

# MODELACIÓN DEL IMPACTO HIDRÁULICO DE UNA CONEXIÓN VIAL A TRAVÉS DEL VALLE DEL RÍO PARANÁ

Raúl Cáceres, Julio Cardini, Tamara Faya, Maribel Garea y Noelia Legal

Serman & Asoc. S.A., Pico 1641 CABA, Argentina. (54-11) 4703-2420  
caceres@serman.com.ar, cardini@serman.com.ar, faya@serman.com.ar, garea@serman.com.ar, legal@serman.com.ar

## Introducción

La simulación matemática es una herramienta fundamental para el desarrollo de estudios hidráulicos a gran escala. En este contexto, como parte fundamental de un proyecto de Conexión Vial entre las ciudades de Santa Fe y Paraná (República Argentina), se realizó una modelación matemática bidimensional hidrodinámica, en régimen permanente, mediante el software MIKE 21 Flow Model FM (Flexible Mesh).

El área de estudio abarca el río Paraná y su extenso valle de inundación, desde Santa Elena hasta Diamante. El objeto del trabajo fue la evaluación del sistema de aliviadores y puentes que conforman la conexión vial, cuya transparencia hidráulica debe garantizar la no superación de un desnivel hidrométrico máximo estipulado para la crecida de diseño (período de recurrencia 1000 años). El estudio busca también que la afectación de las líneas de flujo en la planicie inundable para una condición futura con obras sea mínima respecto de la situación original del sistema.

## Materiales y métodos

El modelo MIKE 21FM, de malla flexible, utiliza el método de volúmenes finitos centrado en la celda para discretizar el flujo y las ecuaciones de transporte. En el plano horizontal (coordenadas esféricas o cartesianas), emplea una malla no estructurada con elementos triangulares y/o cuadrangulares (DHI, 2012).

Para el desarrollo del trabajo como primera medida se recopilaron y analizaron los principales estudios y proyectos antecedentes en la zona (Paoli y Schreider, 2000; INECO, ALATEC, Serman y Asociados, PSI, 2005; Halcrow, EVARSA, INCOIV, 2008; Ramonell, Amsler y Toniolo, 2000). Luego se ejecutaron los siguientes pasos metodológicos:

a. Adquisición de datos topo-batimétricos para el desarrollo de un Modelo Digital del Terreno (MDT) a gran escala.

Para el desarrollo del MDT se utilizó una extensa base de datos topográficos y batimétricos antecedentes; nuevos relevamientos de detalle, datos de vuelos LIDAR, datos aerofotogramétricos con resolución espacial de 5 m y precisión vertical inferior al metro, provenientes de un vuelo realizado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), y se complementaron algunas áreas no cubiertas mediante topografía radar del modelo digital de elevaciones SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

Los relevamientos batimétricos *ad hoc* adicionales, incluyeron el cauce principal del río Paraná, y los ríos, arroyos y cursos de agua menores atravesados por las distintas trazas alternativas de la conexión vial. Asimismo, en dichos cruces se realizaron relevamientos topográficos mediante tecnología LIDAR, con el objeto de brindar un mayor detalle y precisión en las zonas de interés.

b. Conformación de una malla numérica a gran escala.

A partir del MDT obtenido se construyó la malla de elementos no estructurada con una discretización que permitió la representación del entramado de cauces en la planicie, así como la configuración del terraplén y los puentes de la conexión vial. La versatilidad de este esquema numérico permitió el desarrollo de elementos triangulares y cuadrangulares de un tamaño adecuado según la zona de interés, resultando un total del orden de 1.000.000, con lados cuyas longitudes varían entre 10 m (zonas más refinadas) y 1.000 m (zonas menos refinadas). El

área modelada (7000 km<sup>2</sup>) abarca el río Paraná y su extensa planicie de inundación desde las ciudades de San Justo, Saladero Cabal y Santa Elena (100 km hacia aguas arriba de las ciudades de Santa Fe y Paraná) hasta Coronada y Diamante (50 km hacia aguas abajo), cubriendo transversalmente todas las áreas pasibles de inundarse bajo una condición de crecida extrema. El límite aguas arriba se eligió con el objeto de poder simular el trasvase hacia el Oeste de flujos del río Paraná durante posibles eventos extremos, en donde las crecidas puedan superar la Ruta Provincial N°1. Para elección de su ubicación se tuvieron en cuenta imágenes de las crecidas de 1983 y 1992, en las cuales no se observó trasvase al norte de la Ruta Prov. 281. En la Figura 1 se muestran los límites del modelo general elaborado y en la Figura 2 se presenta un detalle de la malla.

