

ESTUDIO DEL DESBORDE DEL RÍO SALADO SOBRE LA CIUDAD DE SANTA FE, ARGENTINA, ABRIL 2003

Romina C. Giampieri¹, Leticia B. Rodríguez², y Carlos A. Vionnet³

Resumen: En la última semana de abril de 2003, se registraron precipitaciones de hasta 400 mm en algunas regiones del centro y norte de la cuenca inferior del río Salado (Santa Fe, Argentina). Este episodio extremo se produjo sobre una cuenca previamente saturada por lluvias de gran intensidad, acaecidas en los últimos meses de 2002 y principios de 2003. En la madrugada del 29 de abril de 2003, el agua ingresó masiva e intempestivamente a la ciudad de Santa Fe por el sector noroeste, a través de una brecha de unos 150m producida en el extremo sin finalizar de un terraplén de protección contra crecidas, lo que causó la rápida inundación de barrios bajos de la ciudad. En las primeras 24-48hs, se estima que unos 110 000 pobladores fueron desplazados abruptamente de sus hogares, con el lamentable saldo oficial de 23 personas fallecidas y 30 desaparecidas. Esta comunicación presenta los resultados de una reconstrucción numérica del evento –y por ende aproximada–, realizada con un código de elementos finitos basado en el conocido modelo matemático de ondas largas. Los resultados reproducen los efectos más dramáticos del colapso de la estructura de protección, a la vez que ilustra cómo ciertos errores elementales, cometidos en la etapa de diseño de las estructuras de protección contra crecidas, eventualmente potencian las consecuencias de aquello que se quiere evitar.

STUDY OF THE SALADO RIVER FLOOD AND ITS CONSEQUENCES OVER THE CITY OF SANTA FE, ARGENTINA, APRIL 2003

Abstract: During the last week of April 2003, between 300 and 400 mm of rain fell over in the central and northern areas of the Lower Basin of the Salado River in the province of Santa Fe, Argentina. At that time, the basin was already saturated by heavy rainfall that precipitated from October 2002 to the first quarter of 2003. The night of April 29, 2003, the water rushed suddenly into the city of Santa Fe through a 150m gap opened on the northwest end of an unfinished flood-control levee, causing the rapid flooding of lowland neighborhoods without any warning. In the first 24 to 48 hours, 120000 people were displaced from their homes with a heavy toll, 24 people died and 30 were declared missing. This paper presents the results of a numerical simulation of the event in urban and suburban areas of the city of Santa Fe. The simulations were performed with a finite element code based on the long wave approximation model or shallow water equations. The numerical results reproduced with adequate accuracy the flood stages within the city limits during the flood peak, capturing the most striking features of the collapse of the flood-control structure. At the same time, the results show how some elementary errors made in the design of the flood-control structures, eventually worsen the effects of what they were supposed to avoid in the first place.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Santa Fe fue fundada en 1573 por el conquistador español Juan de Garay, sobre la margen derecha de la planicie aluvial del río Paraná, a la vera del río San Javier. A mediados del siglo XVII, la administración local de la

¹ Estudiante de postgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - FICH, Universidad Nacional del Litoral - UNL, Santa Fe, Argentina

² Profesor, FICH, UNL, Bv. Pellegrini 2750, Santa Fe, Argentina

³ Profesor, FICH, UNL, Bv. Pellegrini 2750, Santa Fe, e Investigador Adjunto del CONICET, Argentina

ciudad decidió su traslado unos 80Km hacia el sur, en la zona de su actual emplazamiento, próxima a la confluencia del río Salado con el sistema aluvial del río Paraná (Figura 1). Desde entonces, la ciudad en su crecimiento urbano fue ocupando paulatinamente parte de la planicie aluvial del río Paraná, hacia el Este, y parte de la planicie del río Salado, hacia el Oeste.

Con el correr del tiempo, la ciudad de Santa Fe experimentó crecidas cíclicas, algunas de ellas de características excepcionales, según fuese la percepción ocasional de los daños materiales y personales sufridos por la población. Si bien la ciudad mantiene un registro adecuado de las crecidas más importantes del siglo XX, principalmente las del río Paraná, ninguna de ellas tuvo los efectos devastadores, tanto en pérdida de valores materiales como de vidas humanas, provocados por el desborde del río Salado a fines de abril de 2003.

El río Salado nace en el noroeste Argentino, con un régimen típicamente nivo-pluvial. Sin embargo, la contribución de las cuencas alta y media al caudal del río son, por lo general, poco significativas en comparación con los aportes recibidos en la cuenca inferior. En su tramo inferior, el río Salado se ubica en la zona centro-noroeste de la Provincia de Santa Fe (Figura 1), y escurre por un cauce de escasa capacidad de conducción con dirección NO-SE. En este tramo, el caudal del río se compone principalmente por la descarga de los acuíferos superficiales en períodos secos, y por el exceso de precipitaciones en períodos húmedos. A esta última componente de escorrentía superficial, se suma el aporte del río Calchaquí que transporta el excedente hídrico de la zona de los Bajos Submeridionales del norte santafesino. Aguas abajo de la confluencia con el río Calchaquí, el río Salado escurre con dirección N-S recibiendo el aporte de los A° Las Conchas, A° San Antonio, A° Pantanoso y A° Cululú en su camino hasta su desembocadura en el sistema aluvial del río Paraná, entre las ciudades de Santa Tomé y Santa Fe (Figura 1).

La hidrología del río Salado es muy variable, habiéndose registrado dos picos máximos del orden de los 2500m³/s durante las crecidas de 1973 y 1998 en el período 1952-2000. En dicho lapso, se registró un caudal mínimo diario de 7m³/s en enero de 1995, mientras que el módulo orilla los 130m³/s según registros históricos obtenidos a la altura de la Ruta Provincial No 70 (RP70), a unos 25km al noroeste de la ciudad de Santa Fe (Figura 2). Durante la crecida del río Salado de 1973, la acción erosiva de la corriente produjo la socavación, y el consecuente colapso del puente de la autopista Santa Fe-Rosario (Figura 3). El puente tenía una luz de 157m, salvando únicamente el cauce principal del río, donde el ancho de la planicie aluvial es de unos 2000m, lo que representa un coeficiente de contracción del 8%. A pesar del colapso de la estructura vial, el puente fue reconstruido en el mismo sitio y con la misma luz, aunque con un pilotaje mucho más profundo.

En años subsiguientes, la ciudad experimentó los embates de crecidas excepcionales del río Paraná (1982/83, 1992 y 1998), siendo la de 1983 una de las más devastadoras del siglo XX para la actividad socio-económica local (Ceirano *et al.*, 2000). Con posterioridad a la crecida del Paraná en 1992, y en concordancia con el gobierno de la Provincia, la ciudad de Santa Fe decide construir una serie de estructuras de protección tanto en la planicie aluvial del río Salado, como del lado de la planicie aluvial del río Paraná. Así, a lo largo del río Salado sobre el oeste de la ciudad, y con financiación del gobierno de Kuwait, se construyó el terraplén Irigoyen que corre de norte a sur unos 7km con un sobre-elevación de 5.2m, en promedio, con respecto a la planicie aluvial del río. La cota de coronamiento del terraplén, referida al *datum* del Instituto Geográfico Militar (IGM) de la República Argentina, es de 17.4m. Dos de las tres etapas proyectadas para la construcción de dicho terraplén fueron finalizadas. La tercera etapa, que contemplaba la continuación del terraplén hasta conformar un anillo de protección hacia el norte de la ciudad, nunca se materializó.

