

APLICACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO PARA EL PRONÓSTICO DE NIVELES DE AGUA EN TIEMPO REAL

• Gerardo Riccardi • Hernan Stenta • Carlos Scuderi • Pedro Basile •
• Erik Zimmermann • Franco Trivisonno •
Universidad Nacional de Rosario, Argentina

Resumen

Se describe la aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para la generación de pronósticos de niveles de agua en tiempo real. El modelo está físicamente basado y espacialmente distribuido, simulando los procesos de la transformación lluvia-caudal y propagación de escurrimiento superficial en forma cuasi-2D en ambientes rurales y urbanos. La aplicación fue llevada a cabo en la cuenca de llanura del arroyo Ludueña (Santa Fe, Argentina). El modelo se constituyó, calibró y validó en el año 2008; posteriormente ha sido utilizado en 13 eventos lluviosos para generar pronósticos en tiempo real de niveles de agua, caudales, y volúmenes escurridos y almacenados en puntos característicos del dominio espacial. Los resultados indican un grado aceptable de representación del escurrimiento superficial en la sección de cierre de la cuenca, donde el promedio de los valores absolutos de los errores porcentuales entre los niveles máximos observados y calculados es de 10.8 y 20%, en términos de caudales y volúmenes. Además, se han alcanzado resultados aceptables en la reproducción de la forma general de las ondas de crecidas, así como en el pronóstico de la permanencia de niveles de agua sobre umbrales de alerta fijados de manera previa.

Palabras clave: modelación físicamente basada, alerta hidrológica, pronóstico de niveles.

Introducción

En toda cuenca hidrográfica donde las crecidas producen afectaciones tanto a la salud como a los bienes materiales de la población, es cada vez más habitual el uso de sistemas de alerta temprana que permiten pronosticar la evolución de niveles de agua, en línea con la presentación del evento lluvioso que produce la crecida.

La selección del modelo de pronóstico de niveles en tiempo real es dependiente del tamaño y las características de la cuenca, de la disponibilidad de datos hidrometeorológicos, del tiempo de aviso y propósito del pronóstico, de las características del escurrimiento y de la disponibilidad de instalaciones y equipamiento de cómputo (Arduino *et al.*, 2005; Singh,

2005). Existe una gran variedad de modelos matemáticos que son utilizados para pronóstico de crecidas, así como diversos criterios para su clasificación. Singh (2005) estableció una clasificación según la consideración o no de la aleatoriedad involucrada en los fenómenos: a) determinísticos o b) probabilístico (estocásticos y estadísticos), según la discretización de la cuenca y de los fenómenos involucrados: concentrados (empíricos/conceptuales) o distribuidos (física-mente basados), y paramétricos.

El presente trabajo involucra la aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico determinístico, cuasi-2D físicamente basado, de parámetros distribuidos.

Los modelos de parámetros espacialmente distribuidos utilizan alguna forma de la ecuación de balance definida en todos los puntos

para modelar el flujo. Un enfoque típico es el empleo de las ecuaciones de Saint Venant para un flujo de agua poco profundo, donde se conservan la masa y cantidad de movimiento. Los mecanismos de movimiento pueden ser descritos en forma uni o multidireccional sobre el dominio espacial. La principal ventaja de estos modelos es la representación explícita de los mecanismos de generación de escurrimiento, en función de los procesos físicos de forma espacialmente distribuida (Ogden *et al.*, 2000; Lamberti y Pilati, 1996). Ejemplos de estos modelos son el Topkapi (Liu *et al.*, 2005), el Lisflood (De Roo *et al.*, 2000) o el CASC 2D (Julien y Saghaffian, 1991), entre otros.

Aplicaciones de modelos distribuidos a pronóstico de crecidas fueron hechas por Cabral *et al.* (1990), citado por Bras y Garrote (1995), en una subcuenca del río Arno (Italia) de 840 km². Jasper *et al.* (2002) reportaron el uso de un modelo hidrológico distribuido acoplado a predicciones meteorológicas de precipitación a mesoescala, aplicado en una región alpina de Italia, involucrando 37 000 km² y con un tamaño de grilla de 1 x 1 km. Hsu *et al.* (2003) aplicaron un modelo distribuido, con corrección por cada paso de tiempo, al pronóstico de crecidas del río Tanshui en Taiwán. Campos-Aranda (1994) realizó la implementación de un modelo matemático conceptual de eventos, con parámetros físicamente basados y autoajustables, que incluye como fases principales la estimación de la lluvia en exceso, la transformación lluvia-caudal, y el tránsito de hidrogramas en cauces y embalses; concluyó que las limitaciones que se pueden presentar al aplicar el modelo en una determinada cuenca son originadas por la escasez de información pluviográfica e hidrométrica. En cuencas medianas y grandes, una deficitaria cantidad de puntos de aforos resulta en una representatividad insuficiente de las distribuciones espaciales de las lluvias y del escurrimiento generado, restándole certeza al pronóstico de niveles, velocidades y caudales.

En lo concerniente a la calidad de un

modelo, Goswami *et al.* (2005) indican que debe ser juzgada en la medida en que: a) cumple su objetivo de simular el fenómeno real; b) el nivel alcanzado de precisión persiste a través de diferentes muestras de datos (consistencia), y c) puede mantener el nivel de precisión alcanzado cuando se somete a diversas aplicaciones (versatilidad). Por lo tanto, es necesario establecer un criterio de eficiencia del pronóstico para juzgar los resultados del modelo; sin embargo, no existe en la actualidad una metodología única o definitiva para la evaluación de la bondad de los modelos (García-Bartual, 2002). Es habitual el uso del coeficiente de determinación R^2 , el error cuadrático medio (ECM), el error absoluto medio (EAM) y el error porcentual en los máximos (EPM), así como el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe. Respecto a experiencias de utilización de modelos de pronósticos en Argentina, Scuderi *et al.* (2006) comenzaron a usar un modelo hidrológico-hidráulico distribuido cuasi-2D físicamente basado, para realizar el pronóstico en línea de niveles de agua y caudales en la cuenca hidrográfica del arroyo Ludueña (Santa Fe). Inicialmente fue utilizada una grilla espacial de 1 000 x 1 000 m, obteniéndose un pronóstico de niveles con un margen del error porcentual de niveles máximos de $\pm 20\%$ en la sección de salida de la cuenca durante una serie de tormentas sucedidas entre los años 2008 y 2009. A los efectos de mejorar la predicción de niveles y dado que la cuenca comprende una red hídrica compleja, constituida por cursos naturales y artificiales, singularidades morfológicas, coberturas y usos del suelo que no han podido ser adecuadamente descritas mediante la grilla espacial inicialmente considerada, se originó el trabajo aquí presentado, que consistió en la aplicación del modelo en una grilla espacial más densificada. Se adoptó una discretización con celdas de 250 x 250 m y se aplicó la nueva constitución del modelo en los eventos lluviosos ocurridos en el periodo desde noviembre de 2008 hasta febrero de 2010. El objetivo de esta investigación fue lograr una mejor descripción

de los mecanismos de formación y propagación de los excedentes hídricos superficiales del sistema hidrográfico, focalizando el pronóstico en línea de la evolución de niveles en una serie de sitios críticos de la cuenca con vulnerabilidad a las inundaciones. Asimismo, se objetivó la minimización del tiempo de ejecución del cálculo computacional, en correspondencia con la operatividad del modelo, a fin de generar el pronóstico de niveles con la anticipación necesaria para poder planificar acciones durante las emergencias ante posibles inundaciones.

La metodología llevada a cabo para alcanzar los objetivos consistió en: (a) constitución del modelo hidrológico-hidráulico en la cuenca hidrográfica en estudio; (b) calibración-validación del modelo con base en reproducciones de crecidas históricas antecedentes; (c) uso del modelo como herramienta para pronóstico en línea de evolución de niveles; (d) análisis de resultados, comprendiendo la evaluación de la aptitud del modelo para generar los pronósticos de niveles, permanencia de niveles y forma general de la onda.

Constitución del modelo

Breve descripción del modelo matemático

El modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-2D empleado es el VMMHH 1.0 (Riccardi *et al.*, 2009). Esta herramienta tecnológica es la última actualización de la fusión entre el modelo matemático hidrológico-hidráulico CTSS8 (Riccardi, 2000; Stenta *et al.*, 2008) y la plataforma en sistema de ventanas para pre y post procesamiento de información y resultados SIMULACIONES 2.0 (Stenta *et al.*, 2005). El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975), y permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación

neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. Para la determinación necesaria de lluvia neta en cada celda es posible el uso de las metodologías reconocidas de Green y Ampt, o del Servicio de Conservación del Suelo de Estados Unidos (Chow *et al.*, 1994). El escurrimiento resultante puede ser propagado en un dominio espacial 2D mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación. Para contemplar alternativas puntuales de flujo, se incorporaron leyes de descarga para puentes, vertederos y alcantarillas. La distribución espacial de los parámetros y variables hidrológicas se realiza mediante la subdivisión de la cuenca en celdas de igual tamaño (cuadrangulares), interconectadas entre sí, definiendo así el dominio del sistema hídrico a modelar. Las celdas pueden ser tipo valle o río, que representan el flujo superficial y encauzado, respectivamente. De esta forma, las celdas tipo río representan cursos de agua permanente y/o transitorios de importancia, y las celdas tipo valle representan las áreas tributarias a éstos, así como las planicies de inundación.

