendo la clasificación en 12 rugosidades y el modelado de dos escenarios (alta y baja rugosidad) asociados a inundaciones observadas y registradas. La incorporación de datos de campo distribuidos en el dominio y la aplicación de técnicas de análisis de imágenes satelitales, permitieron calibrar adecuadamente los valores de coeficiente de Manning adoptados. Esta conclusión resulta del buen ajuste en los niveles modelados y observados en los puntos de control y la distribución de velocidades y caudal entre el cauce principal y la llanura de inundación que se condicen con las indicadas en estudios anteriores.

Una vez calibrado el modelo, utilizando su versatilidad resultado de la paralelización en su código fuente, fue posible adoptar resoluciones de 10m en la llanura aluvial cercanas a los puentes, independientemente de la estrategia de anidación.

Esta característica del nuevo modelo permitió refinar el dominio y en consecuencia caracterizar mejor aspectos hidráulicos de interés, como la velocidad y el tirante en zonas de contracción del flujo.

La optimización en el diseño se llevó a cabo mediante la superposición de las líneas de corriente resultantes de los modelos con y sin puente y el análisis de imágenes satelitales, que permitieron modificar el tamaño y ubicación de los puentes

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Rodríguez, A., Bravo, H., Farias, H., Brea, D., Castello, Hillman, G., Weber, J., Pagot, M., & Spalleti, P. 2003. Hydraulic analyses for a new bridge over the Parana River, Argentina. *International Journal of Sediment Research*, nro. 18, Vol. 2, 166-175, China. ISSN 1001-6279.

Farias, H., Rodriguez, A., Brea, D., Bravo, H., Castello, E., Hillman, G., Pagot, M., & Martinez, R. 2003. Morphodynamic analysis of a large plain alluvial river in relation to cross-channel road and bridge works. III. IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (Barcelona, 1-5 September 2003). RCEM 2003. ISBN 90-805649-6-6.

Rodríguez, A., Hillman, G., Fariás, H., Brea, D., Bravo, H., Pagot, M. & Huerta, P. 2004. Simulación hidrodinámica de un tramo medio del Río Paraná para la interconexión vial Goya-Reconquista. *Mecánica Computacional*, (G. Buscaglia, E. Dari y O. Zamosky Eds.), Publicación de AMCA, Vol. XXIII, pgs. 1325-1342, Bariloche, Arg., ISSN 1666-6070.

Andreotti, A., Hillman, G., Pozzi, C., Rodriguez & Indigo SA. 2009. Optimización de un Modelo Hidrodinámico Bidimensional. (Resumen aceptado). Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CMNI'09, CIMNE, Barcelona, España