Al error de diseño de reconstruir el puente de la autopista con la misma luz, se sumó el hecho de que la traza adoptada para el nuevo terraplén Irigoyen se ubicó al oeste de un terraplén pre-existente, construido por la ciudad a lo largo de los años con una cota de coronamiento menor. En consecuencia, la nueva traza del terraplén tuvo el doble efecto adverso de disminuir la capacidad de conducción del río para transportar su masa de agua en épocas de creciente, y de favorecer una rápida y no planificada urbanización de zonas bajas, que naturalmente pertenecen al río. En rigor, en los últimos 20km de su recorrido, las intervenciones antrópicas sobre el sistema aluvial del Salado tienen distintos orígenes y fechas de construcción. En este tramo, donde no hay aportes laterales, el curso de agua es atravesado por dos conexiones viales (Ruta Nacional 11 –RN11– y autopista Santa Fe-Rosario), y tres conexiones férreas (Figura 3), sin contar un proyecto reciente para enlazar las ciudades de Santo Tomé y Santa Fe con un nuevo puente.

El régimen pluviométrico medio anual de la Provincia de Santa Fe registra un leve gradiente en la dirección Este-Oeste, disminuyendo de 1100mm a unos 800mm para el período 1941/70, y de 1200mm a 900mm para el período 1971/2000 (ProcIFE, 2003). Precipitaciones extremadamente intensas sobre el centro-norte de la Provincia saturaron la cuenca baja del río Salado durante los meses de octubre de 2002 a marzo de 2003, llegándose a valores puntuales de 1200mm de precipitación acumulada. Entre el 22 y 29 de abril de 2003, se produjeron intensas precipitaciones en la cuenca inferior, superando en algunas localidades los 400mm (Figura 4). En pocos días, el río desbordó el cauce

ocupando su planicie de inundación con inusual intensidad, destruyendo puentes y cortando caminos de la estructura vial provincial y nacional, aislando en consecuencia algunas localidades del centro-norte santafesino en su corrida hasta su desembocadura en las inmediaciones de la ciudad de Santa Fe. En las primeras horas de la madrugada del 29 de abril, el incesante aumento del nivel del río provocó el ingreso masivo de agua a la ciudad por el sector noroeste, a través de una brecha de unos 150m formada rápidamente en el extremo norte –sin terminar– del terraplén Irigoyen (Ferreira, 2003). En pocas horas, la incontenible masa de agua inundó barrios completos, cubriéndolos con alturas de agua que fueron desde los 2m hasta más de 4m, según fuese la topografía de los barrios afectados. La Figura 5 muestra claramente la extensión de la inundación en el oeste de la ciudad. En un cierto momento, casi un tercio de la urbe estuvo bajo agua, incluyendo desde barrios periféricos hasta barrios céntricos (Figuras 5, 6 ,7 y 8). Por entonces, el caudal pico a través del puente de la Autopista Santa Fe-Rosario fue estimado en unos 3600 m³/s. El total de las pérdidas económicas producidas por efectos directos e indirectos asociados a la crecida, fue calculado por diversos organismos estatales y privados en más de 1200 millones de dólares (FICH, 2003), sin contemplar el sufrimiento emocional de los directamente afectados.



Figura 1: Cuenca inferior del río Salado en la Provincia de Santa Fe, República Argentina.



Figura 2: Ciudad de Santa Fe limitada al Este por el sistema aluvial del río Paraná, y al Oeste por el río Salado.

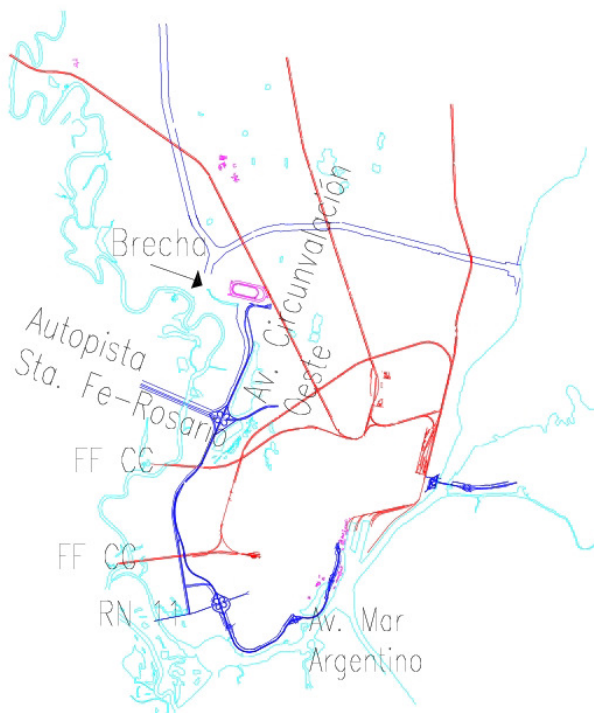


Figura 3: Mapa de la ciudad de Santa Fe, donde se aprecia la traza del terraplén Irigoyen, y demás conexiones viales y férreas que atraviesan la planicie del río Salado.

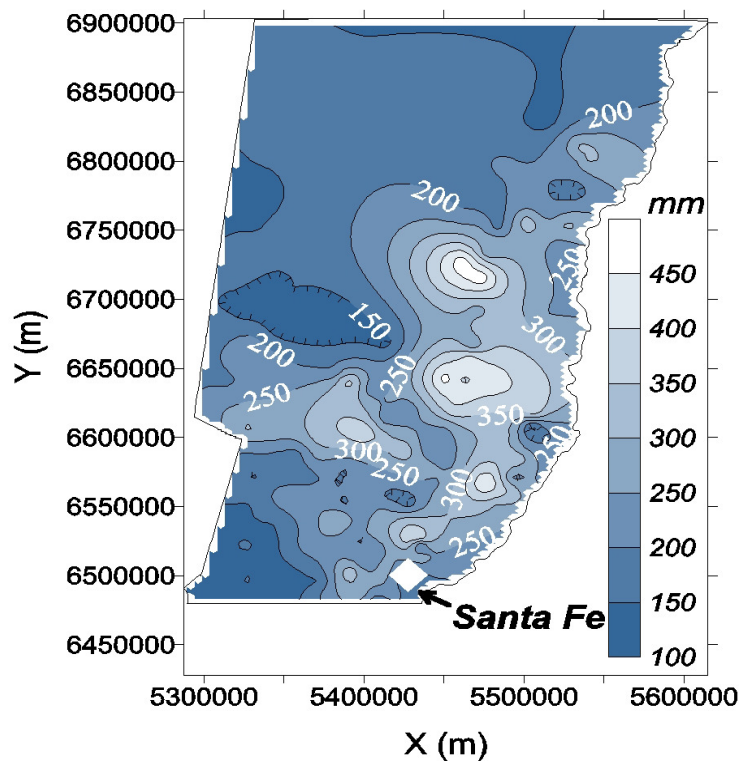


Figura 4: Mapa de isoyetas de la tormenta que afectó la cuenca inferior del río Salado en la semana del 22 al 29 de abril de 2003.



Figura 5: Vista aérea de la ciudad de Santa Fe, varios días después del arribo del pico de la crecida, el que se produjo a las 10hs del 30 de abril de 2003.