El modelo conceptual utilizado por el sistema VMMHH 1.0 parametriza la variabilidad de la morfología del terreno dentro de la celda, considerando una sección trapezoidal con un punto bajo central y pendientes laterales. La sección transversal efectiva de almacenamiento y conducción es, entonces, representada por una aproximación trapezoidal dentro de cada celda.

Desde el punto de vista de la descripción de la dinámica propagatoria del escurrimiento, la ventaja fundamental de este modelo está relacionada con la posibilidad de transmitir información en cualquier dirección del dominio bidimensional, pudiendo el modelo discernir en cada paso de tiempo las direcciones del escurrimiento superficial de acuerdo con los gradientes hidráulicos. En experiencias de aplicación del modelo llevadas a cabo por

Riccardi (2000), Stenta et al. (2008), Riccardi et al. (2009) y Basile et al. (2010), se ha demostrado que el modelo es particularmente apto para simulación de flujos con variaciones lentas de caudales y alturas, donde los términos inerciales resultan despreciables, como es el caso en estudio.

Horrit y Bates (2001) han reportado el uso del modelo LISFLOOD-FP, similar al CTSS8, concluyendo que este tipo de aproximación resulta computacionalmente más simple y arroja resultados similares a los obtenidos en la simulación con onda difusiva en dos direcciones. Esta conclusión valida la propuesta del CTSS8 en su capacidad de reproducir los procesos involucrados en la propagación cuasi-2D del flujo superficial.

Formulación del modelo

Las ecuaciones gobernantes consideradas son la de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento, transformadas en formulaciones de descarga entre celdas (Riccardi, 2000).

Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad se plantea en cada celda a partir de la definición del incremento del volumen de agua almacenada desde consideraciones geométricas y condiciones de descarga:

$$A_{S_i} \frac{dz_i}{dt} = P_{i(t)} + \sum_{k=1}^j Q_{k,i} \quad (1)$$

donde $P_{i(t)}$ es lluvia, interceptación, almacenamiento superficial, infiltración e intercambio externo de caudales en la celda i ; A_{S_i} y z_i son el área mojada superficial y nivel de agua en la celda i ; $Q_{k,i}$ es el caudal intercambiado entre celdas k e i . La función de almacenamiento (FAV) interviene en la ecuación de continuidad mediante la definición del área superficial mojada A_{S_i} .

Leyes de descarga entre celdas

El modelo permite el intercambio de caudal entre celdas mediante aproximaciones de tipo cinemática, difusivo y cuasi-dinámico. Asimismo, en el caso de vinculaciones donde se evidencia un límite físico como terraplenes de rutas, vías, etcétera, se emplea la ecuación de vertedero de cresta ancha. Tal ecuación es empleada también en el caso de flujo a través de vertederos, puentes y alcantarillas. Detalles de las diferentes funciones de intercambio de caudal pueden hallarse en Riccardi (2000) y Riccardi et al. (2009).

La función de almacenamiento (FAV) incorporada al modelo

El escurrimiento transitando por celdas tributarias de una cuenca de llanura puede asemejarse a un flujo mantiforme con pocos centímetros de tirante, verificándose que el flujo no forma una lámina completa en toda una celda, sino que se estructura mayormente en pequeños hilos de escurrimiento, surcos (muy relevante si se trata de áreas de cultivos) y pequeñas zanjas que se van interconectando a medida que aumenta el caudal, vinculándose además con eventuales depresiones aisladas. Este mecanismo está fuertemente vinculado con el micro relieve presente en la superficie (figuras 1a y 1b). Sólo en el caso de que el nivel de agua esté por encima de toda irregularidad del terreno y vegetación, el ancho completo de la sección transversal estará disponible para el almacenamiento y la conducción del flujo.

Actualmente el modelo VMMHH 1.0 cuenta con una abstracción de almacenamiento basado en un nodo conectivo tipo cruz con una geometría transversal triangular-trapecial compuesta (figura 1c).

La variabilidad de la morfología del terreno dentro de la celda es parametrizada, considerando variables geométricas tales como el ancho mínimo (an mín), la pendiente transversal del área baja (ITA), la altura con pendiente transversal ITA (H_1), la altura total

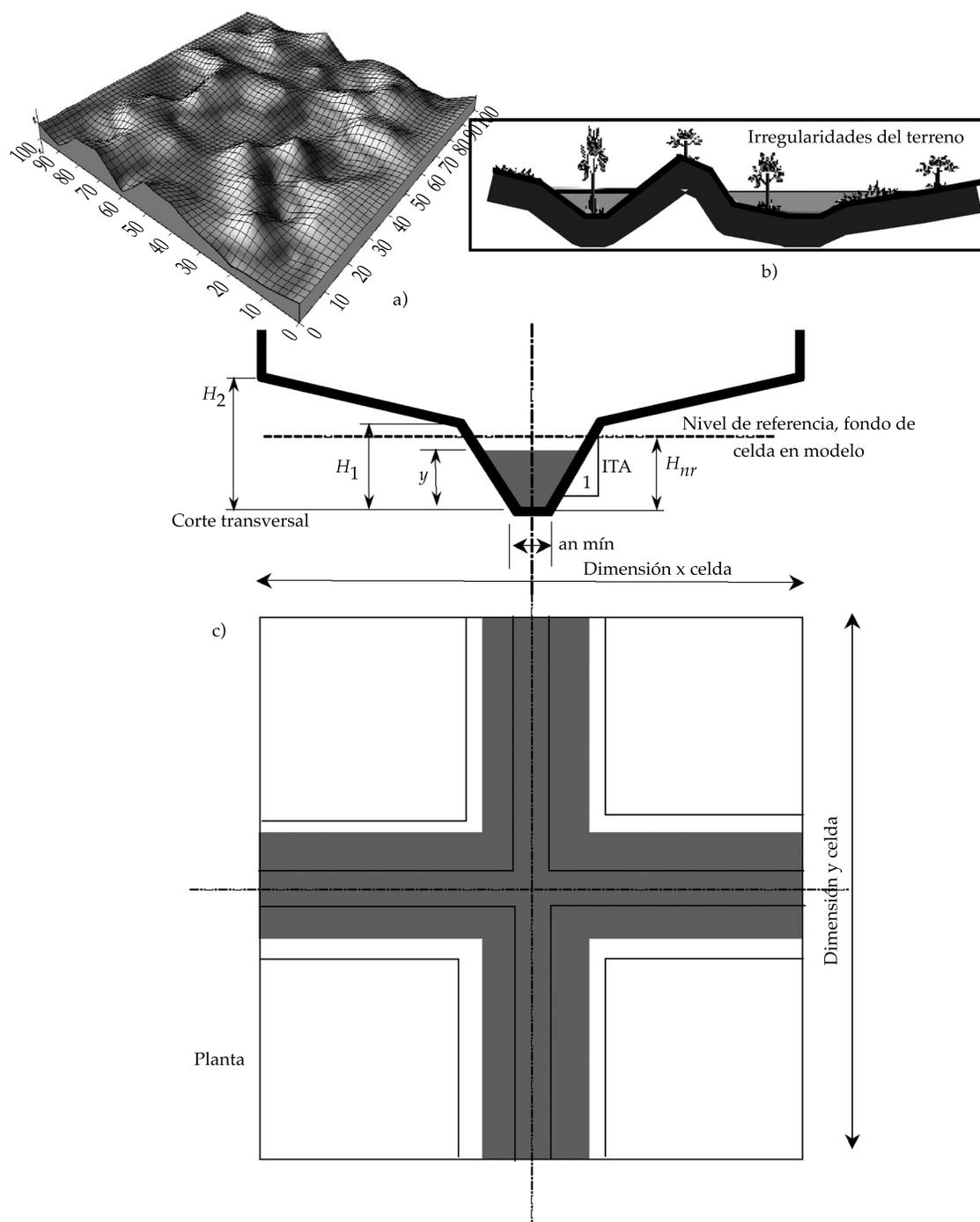


Figura 1. Morfología de una celda tipo: (a) esquema del microrrelieve; (b) perfil transversal; (c) esquema de almacenamiento y conectividad.

de la celda (H_2) y la altura de referencia del fondo (H_{nr}). Esta última altura representa la diferencia de cotas entre el valor considerado como medio de fondo de celda y el punto más

bajo de la celda. Los parámetros geométricos citados se esquematizan en la figura 1c, donde se representa la abstracción de almacenamiento en una celda.