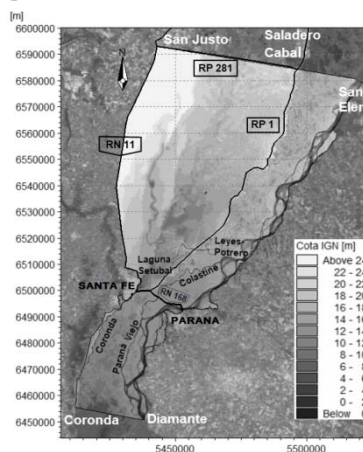


Figura 1.- Límites y cotas al Cero IGN de la malla general elaborada con MIKE 21 FM.

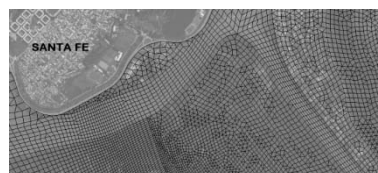


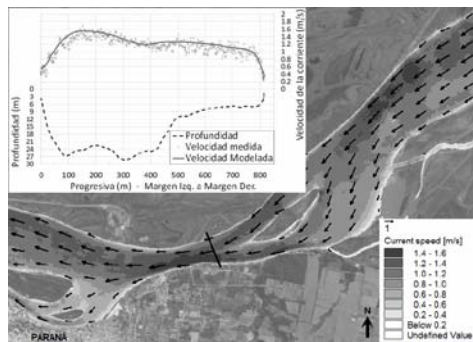
Figura 2.- Detalle de la malla de elementos no estructurada en el entorno de la ciudad de Santa Fe.

c. Calibración y validación del modelo matemático

Los trabajos de modelación matemática requieren de un proceso de calibración y validación, así como análisis de sensibilidad de variables y configuraciones numéricas. Estrictamente, el proceso de calibración implica el ajuste de parámetros característicos del modelo matemático de manera tal que los resultados obtenidos ofrezcan una representación aceptable de mediciones experimentales y/o de campo. Mientras que la validación de un modelo matemático permite evaluar su capacidad de predicción para una aplicación física dada, a través de la comparación de un conjunto de datos.

La calibración del modelo del cauce principal se realizó mediante la verificación de corrientes medidas con un relevamiento detallado con equipo ADCP. Para ello, se implementó una malla con valores del coeficiente de rugosidad de Manning, variables para las diferentes zonas del sistema (cauce principal, islas, albardones, ríos, arroyos, cursos menores, lagunas, planicie y zonas pobladas). Asimismo, se realizó un proceso de ajuste de la resolución de la malla en sectores

con mayor requerimiento de precisión numérica por los procesos físicos que se desarrollan. La Figura 3 muestra el campo de velocidades obtenido para las condiciones de calibración.



**Figura 3.-** Campo de velocidades para la situación de calibración, obtenido mediante MIKE 21 FM. En la sección transversal esquemática se contrastan los resultados del modelo con las mediciones.

El proceso de calibración y validación del modelo general se complementó mediante el análisis de la dinámica hídrica del sistema (comparación entre las líneas de flujo generadas por el modelo y aquellas obtenidas mediante el procesamiento de imágenes satelitales), y la verificación de registros de caudales y niveles disponibles en diferentes secciones y puntos de interés. Para este proceso se consideraron dos eventos de relevante importancia en la historia del río Paraná: la crecida extraordinaria de larga duración del período 1982-1983, y la crecida extraordinaria de corta duración del año 1992.

En cuanto a cursos secundarios que aportan a la zona de modelación, se realizó una evaluación hidrológica para los arroyos Saladillos, El toba y Aguiar, por el lado de Santa Fe; mientras que se consideraron al Feliciano y Las Conchas por el sector de Entre Ríos. Se realizó una evaluación especial para el Salado que, si bien presenta relativa importancia para recurrencias altas, no afectaría significativamente la traza de conexión que se encuentre aguas arriba del mismo debido a que ingresa por margen derecha del sistema, y debido a la importancia relativa que tiene el caudal de crecida del Paraná. Esta hipótesis fue luego confirmada por diferentes evaluaciones con el modelo.

## Resultados

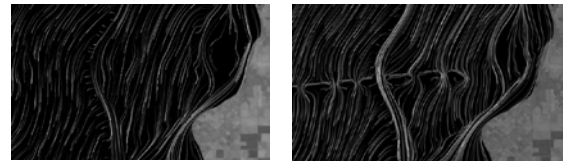
El estudio desarrollado tuvo una primera etapa de análisis comparativo de trazas, mediante una modelización realizada con el modelo RMA2 (USACE-WES) y, una vez decidida la traza a ser adoptada por parte del Comitente, se aplicó el modelo MIKE 21 FM para la modelización definitiva de la misma.