Este trabajo presenta una reconstrucción numérica, y como tal aproximada, del evento padecido por la ciudad de Santa Fe en las primeras 26hs que siguieron a la rotura del terraplén Irigoyen. El trabajo se orienta a reproducir la

penetración de la onda de crecida en la ciudad, recreando en tiempo y forma el ascenso del nivel de agua a través de comparaciones entre valores simulados y medidos de cota de superficie libre a un lado y otro del terraplén. En definitiva, el objetivo último de la simulación es evidenciar los errores cometidos en el diseño del conjunto de obras civiles existentes en la zona de desastre, errores que derivaron en una de las peores catástrofes ambientales de la República Argentina de las últimas décadas.

Dado que la simulación numérica propuesta se basa en la conocida aproximación de ondas largas, o ecuaciones de aguas poco profundas, una porción considerable del trabajo se orientó inicialmente a reconstruir la topografía del sistema conformado por el cauce principal del río Salado y su planicie aluvial. En la sección siguiente se describen las hipótesis que sustentan el modelo matemático adoptado, así como la metodología utilizada para su solución numérica aproximada. Luego, en la tercera sección se analizan los resultados computacionales obtenidos, y su relación con los escasos datos disponibles del evento. Finalmente, se discuten las conclusiones del trabajo.

HIPÓTESIS DE CÁLCULO

El cálculo computacional realizado en esta comunicación técnica se basa en una serie de hipótesis que es conveniente enumerar, pues establecen claramente los límites de validez de los resultados, a saber: *i*) se asume que el comportamiento del escurrimiento a superficie libre del río Salado puede ser adecuadamente descrito por el modelo matemático bidimensional –2D– de aguas poco profundas, basado en la aproximación de ondas largas (Vreugdenhil, 1998), *ii*) se asume que la conductancia hidráulica del cauce principal del río Salado es despreciable en comparación con la capacidad de conducción de la planicie aluvial del río en situación de desborde. Es decir, si en situación de aguas altas, Q_p representa el flujo transportado sobre la planicie aluvial, y Q_c la masa de agua que fluye por unidad de tiempo en el cauce principal, se tiene que para la presente simulación se cumple $Q_c / Q_p \ll 1$, *iii*) se asume que el caudal pico alcanzado durante la crecida, del orden de los 3600 m³/s a la altura del puente sobre la autopista Santa Fe-Rosario, se mantiene constante durante el tiempo adoptado para la simulación, *iv*) si bien la dimensión de la brecha fue creciendo con el correr de las horas por la acción erosiva de las aguas, se asume que su sección transversal permaneció aproximadamente constante, *v*) se asume, además, que el colapso se produjo en forma súbita, *vi*) se ignora el ingreso de agua en lámina, verificado al norte de la brecha formada en el terraplén (Ferreira, 2003). Es decir, sólo se considera el ingreso abrupto de agua a través de la brecha, *vii*) por último, se asume que los coeficientes de resistencia hidráulica y de disipación turbulenta permanecen constantes en todo el dominio computacional, y para todo tiempo $t > 0$, el inicio de la simulación.

Más allá del error relativo que puede adicionar a un cálculo que ya de por sí presenta incertidumbres inherentes al modelo matemático y a sus datos de entrada (Tassi *et al.*, 2000), este conjunto de hipótesis permite minimizar el procesamiento de información básica que sería deseable disponer si el objetivo del trabajo fuese lograr una reproducción detallada de lo ocurrido. Así, sobre la base de la hipótesis $Q_c / Q_p \ll 1$, se procesó únicamente la información topográfica de la planicie aluvial existente en cartas del IGM, no así la del cauce principal propiamente dicho, cuyas secciones transversales fueron recreadas sobre la base de información preexistente aguas arriba de la zona de interés (Trento, 1998), ante la inexistencia de información en la zona de estudio. Esta carencia de datos fue particularmente crítica en la zona del puente de la autopista Santa Fe-Rosario, donde no fue posible disponer de batimetrías actualizadas a fin de generar una interpolación adecuada de la topografía del cauce principal. Es decir, a pesar del estado público que tenía la escasa información disponible, ciertos datos recolectados durante el evento tuvieron carácter reservado ante las investigaciones judiciales en curso, al menos durante la ejecución del presente trabajo.

No obstante, es posible estimar la razonabilidad de la hipótesis $Q_c / Q_p \ll 1$ si se asume que Q_c fue del orden de los 600 m³/s (unos 470 m³/s por encima del módulo). Si ahora se adopta un $Q_p \sim 3000$ m³/s, resultado de descontar 600 m³/s de los 3600 m³/s que fluían a través del puente de la autopista durante el arribo del pico de la crecida, se tendría una razón $Q_c / Q_p \sim 0.2$. Este valor puede tomarse como una medida aproximada del error cometido en el cálculo, dado que es sabido que la topografía representa un mecanismo de primer orden en las ecuaciones de aguas poco profundas (Vreugdenhil, 1998). En otras palabras, es de esperar un error del orden del 20% en el cálculo de la distribución lateral de caudales, error que a su vez puede influenciar el cálculo de distribución de altura, o cota, de la superficie libre. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, el cálculo computacional del flujo a superficie libre realizado, refleja adecuadamente lo ocurrido en los días 29-30 de abril de 2003 en el sector oeste de la ciudad de Santa Fe, como se demuestra en las próximas secciones.



Figura 6: Hospital de Niños bajo las aguas, inaugurado pocos años antes de la presente catástrofe, y a un costo superior a los 10 millones de dólares.



Figura 7: El centro de la ciudad de Santa Fe.



Figura 8: Gente evacuándose ante el inesperado avance de las aguas.

El caudal de referencia de $3600\text{m}^3/\text{s}$ resulta de restar unos $400\text{m}^3/\text{s}$ al caudal de $4000\text{m}^3/\text{s}$ aforado en la sección del puente sobre la RP70 por la empresa EVARSA, en los días del arribo del pico de la crecida. En la ocasión, EVARSA utilizó un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), con lo cual se considera que el dato es sumamente confiable. Los $400\text{m}^3/\text{s}$ de pérdida reflejan la estimación realizada por técnicos de la Dirección Provincial de Hidráulica, y que representa el caudal derivado por el norte de la ciudad, cuando los dos sistemas fluviales que limitan la ciudad se unieron (Figura 2). Es decir, en el transcurso de unos pocos días, durante el arribo del pico de la crecida, la ciudad de Santa Fe estuvo totalmente rodeada por las aguas.