La cuenca del arroyo Ludueña

La cuenca del arroyo Ludueña se localiza entre los paralelos 32° 45' S y 33° 08' S, y los meridianos 61° 04' O y 60° 39' O (figura 2a y 2b), perteneciendo a la provincia de Santa Fe (Argentina); engloba parte del casco urbano de la ciudad de Rosario y desemboca en el río Paraná. Tiene un área de aporte de

aproximadamente 740 km² y una pendiente media de 1.4 por mil. La red hídrica principal está constituida por el arroyo Ludueña y los canales Ibarlucea y Funes-Salvat, mientras que en épocas de lluvia se adicionan numerosos y pequeños cursos naturales (cañadones) y artificiales que aportan al escurrimiento. Atraviesan la región importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios. La red de cursos

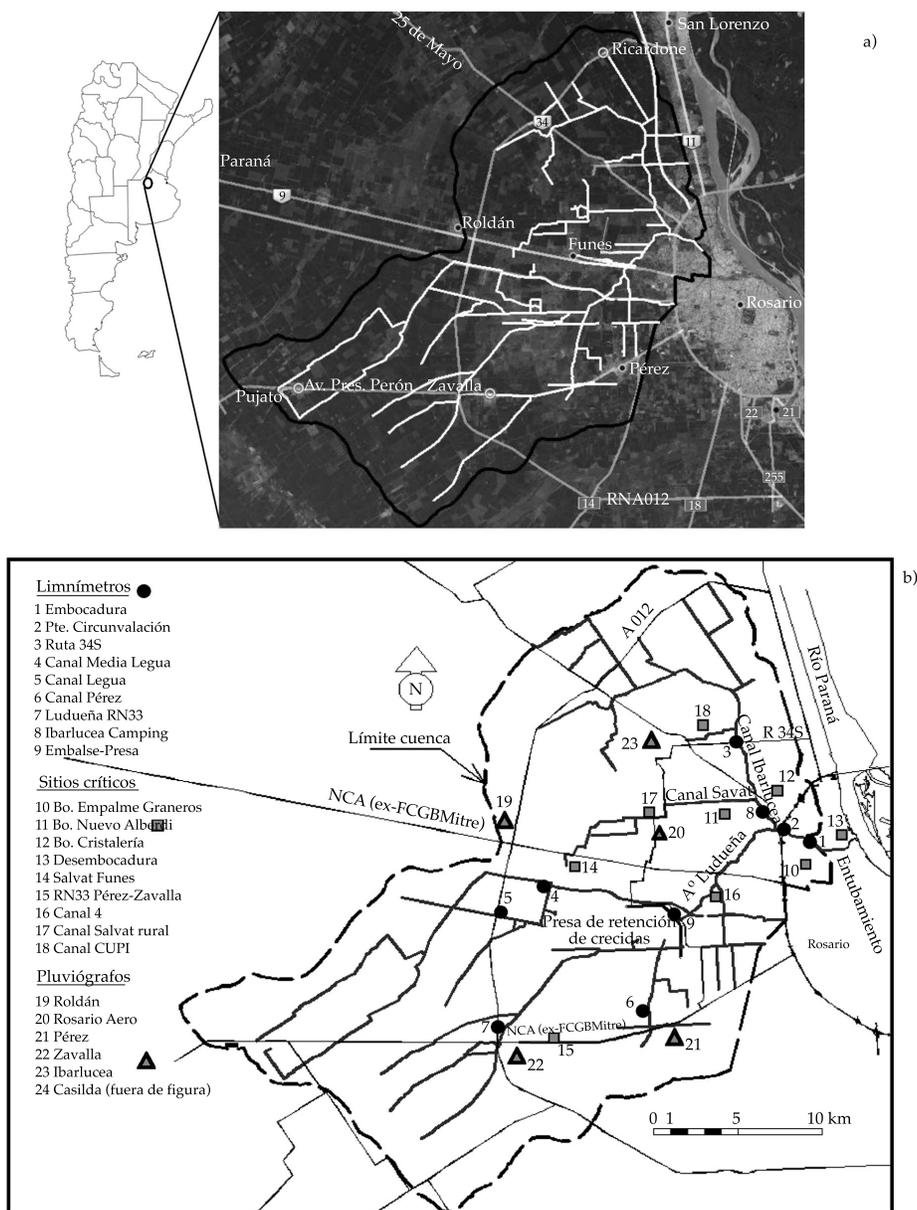


Figura 2. Cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina: a) ubicación geográfica (Fuente: Google Earth®); b) pluviógrafos, limnímetros y puntos críticos.

y canales primaria tiene una extensión de unos 140 km, en tanto que con el agregado de cunetas y canales secundarios, esta longitud de vías de drenaje alcanza los 360 km. La densidad de drenaje, considerando la red primaria, es de 0.19 km/km², en tanto que al cabo de la alteración antrópica alcanzada a la fecha, la densidad de drenaje asciende a 0.49 km/km², indicando el grado de transformación que ha sufrido la cuenca.

El balance hidrológico medio anual a partir de 1973 se compone de una precipitación anual de 967 mm/año y una evapotranspiración de 923 mm/año, con un excedente de 44 mm/año. En la cuenca se presentan, en la parte alta de la misma, suelos bien drenados, de permeabilidad moderada a moderadamente lenta, no susceptibles a anegamiento y aptos para la agricultura (del tipo argiudoles vérticos), y en la parte central y norte (zona deprimida), se presentan suelos con drenaje insuficiente y afectados por las fluctuaciones de la napa freática (asociación de argiudoles vérticos y natracualfes típicos) (INTA, 1990). La agricultura constituye el principal uso del suelo, destacándose el cultivo de soja y, en menor medida, el maíz y el trigo.

Sensores, aforos y sitios críticos en la cuenca

La cuenca cuenta con una red de nueve sensores de niveles y seis sensores de lluvias. Durante el periodo de operación 2008-2010, la red no funcionó en cada evento en su totalidad, por lo que la información disponible en todos los eventos lluviosos es parcial. Asimismo, existen sitios críticos asociados con desbordes de cursos de agua y anegamientos de rutas, donde si bien no se realizan observaciones sistemáticas, personal técnico de las autoridades hídricas municipal y provincial, así como personal de este centro, llevan a cabo campañas de mediciones de niveles (en ocasiones se hacen registros fotográficos y de videos) durante episodios lluviosos, que son empleados durante la modelación para la contrastación con los niveles calculados por el modelo de

pronósticos. También existe una red de apoyo basada en observaciones pluviométricas realizadas por personal de los municipios y ciudadanos en general. Asimismo, personal de este centro ha llevado a cabo aforos de caudales en ciertas secciones de los cursos principales. En la figura 2b se indican los sitios de los sensores de lluvia y niveles, al igual que un grupo de sitios críticos.

Implementación del modelo matemático

La implementación del modelo matemático comprendió: a) la generación del modelo digital del terreno; b) la constitución de la red hídrica; c) la incorporación del trazado vial y ferroviario; d) la incorporación de estructuras hidráulicas como alcantarillas, puentes y un vertedero.

- Generación del modelo digital del terreno (MDT): el modelo digital del terreno se constituyó con base en la vectorización y georreferenciación de cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y con la adición de puntos relevados en campo. El MDT quedó conformado por aproximadamente 96 000 puntos, con coordenadas X, Y, Z georreferenciadas. Para elaborar la información topográfica en formato de grilla equiespaciada que demandó el modelo hidrológico-hidráulico, se utilizó un programa computacional de tratamiento de datos topográficos, que incluye algoritmos de interpolación, empleándose el conocido algoritmo de interpolación de kriging mediante el cual se definió la grilla equiespaciada cada 250 m. Para determinar los contornos del MDT se llevó a cabo la delimitación de la cuenca con base en la divisoria de aguas topográfica y contemplando en los casos que así lo requieran los posibles límites físicos que generan terraplenes carreteros y ferroviarios. Se consideró como sección de control de la cuenca la desembocadura del arroyo Ludueña con el río Paraná.