Mediante la modelación matemática correspondiente a la crecida milenaria de diseño se analizó la cantidad necesaria de puentes, su distribución y sus respectivos gálibos horizontales, con el objeto de cumplir el remanso de diseño y, a su vez, minimizar los impactos generados sobre el patrón natural del escurrimiento, más allá de un efecto localizado en el entorno de las estructuras.

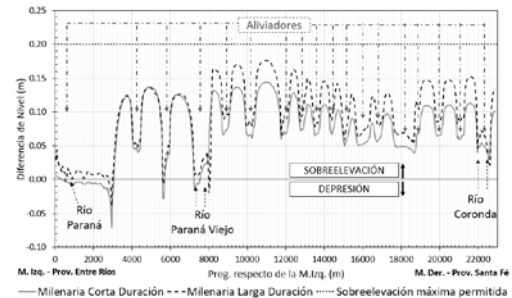
En la Figura 4 se presentan las líneas de corriente obtenidas en la primera etapa con el RMA2 para el escenario actual sin obra, y otro para el futuro sistema con una conexión vial. En la Figura 5 se muestra la sobreelevación obtenida en el análisis de distribución de puentes a lo largo de una traza evaluada.

En las diferentes evaluaciones realizadas, las diferencias de nivel máximas obtenidas fueron de hasta 18 cm, valores menores al máximo estipulado para la obra. En correspondencia con el puente principal sobre el río Paraná y los puentes sobre otros cursos, las sobreelevaciones resultaron aún menores. Cabe mencionar que este proceso requirió una permanente interacción con el resto del grupo de trabajo del proyecto, en el cual se consideraron aspectos morfológicos, geotécnicos y viales, a fin

de ajustar de manera progresiva las posiciones y dimensiones de los diferentes aliviadores y terraplenes.



**Figura 4.-** Líneas de flujo localizadas en el entorno de una de las trazas analizadas de la conexión vial. IZQ: escenario actual sin obras de conexión. DER: escenario futuro con una conexión vial.



**Figura 5.-** Sobreelevación alcanzada aguas arriba de una de las trazas estudiadas para las crecidas milenarias de corta y larga duración.

## Conclusiones

La utilización de herramientas de modelación matemática permite determinar cuantitativamente el impacto hidráulico de una obra de conexión vial a través de la planicie de inundación de un río. Bajo el criterio de impacto hidráulico aceptable donde los puentes deben generar únicamente una contracción local de las líneas de flujo y que la sobreelevación producida por la Conexión Vial no supere un valor crítico, se pueden analizar alternativas para minimizar el impacto de la obra y generar posteriormente una optimización de la traza seleccionada.

MIKE 21 FM ha demostrado ser una poderosa herramienta de simulación matemática para describir el comportamiento total del flujo del complejo sistema del río Paraná y su valle de inundación junto con la obra de conexión interpuesta, resolviendo con procesos de “mojado” y “secado” de los elementos de la malla la inundación y posterior retroceso de las aguas durante el desarrollo de una crecida. Asimismo, un modelo a gran escala requiere la aplicación de un esquema numérico que así lo permita, sin limitaciones de la cantidad de elementos y ni de la discretización de la malla adoptada.

Finalmente, para obtener aceptables tiempos de simulación en un estudio de estas características, resultó fundamental la implementación de un hardware de última generación junto con la capacidad del software para utilizar la placa de video en modo GPU para realizar los procesos de cómputo más intensivos asociados a los cálculos hidrodinámicos, paralelizándolos con los cálculos adicionales que se realizan en la CPU.

## Referencias

- Paoli, C. y Schreider, M.** (2000). 'El Río Paraná en su tramo medio. Una contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura'. *Centro de Publicaciones de la UNL. Santa Fe, Argentina.*
- Consortio COINRE (INECO, ALATEC, Serman y Asociados, PSI)** (2005). "Proyecto de Reconversión del Puerto de Santa Fe". *Estudio de Alternativas de Ubicación del Puerto de Santa Fe. Gobierno de la Provincia de Santa Fe-Ministerio de Haciendas y Finanzas. Subsecretaría de Proyectos de Inversión y Financiamiento Externo.*
- DHI** (2012). MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation. Horsesholme, Denmark: DHI Water & Environment, Inc. Scientific Documentation, 52p.