MODELO MATEMÁTICO

Las leyes de conservación de la masa de agua y de la cantidad de movimiento en la horizontal resultan de integrar las ecuaciones 3D de continuidad y de Navier-Stokes, previamente promediadas sobre la turbulencia, sobre todo el espesor de la capa líquida y bajo la hipótesis de que el flujo es del tipo de capa límite (aproximación de ondas largas). Las ecuaciones resultantes, conocidas como ecuaciones de aguas poco profundas, pueden escribirse en forma compacta, y referidas a un sistema cartesiano, como

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{H} \quad (1)$$

donde los vectores, $\mathbf{U}$, $\mathbf{F}$, y $\mathbf{G}$ se expresan en términos de las variables primitivas u , v , y h en la forma

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} uh \\ (uh)^2 / h + gh^2 / 2 - 2hv_t \partial u / \partial x \\ uvh - hv_t (\partial u / \partial y + \partial v / \partial x) \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ uvh - hv_t (\partial u / \partial y + \partial v / \partial x) \\ (vh)^2 / h + gh^2 / 2 - 2hv_t \partial v / \partial y \end{bmatrix} \quad (2)$$

El término fuente $\mathbf{H}$ está dado por la expresión

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g\partial\eta/\partial x - \tau_{Bx} / \rho \\ -g\partial\eta/\partial y - \tau_{By} / \rho \end{bmatrix} \quad (3)$$

Aquí, $\vec{u} = (u, v)$ representan las componentes de la velocidad del agua en las direcciones cartesianas $\vec{x} = (x, y)$, respectivamente, debidamente promediadas en la vertical, t el tiempo, h la profundidad local del agua, g la aceleración de la gravedad, ρ la densidad del agua, ν_t el coeficiente de viscosidad turbulenta, η la cota de elevación del lecho del cauce, y $\vec{\tau}_B = (\tau_{Bx}, \tau_{By})$ las componentes de la tensión de corte ejercida por el lecho. El sistema de ecuaciones (1) requiere de una relación de cierre para su completa definición. En este caso, se asume que la resistencia hidráulica del lecho está correctamente representada por la conocida dependencia cuadrática con la velocidad, expresión válida para flujos de capa límite turbulentos

$$\tau_{Bx} = C_F \rho |\vec{u}| u, \quad \tau_{By} = C_F \rho |\vec{u}| v, \quad (4)$$

donde el coeficiente de fricción C_F usualmente se evalúa recurriendo a la conocida relación empírica de Manning

$$C_F = gn^2 h^{-1/3}, \quad (5)$$

siendo n el coeficiente de rugosidad de Manning.

Solución numérica

El cálculo fue realizado con el código de elementos finitos producido por EDF de Francia (Telemac, 1998), mientras que la visualización de resultados se hizo con los post-procesadores RUBENS (Telemac, 1998) y GID (CIMNE, 1999). El código Telemac-2D emplea un esquema de paso fraccionario para la resolución de la forma no conservativa del sistema de ecuaciones (1), donde los términos advectivos son resueltos en un primer paso mediante el método de las características (MOC, por sus siglas en inglés), previamente separados de los términos fuentes y de difusión, los que son resueltos a continuación en un segundo paso. Este procedimiento se logra sobre la base de una aproximación funcional de elementos finitos triangulares lineales, de igual orden para los campos de velocidad y profundidad. Además, Telemac-2D utiliza un método frontal de solución, elemento por elemento, logrando un significativo ahorro en memoria de cálculo. En este caso, las matrices resultantes de linealizar el proceso en cada paso de tiempo, se almacenan en su forma “elemental” sin proceder al ensamblado global, como es típico en el método de los elementos finitos.

En mayor detalle, el procedimiento de cálculo adoptado por Telemac-2D para resolver la forma no conservativa del sistema (1) puede esquematizarse de la siguiente manera, tomando la ecuación de conservación de la masa como ejemplo:

1er paso: Los términos advectivos se resuelven con el MOC, es decir, si la información es “transportada” a lo largo de las curvas características del problema, se asume inicialmente que los términos convectivos se anulan trivialmente. Con lo cual el problema resultante es de simple difusión, para el que existen procedimientos de resolución óptimos. Por tanto, en un primer paso, los términos convectivos devienen

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} = 0 & \rightarrow \frac{h_* - h^n}{\Delta t} + \vec{u}^n \cdot \nabla h^n = 0 \\ \frac{du}{dt} = 0 & \rightarrow \frac{\bar{u}_* - \bar{u}^n}{\Delta t} + \vec{u}^n \cdot \nabla \bar{u}^n = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

2do paso: Los términos remanentes se avanzan acorde a la información generada a lo largo de las curvas características, obtenida en el primer paso. En consecuencia, la ecuación de conservación de la masa se resuelve como sigue

$$\frac{dh}{dt} + h \nabla \cdot \vec{u} = 0 \rightarrow \frac{h^{n+1} - h_*}{\Delta t} + (h \nabla \cdot \vec{u}) = 0 \quad (7)$$

Aquí, el término no lineal es linealizado mediante una relajación, lo cual hace innecesario la utilización de un método iterativo del tipo de Newton-Raphson para su solución. En este caso,

$$(h\nabla \cdot \vec{u}) = \tilde{h} \nabla \cdot (\theta \vec{u}^{n+1} + (1-\theta) \vec{u}^n) , \quad 0 \leq \theta \leq 1 , \quad (8)$$

donde θ es un coeficiente de ponderación, y los supraíndices n y $n+1$ indican el nivel temporal de la solución, esto es, la solución al tiempo $t_n = n\Delta t$ se alcanza luego de avanzar la solución n veces, comenzando con la condición inicial del problema. En la ec.(8), la variable $\tilde{h}$ se puede adoptar en forma explícita o implícita, es decir

$$\tilde{h} = \begin{cases} h^n , & \text{sin iteración} \\ h^{n+1} , & \text{con iteración} \end{cases} \quad (9)$$

Un esquema de avance similar se aplica para resolver la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento. El sistema de ecuaciones resultante se debilita acorde al Método de los Residuos Ponderados, utilizando la aproximación funcional lineal ya mencionada.

Finalmente, el sistema de ecuaciones lineales resultantes se resuelve con el método GMRES (Generalised Minimum RESidual, Reddy y Gartling, 2001). Un detalle del procedimiento de solución implementado en el código Telemac-2D, así como una completa descripción de la formulación débil de las ecuaciones de gobierno puede consultarse en el trabajo de Hervouet y Van Laren (1996). A su vez, el código incluye un algoritmo específico de secado y mojado de celdas, lo que permite una adecuada representación de fenómenos de propagación de ondas de frente abrupto en un lecho inicialmente seco.

RESULTADOS

El dominio computacional adoptado para la simulación ocupa un área de unos 88km², cubriendo aproximadamente unos 25Km de recorrido del río en dirección N-S, con un ancho promedio de planicie de 3km. El área modelada abarca desde unos 3km al norte de la RP70, hasta la confluencia con el sistema aluvial del río Paraná. El pre-procesamiento de la información básica fue ejecutado con una batería de programas comerciales disponible en el Centro de Estudios Hidro-Ambientales de la FICH, desde el IDL+ENVI (RSI, 2003), hasta la interfase SMS desarrollada por la Brigham Young University (SMS, 2000).

En la Figura 9 se exhibe una perspectiva de la topografía de la zona recreada para la simulación, donde se aprecia la meandrosidad del cauce del río Salado, el estrangulamiento de la planicie provocada por la autopista Santa Fe-Rosario, y la traza del terraplén Irigoyen destinado a “proteger” una amplia zona significativamente baja del margen oeste de la ciudad, que antiguamente constituía los bañados del río Salado en su margen izquierda. En la Figura 10 se muestra el dominio computacional, y la malla de elementos finitos finalmente utilizada para el cálculo. Al efecto, se ejecutaron tres cálculos completos, los que incluyeron dos etapas: estado estacionario y estado transitorio. En total, se utilizaron tres mallas no estructuradas de diferente densidad cada una (Tabla 1). La malla más densa se construyó únicamente con el propósito de definir la topografía de la zona bajo estudio, información que luego fue interpolada a las sucesivas mallas empleadas en el cálculo hidrodinámico. Puesto que el algoritmo de secado / mojado de celdas del Telemac-2D alarga considerablemente el tiempo de cómputo para un problema de estas características, la malla 2 se utilizó para determinar, en una primera aproximación, la extensión del área inundada. Luego, una vez delimitado el dominio computacional, se optó por refinar las mallas en aquellos lugares donde el cálculo mostraba la formación de grandes vórtices de eje vertical, o bien donde existían gradientes topográficos apreciables. Por tanto, las mallas 3 y 4 presentan un mayor refinamiento a la altura del puente de la autopista Santa Fe-Rosario, en la vecindad de la RP70, y en la brecha del terraplén al noroeste de la ciudad.