- Constitución de la red hídrica: la definición de la red hídrica se llevó a cabo mediante la recopilación de información de relevamientos topográficos y recorridas de campaña de los cursos existentes, y la posterior definición de cursos de agua permanentes y transitorios. Fueron definidas las trazas georreferenciadas de todos los cursos identificables, importándose en formato DXF desde la plataforma de ingreso de datos del VMMHH 1.0, definiéndose las celdas ríos en el modelo. En cada celda río se definieron características como base de fondo, cota de fondo, talud, profundidad y coeficientes de Manning encauzado y sobre planicies. La red hídrica resultó con una extensión de 360 km de cursos permanentes y transitorios (arroyo, canales, cañadones, cunetas y grandes conductos en zonas urbanas). Las celdas que no componen la red hídrica se tipifican como “celdas valle”, por las cuales transita de manera multidireccional el escurrimiento generado, tributando finalmente a la red de cursos de agua. Las celdas valle situadas en las cercanías de la red de drenaje componen la planicie de inundación que es ocupada de forma temporaria por los desbordes ocasionales. Tanto en las celdas valle como en las celdas río para niveles de agua superiores al de desborde del cauce deben ser definidas las funciones de almacenamiento (FAV) y transporte.
 - Representación del trazado vial y ferroviario: los terraplenes ferroviarios y carreteros fueron representados mediante la definición de las trazas georreferenciadas, y su posterior incorporación a la plataforma del modelo. Luego se definieron características como cota de coronamiento y coeficiente de descarga. El coeficiente de descarga representa al terraplén funcionando como vertedero en una situación de desborde. Se definieron un total de 845 vinculaciones tipo terraplén, representando una extensión de 220 km.
 - Representación de alcantarillas, puentes y vertedero: se determinaron los respectivos posicionamientos planimétricos de las obras hidráulicas, importándose luego a la plataforma del modelo. Las características geométricas e hidráulicas que demanda el modelo son las siguientes: ancho, coeficiente de descarga, cota de fondo y altura. Previendo la situación de desborde de las obras, se definieron las cotas de coronamiento de las mismas y los coeficientes de descarga correspondientes.
- El modelo quedó finalmente constituido con un tamaño de grilla (TG) cuadrangular de 250 m de lado (figura 3), lo que involucró 11 855 celdas (10 376 celdas valle y 1 479 celdas río) y 23 345 vinculaciones entre celdas (845 terraplenes, 10 puentes, 62 alcantarillas, 1 426 entre celdas río, 18 481 entre celdas valle y 2 521 entre celdas valle y río).
- Condiciones de borde, condiciones iniciales y entradas del modelo*
- Para cada simulación se definieron las siguientes condiciones de borde, iniciales y entradas al modelo:
- a) Niveles iniciales de agua en todas las celdas del modelo antes de cada tormenta.
 - b) Lluvia neta en cada celda, calculada a partir del método de Green y Ampt (Chow et al., 1994) en cada tormenta con base en los aforos de lluvias totales obtenidos mediante las estaciones pluviográficas, las condiciones de humedad antecedente, y características del tipo y cobertura del suelo.
 - c) Condiciones de borde aguas abajo asociada con la cota del río Paraná en la fecha de cada tormenta.
- Secciones de control de caudales*
- Durante el periodo en estudio, la cuenca contó con al menos dos sitios sobre cursos de

Esta obra se trata de un vertedero-orificio con relación cota embalse-caudal conocida. Por este sitio drenan, previo a su laminación en el embalse, aproximadamente 360 km² de la extensión superficial de la cuenca.

En el futuro inmediato se prevé la ejecución de campañas de aforos de caudales, en correspondencia con los actuales emplazamientos de los limnómetros. Estos sitios podrán considerarse como secciones de control de flujo tras la calibración de las curvas *H-Q* correspondientes.

Calibración-validación del modelo

La calibración del modelo de escurrimiento superficial ha sido particular, puesto que este sistema hídrico viene siendo modificado continuamente en los últimos cuarenta años. Las alteraciones que de mayor forma han influido sobre la respuesta hidrológica en términos de niveles y caudales son las siguientes: a) en el uso y la ocupación de la tierra; b) modificaciones de prácticas agrícolas; c) canalizaciones y recanalizaciones de cursos existentes; d) construcción de obras viales; e) construcción de obras hidráulicas como presa de retención, vertedero, puentes y alcantarillas, conducciones cerradas; f) construcción de cunetas y zanjas secundarias. Este proceso evolutivo de la respuesta de la cuenca ha significado que toda calibración deba ser revisada, actualizada y validada una vez transcurrido un cierto tiempo.

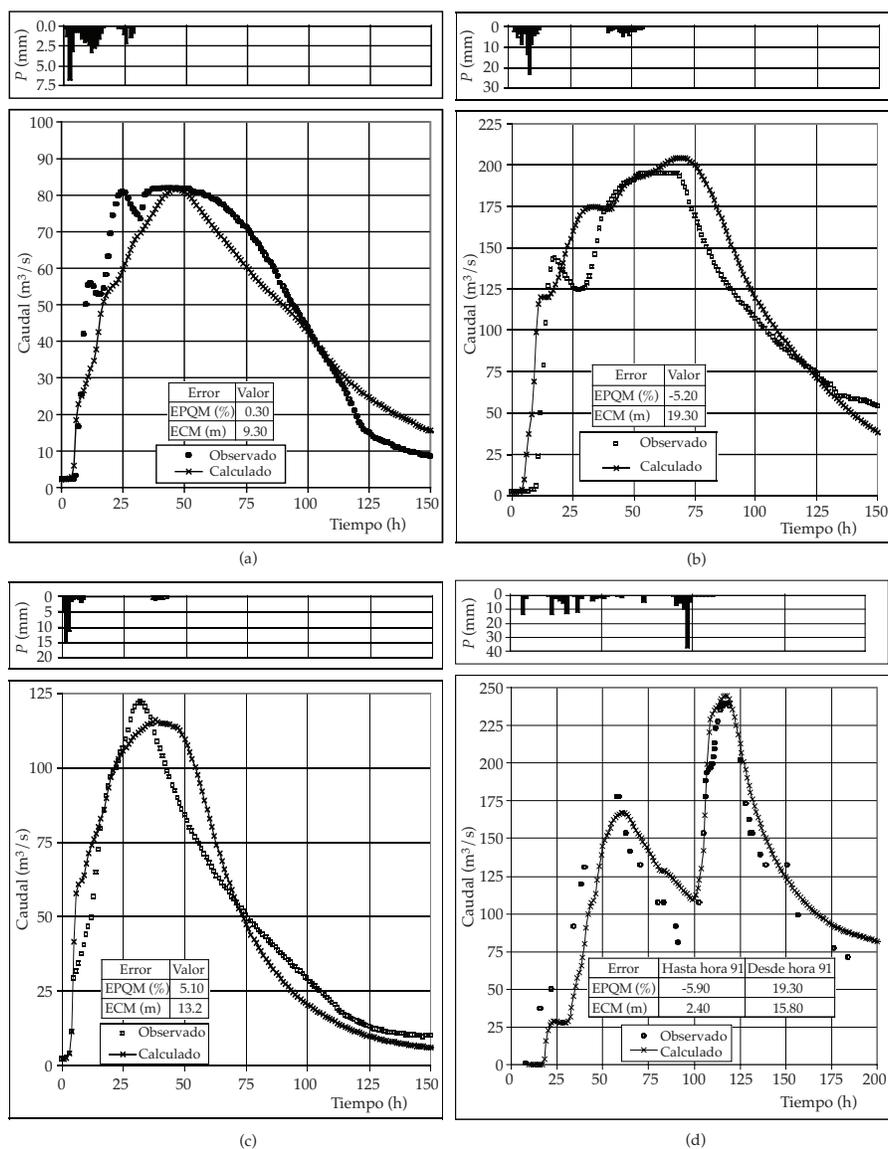
Los parámetros ajustados del modelo han sido: a) coeficiente de resistencia al escurrimiento encauzado; b) coeficiente de resistencia al escurrimiento mantiforme; c) coeficiente de resistencia al escurrimiento en conducciones cerradas; d) coeficiente de descarga de vertedero, puentes y alcantarillas; e) coeficiente de descarga de terraplenes funcionando como vertederos; f) parámetros geométricos de la FAV.

En la historia reciente de la cuenca, previo a la explotación del modelo, han existido dos periodos relevantes donde se ha podido

realizar el proceso de calibración → validación de los parámetros de ajuste:

- a) Crecidas de 1994 a 1996, donde aún no existía la presa de retención de crecidas ni la ampliación de canalizaciones del canal Ibarlucea y el arroyo Ludueña, ni la ampliación de las conducciones cerradas en el tramo final del sistema hídrico. En este periodo, la información pluviográfica fue registrada en tres sitios, la información pluviométrica en cuatro zonas y los niveles de agua se obtuvieron en series continuas en dos lugares. Además se realizaron en forma discontinua aforos puntuales de caudales en sitio RTU20, registrándose un valor máximo de caudal de 200 m³/s.
- b) Crecidas entre noviembre de 2006 y marzo de 2007, donde se produjo la mayor lluvia observada en la cuenca en la historia reciente. En este evento ya funcionaba la presa de retención de crecidas y se habían realizado ampliaciones parciales de las secciones transversales de escurrimiento del arroyo Ludueña, del canal Ibarlucea y de los entubamientos. Dentro de este periodo se presentó una crecida extraordinaria en marzo de 2007, involucrando un caudal máximo aproximado de 240 m³/s, estimado en el sitio RTU20. En este evento extremo se dispuso de registros pluviográficos en tres sitios, pluviometría registrada en ocho sitios y niveles observados en series incompletas en siete sitios. Asimismo, se contó con mapas de inundaciones obtenidos a partir de fotografías aéreas e imágenes parciales por satélite.