Las condiciones de contorno fueron impuestas aguas arriba y aguas abajo del dominio computacional. Aguas arriba se impuso una condición de caudal constante de 3600m³/s, uniformemente distribuido en la sección de ingreso, hasta que el cálculo convergió a un estado estacionario para una precisión del resolutor de ecuaciones de 10⁻⁷. La condición de contorno aguas abajo fue definida como un nivel constante de la superficie libre, de 14.2m IGM a lo largo de la sección transversal de salida, a la altura de la confluencia del Salado con el río Paraná. Este dato se basó en información provista por dos hidrómetros ubicados en la vecindad de la sección. En el resto del dominio computacional, se utilizó la condición de borde natural del método de elementos finitos de libre deslizamiento del fluido.

Los cálculos de los estados estacionario y transitorio producidos con las mallas 3 y 4 (Tabla 1) fueron consistentes, obteniéndose resultados que pueden considerarse independientes de la malla utilizada. Por otra parte, es sabido que

para una simulación 2D como la presente, la rugosidad de la planicie puede ser unas tres veces la rugosidad del cauce (Vionnet *et al.*, 2004), dependiendo del estado de la vegetación existente en el valle aluvial. Sin embargo, el agua que ingresó abruptamente a la ciudad se propagó inicialmente a lo largo de la Avenida de Circunvalación Oeste (Figura 3), paralela al terraplén Irigoyen, y por tanto, con una baja resistencia hidráulica. Por lo demás, más allá de las heterogeneidades que cabría esperar en los valores de resistencia hidráulica a medida que la onda de crecida penetraba zonas urbanizadas, en el presente estudio se utilizó un valor uniformemente distribuido del coeficiente de fricción, como ya se mencionó en las hipótesis que sustentan el cálculo. No obstante, se realizaron dos corridas para determinar la sensibilidad de los resultados al cambio de los valores del parámetro de rugosidad de Manning ($n = 0.025$ y 0.030). En este caso, la variación de la superficie libre entre ambas corridas fue del orden de 0.20m , aguas arriba del estrechamiento producido por el puente de la autopista. Por tanto, puesto que antes de su colapso el desnivel inicial a uno y otro lado del terraplén Irigoyen, era del orden de los 3m , se tiene que una incertidumbre del 20% en la especificación del coeficiente de rugosidad induce un error relativo en el desnivel, Δh , del orden del 7% . Con lo cual puede concluirse que el modelo produce resultados robustos, tanto con respecto a la malla de cálculo finalmente utilizada –malla 4– como a los valores de rugosidad especificados. En otras palabras, la incertidumbre en los resultados del modelo no es mayor que la incertidumbre presente en los parámetros de entrada. Mayores detalles sobre el análisis de sensibilidad de los resultados, utilizando tanto Telemac-2D como cualquier otro resolutor de las ecuaciones de aguas poco profundas, puede consultarse en Tassi *et al.* (2000) y Vionnet *et al.* (2004), entre otros muchos trabajos relacionados al tema.

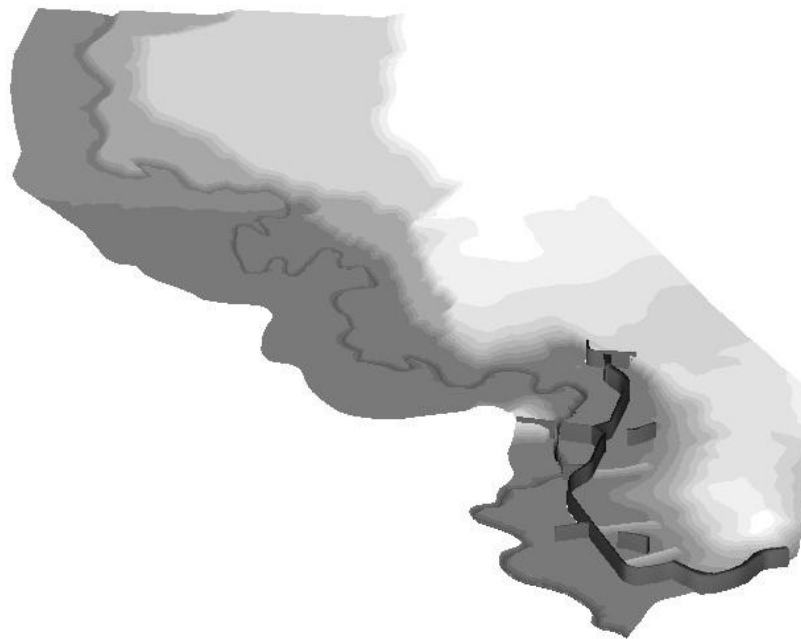


Figura 9. Topografía recreada de la zona de estudio.

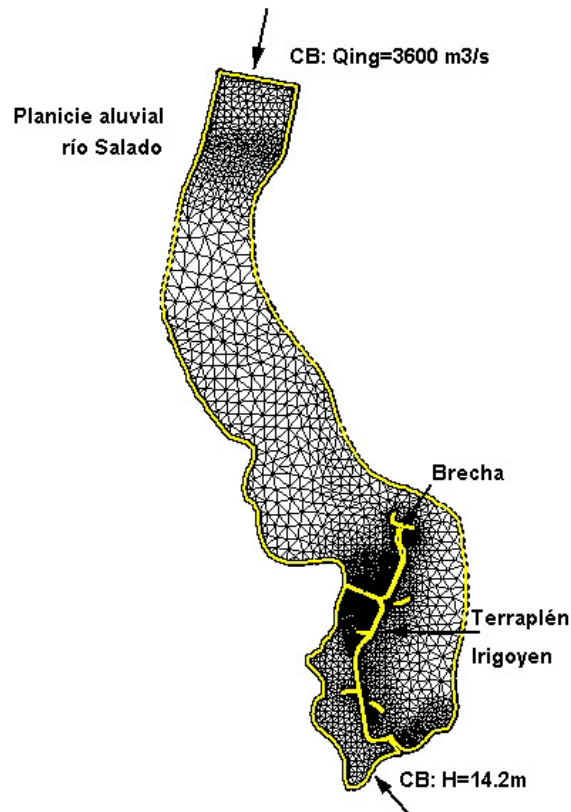


Figura 10. Dominio computacional y malla de elementos finitos finalmente adoptada para el cálculo.