Los resultados de la calibración fueron calificados a partir de la valoración de los errores cuadráticos medios, y los errores porcentuales de los valores máximos de niveles y caudales; además, como valoración de la calidad del ajuste, se computaron el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el coeficiente de determinación R^2 . En la figura 4 se presentan los hidrogramas observados y calculados en la sección de control para los



EPQM: error porcentual de caudales máximos; ECM: error cuadrático medio en caudales.

Figura 4. Calibración del modelo: hidrogramas observados y calculados del sitio Puente Circunvalación RTU20:

a) evento 17/03/94; b) evento 03/04/94; c) evento 01/05/94; d) evento del 26 al 30 de marzo de 2007.

eventos 17/03/1994, 03/04/1994, 01/05/1994 y 26/03/2007.

En el cuadro 1 se muestran características globales de los eventos, como lluvia total media, lluvia neta media, condición antecedente, caudales y niveles de agua máximos y tiempos de presentación de los máximos, en conjunto con los errores porcentuales entre valores calculados y observados de nivel y caudal máximo, así como los errores cuadráticos

medios resultantes de la comparación de los niveles y caudales en todas las ordenadas temporales. A partir de los errores determinados, se consideró la calibración como satisfactoria, estableciéndose los siguientes valores de los parámetros calibrados: coeficientes de rugosidad de Manning en cursos: 0.028-0.033 y 0.090-0.110 en planicies; coeficientes de descarga en alcantarillas y puentes: 0.75-0.98; coeficientes de desborde

Cuadro 1. Resultados de la calibración del modelo.

Evento fecha inicio	Lluvia total (mm)	Lluvia neta (mm)	CN inicial	Q _{máx} (m ³ /s) observado/ calculado	H _{máx} (m) observado/ calculado	Tiempo al máximo (horas) observado/ calculado	Error porcentual en máximos de H y Q (%)	ECM en H (m)	ECM en Q (m ³ /s)
17/03/1994	149	38	56	82.0 / 81.8	2.38/2.38	41.8/40.3	0.18 / 0.3	0.19	9.3
03/04/1994	155	107	83	195/204	3.95/4.07	113/116	-3.0 / -5.2	0.32	19.3
01/05/1994	59	39	92	122/116	3.01/2.92	39.5/40.2	3.0 / 5.1	0.24	13.2
26/03/2007	365	143	75 a 90	178/167 240/245	3.75/3.62 4.47/4.53	59/58 116/114	-3.5 / -5.9 1.4 / 2.4	0.34 0.25	19.3 15.8

ECM: error cuadrático medio.

de terraplenes actuando como vertederos de cresta ancha: 0.20; características de la FAV con grilla de 250 x 250 m: ITA = 0.019; $H_1 = H_{nr} = 1.00$ m; $H_2 = 1.73$ m.

En función de las tormentas consideradas en la calibración, y teniendo en cuenta que pudieron reproducirse de manera satisfactoria los mecanismos presentes en la dinámica propagatoria de una de las más grandes crecidas observadas en la historia reciente de la cuenca, se concluye acerca de que no se advierten límites en la aplicación del modelo hidrológico-hidráulico para este uso y para esta cuenca hidrográfica.

Utilización del modelo para el pronóstico en línea de niveles de agua

Durante el periodo de lluvias, entre noviembre de 2008 y febrero de 2010, el modelo de pronósticos se operó en 13 eventos lluviosos en la región, con precipitaciones entre 36 y 120 mm de lámina total media areal, y duraciones de tiempo lluviosos entre 2 y 24 horas. La lluvia neta tipificada como "observada" se definió a partir de los aforos de niveles en el sitio RTU20 (700 km² de área tributaria), la posterior transformación a caudales mediante la ley H - Q antes descrita y la determinación de los volúmenes de escurrimiento mediante integración de caudales.

El campo areal de lluvias totales de cada tormenta se estableció a partir de la metodología de Thiessen aplicadas a la información

disponible desde seis sensores pluviográficos existentes (figura 2b).

La asignación de condiciones de humedad antecedente se realizó a partir de la aplicación de una formulación del índice de precipitación antecedente (IPA) desarrollado en forma específica para esta cuenca (Zimmermann *et al.*, 2008). Este índice fue actualizado diariamente y se discretizó espacialmente del mismo modo que el campo de precipitaciones; asimismo, se vinculó directamente con el grado de saturación relativa (Se) mediante una relación ajustada por Zimmermann *et al.* (2009).

La lluvia neta fue determinada a partir del algoritmo de Green y Ampt, y mediante la proposición de una pérdida inicial por interceptación en follaje y almacenamiento en microdepresiones superficiales. Se ha considerado un valor constante de pérdida inicial entre 6 y 9 mm, rango de valores derivado a partir de las modelaciones antecedentes realizadas en el periodo 2008-2009 (Riccardi *et al.*, 2009). Los valores medios de los parámetros de Green y Ampt para la permeabilidad vertical saturada (kv) y el potencial de succión (Ψ) son $kv = 79.7$ mm/día y $\Psi = 854$ mm (Zimmermann *et al.*, 2009).

En cada evento se generaron dos escenarios hidrológicos para el pronóstico de niveles (rutina GEH, Rentería *et al.*, 2009). Un primer escenario tipificado "de mínima", correspondió a la simulación del escurrimiento producido por la lluvia neta computada desde las condiciones de humedad valoradas a partir del IPA y la

saturación efectiva. Un segundo escenario tipificado “de máxima”, correspondió a la definición de una lluvia neta computada con la saturación efectiva incrementada en un 20%, y menor o igual a 0.95. Integrando los hidrogramas asociados con el pronóstico de máxima y mínima, se valoriza el entorno de volúmenes calculados salientes por el sitio de control, los que se comparan con los volúmenes determinados indirectamente a partir de los niveles observados en el sitio. En este camino, en cada evento, y una vez culminada la lluvia,

se comenzó a simular el escurrimiento y se determinaron los pronósticos de máxima y mínima de la evolución de niveles, caudales y volúmenes escurridos.

En el cuadro 2 se exponen las características de los 13 eventos relevantes de lluvia ocurridos durante el periodo noviembre 2008-febrero 2010; se presenta la lluvia total media areal, la lluvia neta considerada como “observada”, el entorno de *Se* computado a partir del IPA y del correspondiente incremento del 20%, el entorno de lluvia neta computado a partir del algoritmo

Cuadro 2. Explotación del modelo. Eventos del periodo 2008-2010.

Fecha	Lluvia total media areal (mm)	Lluvia neta observada (mm) inferida a partir de integración de hidrograma saliente	Entorno de <i>Se</i> (computado)	Entorno de lluvia neta (mm) (computado)	EPNM (%) P.mín/P.máx	ECM (m) P.mín/P.máx	EAM (m) P.mín/P.máx
Del 29/11/08 al 30/11/08	50	13/17	0.47/0.60	11/14	(dd)	(dd)	(dd)
Del 02/02/09 al 03/02/09	74	12/16	0.11/0.13	12/15	-23.0 / 5.0	0.34 / 0.20	0.23 / 0.32
Del 10/02/09 al 11/02/09	66	13 /17	0.40/0.52	30/38	6.2 / 9.9	0.08 / 0.10	0.07 / 0.08
Del 20/02/09 al 22/02/09	73	12/16	0.57/0.75	22/26	-12.0 / 3.0	0.17 / 0.30	0.30 / 0.12
Del 03/03/09 al 04/03/09	89	27/36	0.64/0.83	23/27	-10.2 / -3.0	0.34 / 0.10	0.29 / 0.09
Del 19/11/09 al 23/11/09	120	28/30	0.25/0.32	28/30	-0.3 / 1.2	0.13 / 0.11	0.09 / 0.10
Del 19/12/09 al 23/12/09	100	19/22	0.50/0.66	16/20	8.9 / 13.8	0.30 / 0.30	0.26 / 0.27
Del 24/12/09 al 31/12/09	78	23/28	0.79/0.95	14/28	-21.9 / 2.6 -20.4 / 10.4	0.41 / 0.20 0.27 / 0.22	0.39 / 0.18 0.21 / 0.24
Del 04/01/10 al 10/01/10	83	29/34	0.82/0.95	35/46	-10.1 / 7.0 5.1 / 16.1	0.34 / 0.27 0.30 / 0.49	0.24 / 0.24 0.28 / 0.48
Del 12/01/10 al 14/01/10	48	12/15	0.83/0.95	18/24	(dd)	(dd)	(dd)
Del 03/02/10 al 10/02/10	97	28/33	0.62/0.81	31/39	20.7 / 30.3 -12.7 / -4.3	0.48 / 0.64 0.40 / 0.23	0.46 / 0.62 0.28 / 0.19
Del 15/02/10 al 18/02/10	36	15/18	0.83/0.95	5/10	(dd)	(dd)	(dd)
Del 19/02/10 al 25/02/10	64	31/37	0.87/0.95	26/33	-17.4 / -5.6	0.25 / 0.20	0.18 / 0.16