Tabla 1: Distintas mallas utilizadas en el cálculo

Malla	nodos	elementos	para el cálculo de:
1	5512	9848	topografía
2	2075	3744	hidrodinámica
3	4190	7765	hidrodinámica
4	4464	8289	hidrodinámica

El objetivo de la simulación del estado estacionario, consistente con la hipótesis (iii), fue la de obtener valores iniciales de la profundidad de agua y del campo de velocidades para el escenario transitorio. Para esta simulación estacionaria no fue permitida la entrada de agua a la ciudad. Una proyección 3D de los resultados de esta simulación se muestra en la Figura 11, donde se observa una notable diferencia entre aguas arriba y aguas abajo de la contracción impuesta por el puente de la Autopista Santa Fe-Rosario. La diferencia simulada fue de 1.7m y 1.9m, dependiendo de la rugosidad utilizada, $n = 0.025$ y 0.030 , respectivamente, mientras que el desnivel observado se estimó en 1.2m. Hay dos razones plausibles para explicar esta discrepancia: 1) la hipótesis $Q_c / Q_p \ll 1$ es claramente violada en la zona de la contracción, por lo que el error presente en la representación topográfica del cauce principal tiene el efecto de disminuir la conductancia hidráulica de la sección transversal. Por ende, se requiere un desnivel mayor para un mismo gasto; 2) el modelo numérico es más “lento” que el prototipo, efecto también atribuible a una incorrecta representación de la pendiente global del lecho, en particular en la zona de aguas arriba del dominio computacional, donde la información de base era escasa en comparación con la disponible en la vecindad de la ciudad. Esto podría traducirse en un mayor almacenamiento de energía potencial en detrimento de energía cinética. No obstante esta discrepancia, se aceptó que el estado estacionario obtenido con la menor rugosidad, representaba razonablemente bien las condiciones

hidráulicas del escurrimiento instantes previos a la rotura del terraplén. Además, el desnivel calculado entre aguas arriba y abajo del puente de la autopista disminuye cuando se considera la condición de ingreso de agua a través la brecha, aproximándose más al valor observado, como se aprecia más adelante.

Las mismas condiciones adoptadas para la simulación estacionaria fueron mantenidas en la simulación transitoria, excepto que en esta ocasión se permitió el ingreso de agua a la ciudad a través de una brecha de 150m en el extremo norte del terraplén. En este caso, la simulación tuvo las características de los cálculos normalmente empleados para analizar eventos de roturas de presas (Hervouet, 2000). El paso de tiempo de cálculo fue de 5s. El tiempo simulado hasta que el agua alcanzó el máximo nivel dentro de la ciudad fue de 26hs, aproximadamente el mismo tiempo real transcurrido desde la entrada de agua y el comienzo de las voladuras sobre el terraplén, realizadas con el propósito de evacuar el agua desde la ciudad hacia el río.

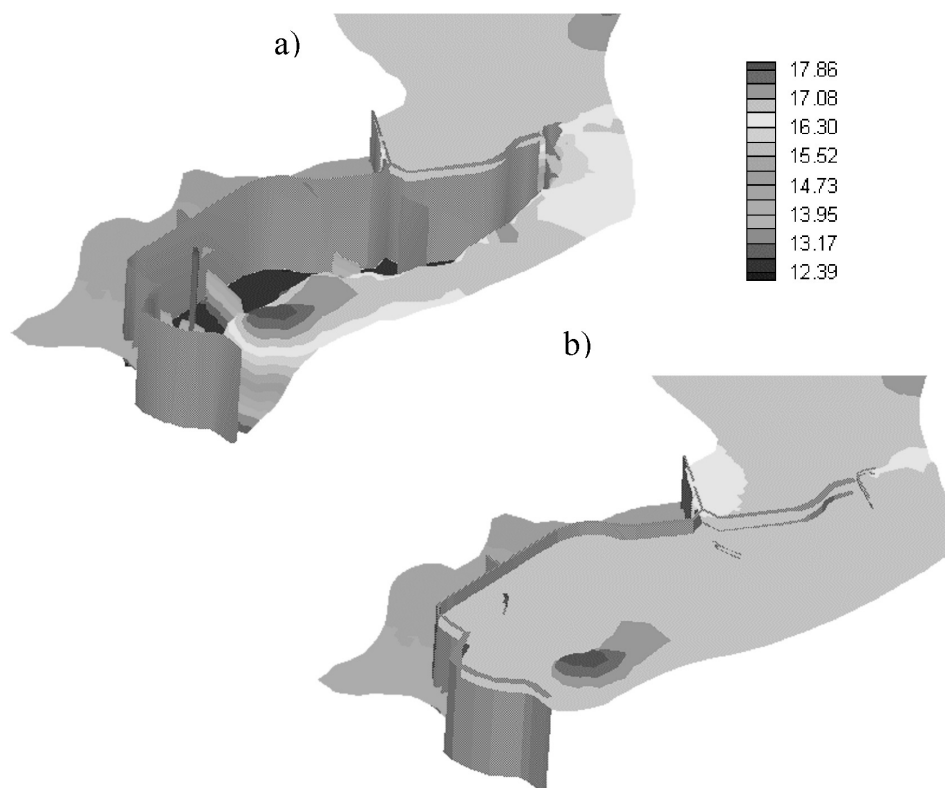


Figura 11: Cota de la superficie libre, en metros: a) estado inicial, b) estado final de la simulación transitoria.

La Figura 12 muestra la evolución temporal de la superficie libre de la onda abrupta que ingresó a la ciudad instantes posteriores a la rotura del terraplén. Se observa la evolución del tirante de agua en diferentes puntos ubicados a lo largo del terraplén Irigoyen, en el interior de la ciudad. A su vez, la Figura 13 muestra una secuencia del avance de la onda de agua a través de la brecha a los 5, 25, 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 1000 segundos desde el comienzo de la simulación transitoria. La misma figura también exhibe un detalle del campo de velocidades instantes posteriores a la rotura, en la vecindad de la brecha. La máxima velocidad simulada en la brecha fue de 4.5m/s, con un caudal máximo de ingreso del orden de los 600 m³/s, caudal que fue disminuyendo paulatinamente a medida que el “reservorio” artificial limitado por el terraplén Irigoyen al oeste, la Avenida de Circunvalación Mar Argentino al sur (Figura 2), y las cotas naturalmente altas del centro de la ciudad al este, fue llenándose (Figura 14). La Figura 14, además de mostrar la rapidez del ascenso del agua en los barrios bajos de la ciudad, lo que provocó el caótico desplazamiento de miles de pobladores, muestra claramente el efecto beneficioso y a la vez fortuito, de los terraplenes existentes del ferrocarril (ver Figura 9). El retardo provocado por el llenado de los anillos internos hizo que la catástrofe no cobrara un número mayor de víctimas fatales. A su vez, se aprecia que en esta situación, el nivel de aguas arriba del puente de

la autopista disminuye unos 20cm, con lo cual el Δh efectivamente calculado se aproxima a 1.5m, valor próximo al observado.

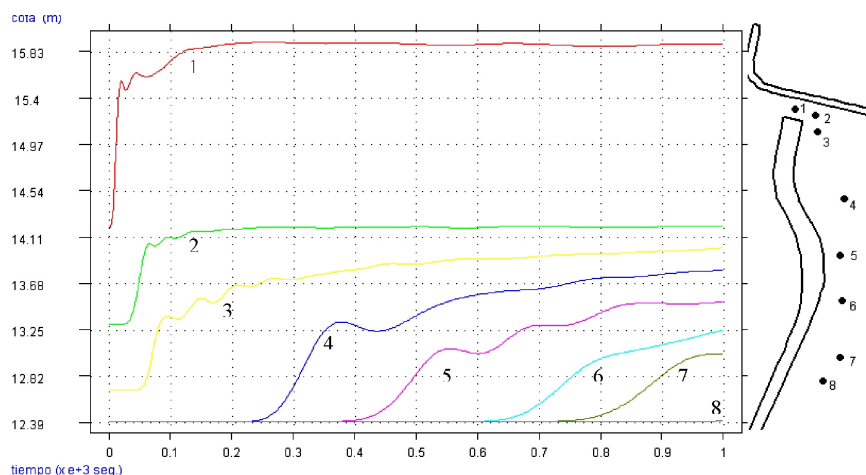


Figura 12. Evolución temporal de la superficie libre, instantes posteriores a la rotura del terraplén. Los puntos se ubicaron paralelos al terraplén Irigoyen, en el interior de la ciudad, a lo largo de la Avenida de Circunvalación Oeste.

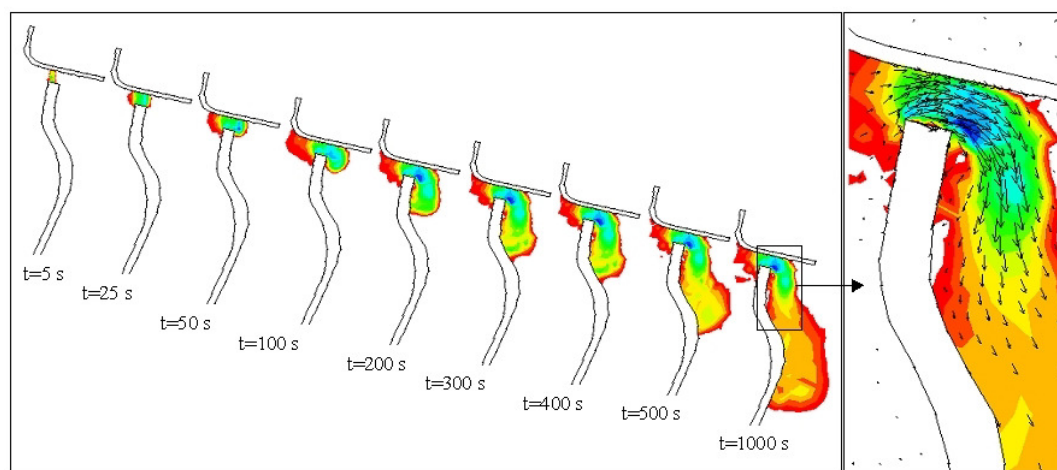


Figura 13: a) Avance de la onda de crecida en el interior de la ciudad a distintos tiempos, b) Detalle del campo de velocidad unos instantes luego de producirse la rotura del terraplén.

Al cabo de unas 26-28hs desde el colapso de la estructura de protección, un relevamiento realizado por personal de la Dirección Provincial de Obras Hidráulica indicó un desnivel de 2.5m entre el interior de la ciudad y la superficie libre del río. La Figura 15 presenta un perfil ubicado 50m aguas arriba de la RN11, que une las ciudades de Santo Tomé y Santa Fe. El mismo compara la superficie libre del agua al término de la simulación, con aquella publicada por el diario El Litoral el día 4 de mayo de 2003, en la misma zona donde se realizó la nivelación. A pesar de la discrepancia obtenida en las cotas absolutas, a uno y otro lado del terraplén, la diferencia relativa (desnivel) coincide notablemente con el valor reportado. Este dato refleja uno de los efectos más paradójicos del colapso de la estructura de

protección. Una obra que se suponía diseñada para contener las aguas del río Salado en épocas de creciente, terminó por potenciar el problema al punto tal de incrementar el nivel natural de las aguas en 2.5m, amén de acelerar el ritmo de ascenso del agua, de paulatino como es típico en los ríos de llanura, a repentino.

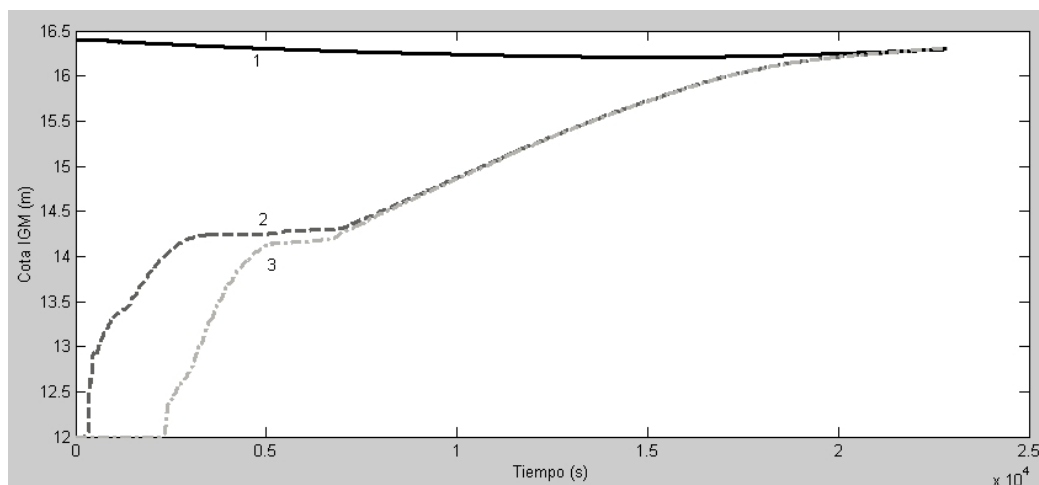


Figura 14: Evolución temporal de los niveles en todo el lapso de la simulación, en el punto de rotura, del lado del río, y en dos puntos ubicados aguas abajo, en el interior de la ciudad (referenciados en la Figura 5).

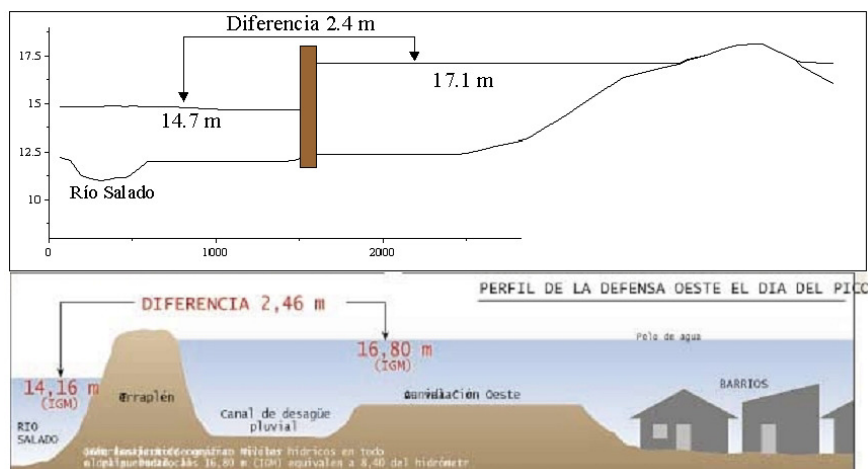


Figura 15: Comparación entre cotas de superficie libre a un lado y otro del terraplén Irigoyen, a) Simuladas, b) observadas (DPOH).

Consecuentemente, unas 30hs después de iniciado el ingreso masivo de agua a la ciudad, las autoridades del gobierno de la Provincia de Santa Fe solicitaron a personal del Ejército Argentino (quienes estaban operando en la zona) que procedieran a la voladura de tramos del terraplén Irigoyen y de la Avenida Mar Argentino (Figura 16). A partir de las voladuras del terraplén Irigoyen en 6 puntos, y de la Avenida Mar Argentino en dos puntos, la situación hídrica en el interior de la ciudad mejoró paulatinamente, fundamentalmente los barrios Sur y Centro de la ciudad, no así los ubicados al oeste del terraplén, que debieron esperar el arribo de grandes bombas –y del posterior cierre de emergencia de la brecha– para la evacuación definitiva de las aguas.