(dd): existen datos observados discontinuos y anomalías de registros de aforos, por lo cual no se han computado los errores; EPNM: error porcentual de niveles máximos; ECM: error cuadrático medio en niveles; EAM: error absoluto medio en niveles; P.mín: pronóstico de mínima; P.máx: pronóstico de máxima.

de Green y Ampt, el error porcentual aplicado a niveles máximos (EPNM) observados y calculados, el error cuadrático medio (ECM) y el error absoluto medio (EAM) tanto para el pronóstico de mínima como el de máxima en el sitio RTU20. En el caso de tormentas con doble máximo, se establecieron los errores para ambos cuerpos de los limnigramas. En la figura 5 se presentan los limnigramas observados y calculados para ocho de las tormentas citadas en el cuadro 2 en el sitio del sensor limnimétrico RTU20 (en la tormenta del 10/02/2009, dicho sensor no funcionó, por lo que fue utilizado como control de salida el limnómetro del sitio Embocadura RTU28). Como se mencionó, los valores computados corresponden a una primera fase del pronóstico de niveles, que se inicia una vez concluida la lluvia (en el caso de lluvias simples), por lo que no contienen ningún mejoramiento o corrección en línea.

Operando el modelo con un intervalo de tiempo $dt = 5$ s, se aseguró la inexistencia de todo tipo de inestabilidades numéricas, y se obtuvo una relación entre tiempo de cálculo y tiempo de pronóstico de 1/30.

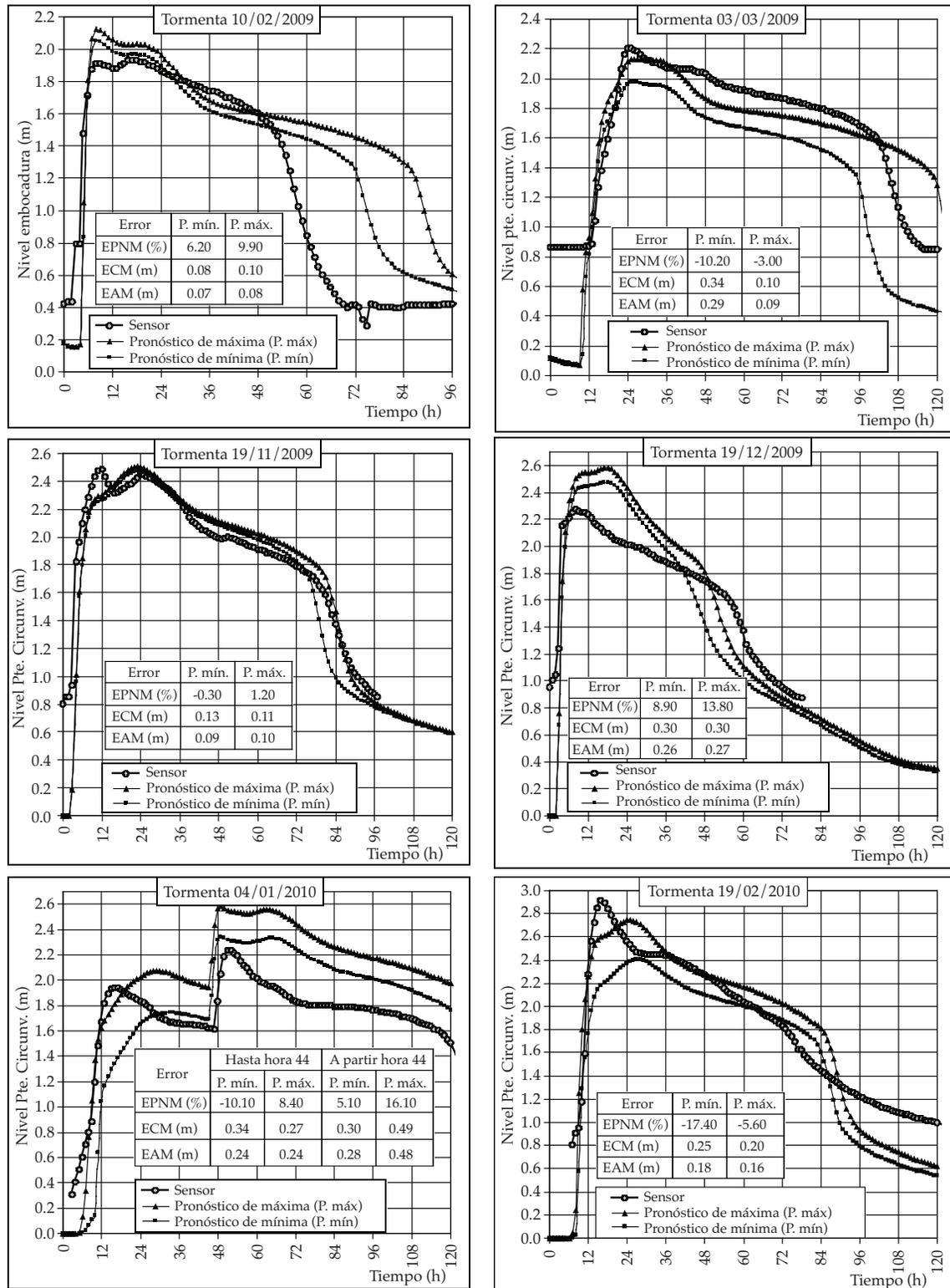
Corrección elemental de pronóstico de niveles cada seis horas

Actualmente se está trabajando en distintas alternativas de corrección en línea de los niveles computados por el modelo, a fin de mejorar la calidad del pronóstico, previéndose en el futuro la incorporación de las correcciones en línea. Las alternativas de corrección se focalizan en disminuir las diferencias entre niveles observados y calculados para aguas altas, cuantificando la corrección a partir del mejoramiento de los errores EPNM, ECM y EAM. Una primera alternativa elemental de corrección de niveles en línea ha consistido en fijar un primer instante de corrección, en el cual se calcula la diferencia entre los valores observado y pronosticado para dicho instante. Posteriormente, esa constante es sumada algebraicamente a todos los niveles

pronosticados en el periodo de las próximas seis horas, estableciendo de esta forma un patrón elemental de corrección cada seis horas. Este procedimiento se repite cíclicamente durante el periodo de permanencia de los niveles de aguas altas en el sitio; se conserva la tendencia original de la curva. La elección de este intervalo de corrección obedece a características propias de las zonas urbanas con vulnerabilidad a inundaciones en la cuenca en estudio. En efecto, seis horas se consideran como el tiempo mínimo necesario de pronóstico para llevar a cabo protocolos de evacuación de la población. En el cuadro 3 se presenta el mejoramiento respecto al EPNM, ECM y EAM que produce esta sencilla técnica elemental. En la figura 6 se presentan los limnigramas observados y calculados-correctos de cuatro crecidas en las que se aplicó la técnica de corrección citada.

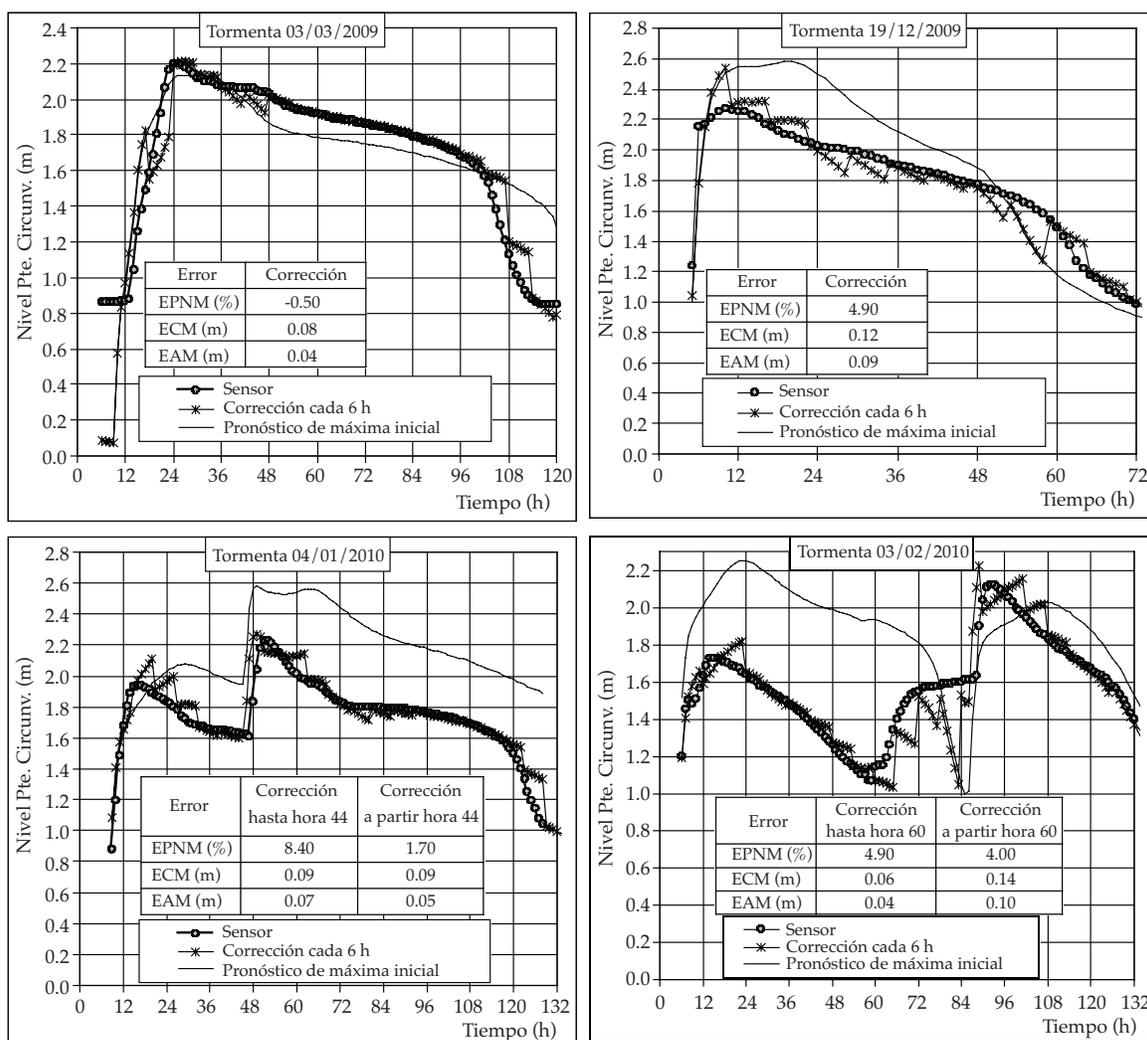
Permanencia de los niveles

Una importante información respecto de los niveles pronosticados lo constituye la determinación de la permanencia de los niveles por encima de umbrales asociados con desbordes establecidos a priori en el sistema de alerta en los sitios críticos con mayor vulnerabilidad. Si bien solamente en la crecida del 19/11/2009 hubo un desborde local en el Bo. Nuevo Alberdi (sitio 11, figura 2b), las permanencias han sido especialmente monitoreadas en cada crecida. A modo indicativo, puede mencionarse que en el periodo húmedo de 2008-2009 (aproximadamente cien días) sólo se superó el nivel de 2.00 m en el sitio RTU20 por no más de tres horas en los cinco eventos más lluviosos del periodo. En cambio, en el periodo lluvioso 2009-2010, se observaron 139 horas con niveles por encima del mencionado umbral. Esta tendencia constituye un indicador, entre otros, acerca de lo húmedo del ciclo hidrológico 2009-2010 y alertó sobre la mayor probabilidad de presentación de escenarios críticos. La permanencia de niveles mayores a 2.00 m



EPNM: error porcentual de niveles máximos; ECM: error cuadrático medio en niveles; EAM: error absoluto medio en niveles.

Figura 5. Limnigramas observados y computados en el sitio Puente Circunvalación (RTU20) y en el sitio Embocadura (RTU28), en diversos eventos del periodo de explotación del modelo 2008/2010.



EPNM: error porcentual de niveles máximos; ECM: error cuadrático medio en niveles; EAM: error absoluto medio en niveles.

Figura 6. Limnigramas calculados con corrección elemental cada seis horas.

Cuadro 3. *Performance* de mejoramiento por corrección elemental, cada seis horas, del pronóstico de máxima de la evolución de niveles.

Fecha	Mejoramiento del EPNM (%)	Mejoramiento del ECM (m)	Mejoramiento del EAM (m)
Del 03/03/09 al 04/03/09	-3.0 a -0.5	0.10 a 0.08	0.09 a 0.04
Del 19/12/09 al 23/12/09	12.1a 4.9	0.30 a 0.12	0.27 a 0.09
Del 04/01/10 al 10/01/10	8.6 a 8.4 13.8 a 1.7	0.27 a 0.09 0.49 a 0.09	0.24 a 0.07 0.48 a 0.05
Del 03/02/10 al 10/02/10	23.3 a 4.9 14.7 a 5.0	0.64 a 0.06 0.23 a 0.14	0.62 a 0.04 0.19 a 0.10

EPNM: error porcentual de niveles máximos; ECM: error cuadrático medio en niveles; EAM: error absoluto medio en niveles.

computada por el modelo resultó de 175 horas, desagregándose en cinco horas en el periodo 2009-2009 y 170 horas en el periodo 2009-2010. Si bien el protocolo de operaciones durante un episodio lluvioso prevé la determinación de la permanencia de niveles de agua en sitios preestablecidos, a partir de la potencialidad del modelo hidrológico-hidráulico, la permanencia de niveles puede ser determinada en cualquier celda del dominio espacial, con las correspondientes consideraciones de confianza de los resultados.

Lag entre hietogramas y niveles máximos de las crecidas

Los desfases temporales observados entre los centros de gravedad de la lluvia neta y los máximos de los limnigramas fue también motivo de análisis. En el sitio RTU20 se ha observado que al producirse una lluvia aproximadamente uniforme en toda la cuenca, un primer máximo de la crecida se alcanza entre las siete y nueve horas de la coordenada temporal del centro de gravedad del hietograma neto, en tanto que un segundo máximo se presenta entre las 20 y 24 horas. Al respecto se hipotetiza que el primer máximo corresponde a una rápida respuesta de las zonas impermeables urbanas y periurbanas cercanas, en tanto que el segundo máximo obedece a mecanismos propagatorios asociados con la zona rural y la superposición de los caudales salientes de la presa de retención de crecidas. Un ejemplo del segundo máximo lo ha constituido la lluvia sucedida el 19/11/2009, donde las mayores intensidades de precipitación se produjeron en la zona de Roldán (pluviógrafo 19, figura 2b) a las 3:00, en tanto que el máximo de la crecida se presentó en el sitio RTU20, entre las 22:00 y las 02:00 horas del día siguiente.

Por otra parte, puede afirmarse que en caso de que la lluvia se focalice solamente en el sector sur de la cuenca, donde todo el escurrimiento se lamina en la presa, el máximo de la crecida alcanza el sitio RTU20 entre las 38 y 42 horas del centro de gravedad del hietograma.

Llenado, volumen en tránsito y vaciado de la cuenca durante los eventos

A partir de la lluvia neta, de los limnigramas observados y computados por el modelo, de los hidrogramas determinados a partir de la ley $H-Q$ existente y de los hidrogramas computados por el modelo, se ha podido reproducir en un post proceso la dinámica global de llenado y vaciado de la cuenca. Si bien esta información puede ser secundaria durante el evento, resulta de importancia para aportar conocimiento a la comprensión de la dinámica propagatoria de las crecidas. Además resulta claro que, en la medida que se mejore la información disponible en cada evento (hietogramas y limnigramas en sitios internos), mejorará notablemente el conocimiento base del movimiento y por ende contribuirá a un mejor pronóstico de niveles.

Tratamiento para los niveles de agua iniciales

Como se mencionó en un punto anterior, los niveles de agua iniciales tanto en los cursos de agua como en el valle pueden ser introducidos con el máximo grado de detalle disponible del modelo (un valor en cada celda). En casos en que sólo se disponga de niveles en ciertos sitios de algunos de los cursos principales, el modelo cuenta con bibliotecas adicionales en las cuales se han elaborado hipotéticos "estados iniciales", conformados a partir de la simulación mediante el modelo VMMHH 1.0 de escenarios de tormentas espacialmente uniformes en toda la cuenca. En el caso de necesitarse una condición inicial originada en una lluvia arealmente no uniforme, puede realizarse una corrida previa del modelo con la distribución deseada de la lluvia, interrumpir la corrida al alcanzarse el estado inicial requerido y luego iniciarse el modelado para pronóstico.

Actualización de la constitución del modelo

Amerita ser reportada la potencialidad de que dispone la constitución del modelo VMMHH

1.0 para que, de una manera rápida, puedan incorporarse cambios geométricos y/o topográficos de cursos de agua o estructuras hidráulicas que se modifiquen o construyan durante la operación del modelo, y puedan modificar de alguna manera la dinámica propagatoria superficial. A manera ilustrativa, cabe mencionar que el canal Ibarlucea fue modificado fuertemente en su base de fondo y su profundidad, ampliándose su sección trapezoidal de 6 m de base de fondo y 2 m de profundidad a 17.5 m de base de fondo y entre 4.50 m de profundidad media durante el periodo aquí reportado, por lo cual la constitución del modelo en ese sector crítico debió ser actualizada en el inicio de cada episodio lluvioso, en función del avance de la canalización.