(a)



(b)

Figura 16: a) Voladura del terraplén Irigoyen, b) Traspase de agua desde la ciudad hacia el río, una vez producido el corte con explosivos.

CONCLUSIONES

Este trabajo muestra la capacidad de herramientas numéricas 2D para el tratamiento de casos de estudio que, en algunos aspectos, guarda similitud con el problema de la rotura de una presa. Desde un punto de vista numérico, es esencial contar con un algoritmo de secado / mojado de elementos en casos donde la propagación de la onda de crecida

avanza sobre áreas inicialmente secas. A pesar de algunas discrepancias entre valores calculados y estimados (observados), la simulación realizada puede considerarse altamente satisfactoria teniendo en cuenta la escasa disponibilidad de información básica con la que se trabajó desde un principio. La simulación realizada reproduce adecuadamente varios aspectos de la evolución de la onda de crecida en su paso por el interior de la ciudad, así como el desnivel observado entre uno y otro lado del terraplén, y el tiempo de llenado del catastrófico “reservorio” en que se había convertido el oeste de la ciudad de Santa Fe. Por tanto, puede concluirse que la herramienta empleada es de utilidad no sólo para reproducir una de las peores catástrofes ambientales de la República Argentina, sino también para estudios de diagnóstico o de verificación de estructuras de protección de zonas densamente pobladas, y que presentan un considerable grado de vulnerabilidad a situaciones hídricas extremas. Para finalizar, es posible elaborar una serie de conjeturas sobre lo sucedido, y sobre lo que podría haber resultado si las obras civiles emplazadas en la zona hubiesen respetado el diseño original.

El colapso por la acción hídrica del terraplén Irigoyen se produjo en una porción reducida de su extremo norte, mal finalizado, que no respetó las normas constructivas empleadas para el resto de la obra, la que paradójicamente fue necesario dinamitar con gran cantidad de explosivos en otros sitios. La prolongación de unos pocos centenares de metros del terraplén hacia el norte, hasta alcanzar la zona del terreno con cotas elevadas (Figura 9), hubiera bastado para evitar el ingreso masivo de agua, así como el ingreso en forma de lámina inmediatamente aguas arriba de la brecha (hipótesis de cálculo *vi*). Desde este punto de vista, es indispensable resaltar que, a la hora de recepcionar la segunda etapa constructiva del terraplén Irigoyen, la ciudad de Santa Fe estaba incorporando en realidad un “reservorio” en lugar de una “obra de protección contra crecidas”. Este efecto está correctamente capturado en la Figura 11, aspecto que resultó letal para decenas de personas, sin contar los cuantiosos daños materiales y emocionales sufridos por miles de santafesinos.

Un puente de la autopista Santa Fe-Rosario con un mínimo del doble de luz, hubiese bastado para deprimir significativamente la cota de la superficie libre aguas arriba del estrechamiento, tal como fue demostrado en estudios previos (INAA, 1998). Un estudio recién liberado (Bronstein *et al.*, 2004), encargado por la Fiscalía de Estado de la Provincia de Santa Fe indica que, bajo esas circunstancias, se habría tenido un tirante 0.5m inferior aguas arriba del estrechamiento. Es posible conjeturar, entonces, que se hubiese limitado considerablemente el ingreso de agua a la ciudad.

Si a la hora de definir la traza del terraplén Irigoyen, se hubiese respetado el ancho de la planicie aluvial del río Salado en su tramo final de 20km, labrada por el río en tiempos geológicos, se hubiese preservado su capacidad de conducción natural en épocas de crecida, pudiéndose esperar niveles de agua inferiores. En definitiva, la aparente sensación de seguridad que brindó la obra de protección contra crecidas, y los severos problemas habitacionales de sectores marginales de la población, provocaron una urbanización caótica en terrenos que otrora pertenecieron al río Salado. Todo ello se produjo ante la ausencia de políticas estatales de ordenamiento territorial, y coyunturalmente, con la construcción y la posterior recepción de una obra civil de “dudosa” eficacia.

REFERENCIAS

- Bronstein, P., Henning, R., Vernet, G. y Hoopwood, H. (2004). “Aspectos hidrológicos e hidráulicos de la crecida del río Salado de abril de 2003”, *Informe Fiscalía de Estado*, Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Santa Fe, Argentina.
- Ceirano E., Paoli, C., y Schreider, M. (2000). Cap.11, *El río Paraná en su tramo medio*, Centro de publicaciones, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Ferreira G. (2003). “Descripción de la situación hidrológica de la cuenca del río Salado –tramo santafesino– en el período enero-mayo 2003”, *Anexo 1, Informe de la Dirección Provincial de Obras Hidráulicas*, Provincia de Santa Fe, Santa Fe, Argentina.
- FICH (2003). “La crecida del río Salado: causas que determinaron la inundación de la ciudad de Santa Fe”, *Informe de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas*, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- CIMNE. *GID: El pre / postprocesador personal*, v4.0, (1999). Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE, Barcelona, España.
- Hervouet J.M., y Van Haren, L. (1996). *Recent Advances in Numerical Methods for Fluid Flows*, in: *Floodplain Processes*, Anderson, Walling and Bates, Eds., Wiley and Sons, Chichester, England.
- Hervouet J.M. (2000). “A high resolution 2D dam break model using parallelization”, *Hydrological Processes*, 14, 2211-2230.
- INAA (1998). “Redimensionamiento hidráulico del puente sobre el río Salado en la Autopista Santa Fe-Rosario”, *Instituto Nacional del Agua y del Ambiente*, Centro Regional Litoral, Santa Fe, Argentina.

- ProCIFE (2003), “Transformar Santa Fe, Programa de Cooperación Interinstitucional Frente a la Emergencia”, *Diario El Litoral*, Santa Fe, Argentina.
- Reddy J.N., y Gartling D.K. (2001). *The finite element method in heat transfer and fluid dynamics*, 2nd ed., CRC Press, Boca Ratón, Florida, USA.
- SMS Surface Water Modelling System*, (2000). User’s Manual, Brigham Young University, Utah, USA.
- RSI. Interactive Data Language –IDL, v6.0*, (2003). ITool User’s Guide, Research System Inc., Illinois, USA
- Tassi P.A., Vionnet, C.A. y Rodríguez, L.B. (2000). “Integrating technologies for 2D numerical modelling of the Paraná river”, *Proceedings of Hydroinformatics 2000 Conference*, Iowa City, Iowa, USA, 23-27 July 2000.
- Telemac-2D. Hydrodynamics Telemac-2D software v.4.0*, (1998). User’s Manual, Technical Report Electricité de France EDF, Département Laboratoire National d’Hydraulique, Francia.
- Trento A. (1998). “Modelo unidireccional para el estudio de calidad de aguas.” Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Vionnet C.A., Tassi, P.A., y Martin Vide, J.P. “Estimates of flow resistance and eddy viscosity coefficients for 2D modelling on vegetated floodplains”, *Hydrological Processes*, in press.
- Vreugdenhil C.B. (1998), *Numerical methods for shallow-water flows*, 2nd ed., Kluwer Academic Pub., Dordrecht, The Netherlands.