Umbral mínimo asociados con desbordes

Como parte de la explotación del modelo, además de la operación durante crecidas y de los efectos de determinar umbrales mínimos asociados con posibles desbordes en puntos críticos, se llevaron a cabo una serie de simulaciones, vinculando diferentes condiciones de humedad antecedente y lluvias simples de seis horas de duración. De este modo se constituyó una serie de umbrales de desborde en dos puntos críticos de la cuenca baja: Barrios Nuevo Alberdi (sitio 11, figura 2b) y Empalme Graneros (sitio 10, figura 2b), para $0.10 \leq Se \leq 0.95$. Los valores de lámina de lluvia resultante son sólo indicativos, pero permiten dar al operador del sistema de alerta una perspectiva a priori de la importancia de la evolución esperable de los niveles ante la presentación de una lluvia dada.

Análisis de resultados

A fin de valorar la bondad de los resultados, se tuvieron en cuenta los siguientes análisis: a) un primer análisis correspondió a la comparación de los niveles máximos de cada crecida mediante el promedio de los valores absolutos

de los errores porcentuales de los niveles máximos (EPNM) y b) un segundo análisis correspondió a la comparación de toda la serie de niveles observados y calculados durante cada crecida mediante la valoración de los errores cuadráticos medios (ECM) y los errores absolutos medios (EAM) (cuadro 2).

El promedio de los valores absolutos de los EPNM fue del 10.8%, resultando en un rango entre 0.3 y 30.3%. Si se descartan 3 de las 13 tormentas en las cuales el pronóstico de niveles sin correcciones no puede considerarse satisfactorio, el promedio de los valores absolutos de los EPNM desciende a 8.5% (de 0.3 a 23.0%). En lo que respecta a caudales y volúmenes escurridos, el promedio de los valores absolutos de los errores porcentuales de los máximos fue del 20%.

En cuanto a los ECM y EAM, los valores promedios de todas las tormentas resultaron en: ECM = 0.28 m (de 0.08 a 0.64 m) y EAM = 0.25 m (de 0.07 a 0.63 m). Si se descartan las tres tormentas con mayores diferencias entre valores observados y calculados, los errores se reducen a: ECM = 0.21 m (de 0.08 a 0.34 m) y EAM = 0.18 m (de 0.07 a 0.32 m).

A partir de los errores citados se considera que tanto en el pronóstico de los valores máximos como en los pronósticos de los niveles que conforman el cuerpo general del limnograma, se han establecido aproximaciones muy satisfactorias en el caso de tormentas simples (serie de chaparrones con una duración total de la tormenta de 6 a 12 horas) y aproximaciones regulares en el caso de tormentas compuestas, donde se produce una tormenta simple, y se suceden uno o dos días sin lluvias, y vuelve a precipitar otra tormenta simple.

En tormentas como la del 19/11/2009, la zona urbana lindante a la sección de cierre RTU20 responde rápidamente en términos de un primer máximo de niveles debido a la distribución espacial de la lluvia concentrada en las cercanías de la sección de control. En estos eventos se verifica que el modelo atenúa demasiado este primer máximo, en tanto que es satisfactoriamente reproducido el segundo

máximo, así como la señal proveniente de la presa de retención. Al respecto se destaca que por no complejizar en demasía la constitución, el modelo no tiene incorporado en su totalidad todas las redes locales de desagües pluviales en los ambientes urbanos cercanos a la sección de control, por lo cual resulta en efectos de atenuación mayores a los reales para el primer máximo que se constituye mayormente a partir del aporte de zonas urbanas cercanas.

Debe señalarse que en la mayoría de las tormentas no se contó con datos en tiempo real de todos los pluviógrafos de la cuenca de forma simultánea. Por este motivo, la descripción espacial de la lluvia puede considerarse bastante gruesa, verificándose tras un post procesamiento que, cuando más heterogénea espacialmente es la precipitación, más dispersión se computa en los resultados. Esta dispersión en este tipo de modelo determinístico y distribuido es inevitable si la información es errónea o insuficiente. Tras analizar la relación entre los episodios lluviosos con los mayores errores en los niveles en el cuerpo general de la onda de crecida y la cantidad de pluviógrafos operativos en esa tormenta, se advierte que cuanto menor es la cantidad de pluviógrafos mayor es la diferencia entre los limnigramas computados y observados. Debe tenerse presente que en los sitios de los pluviógrafos se genera la información de lluvia, al igual que de forma indirecta la información de humedad antecedente a través del IPA, por lo cual las estaciones pluviográficas inactivas no sólo repercuten en la certeza del campo espacial de lluvias sino también en la definición de la condición antecedente de la cuenca.

Una alternativa al mejoramiento es la definición de la espacialidad de la lluvia mediante radar, teniendo presente que la zona de la cuenca es abarcada en su totalidad por el radar meteorológico de la ciudad de Pergamino, distante a 120 km, y el de Paraná, distante a 150 km; resulta obvio que otra solución consiste en el aumento del número de pluviógrafos. Tras efectuar un análisis de sensibilidad de los niveles calculados mediante la reproducción

de tormentas hipotéticas semejantes a las observadas, se ha determinado un valor de 10 como la cantidad mínima de estaciones pluviográficas (una cada 75 km²) necesarias para describir la dinámica de escurrimiento superficial cuando se presentan tormentas con fuertes variaciones espaciales. En lo referente a un mejoramiento en la definición del estado de humedad antecedente de la cuenca, una alternativa es la futura determinación mediante técnicas de procesamiento de imágenes proveniente de radares satelitales.

En lo que concierne al llenado-vaciado de la cuenca y los caudales salientes en el sitio RTU20, el modelo genera caudales levemente inferiores a los inferidos a partir de los niveles observados y la conversión a caudales mediante la curva *H-Q* ajustada. Para niveles inferiores a 3.00 m, los niveles calculados deben ser del orden de 3 a 5% superiores a los observados para determinar caudales similares. Si bien para la predicción de niveles la diferencia en caudales no es fuertemente relevante, desde lo conceptual de la modelación físicamente basada es un factor que debe mejorarse. De todas maneras, el cuerpo general de la onda de crecida observada y sus tiempos característicos resultan satisfactoriamente representados por el modelo, por lo que, a fin de aumentar el caudal, no se considera pertinente disminuir la resistencia al escurrimiento del sistema, dado que acelerará el mecanismo propagatorio de la crecida, ocasionando más perjuicios que beneficios sobre la certeza de la respuesta del modelo.

Un importante aspecto del pronóstico de niveles tan relevante y necesario como el valor máximo es la cuantificación de la permanencia de los niveles de agua por sobre umbrales prefijados como críticos. En el sitio RTU20 se ha establecido previamente, con base en inundaciones históricas, que cuando los niveles de agua superan los 2.00 m, se alcanza un estado de alerta inicial o amarillo; cuando se superan los 3.00 m, la alerta es anaranjada, y por encima de los 4.00 m, el estado de alerta es rojo.

En las crecidas modeladas en el periodo aquí reportado, sólo se ha llegado al nivel amarillo, por lo cual se testeó al modelo en su capacidad de reproducir las permanencias en horas de niveles por encima de 2.00 m en el cauce principal en el sitio RTU20. Cuantificando las diferencias entre permanencias observadas y calculadas, el modelo pronosticó permanencias 25% superiores a las observadas, considerando todas las tormentas. En cambio, si se descartan los tres eventos con resultados regulares, la sobreestimación llega al 12%, considerada aceptable.

Si se analizan los resultados obtenidos al aplicar la corrección en línea de los niveles cada seis horas en la sección del RTU20 (cuadro 3 y figura 6), los valores máximos de los errores EPNM, ECM y EAM en todas las tormentas decrecen a 8.4%, 0.14 m y 0.10 m, respectivamente. A pesar de ser una técnica elemental de corrección, los resultados mejoran de forma significativa.

En cuanto al tiempo de cálculo, se determina que la relación entre el tiempo neto de cálculo y el tiempo modelado es de 1/30. Esta relación es muy beneficiosa, pues permite pronosticar los niveles para las próximas 24 horas en menos de una hora de modelación. No obstante la experiencia de uso del modelo hasta la fecha, indica que el primer pronóstico se determina a dos horas de finalizada la lluvia, con lo que el lapso de anticipación al primer máximo que produce la crecida es del orden de cinco a siete horas, y para el segundo máximo es de 20 a 22 horas. Se evidencia que de presentarse una situación de probable desborde masivo del curso de agua asociado con el primer máximo de la crecida, los tiempos para informar a la población y ejecutar las respectivas operaciones de evacuación son críticos, en tanto que para un probable desborde a consecuencia del segundo máximo que produce la crecida, los tiempos son compatibles con las respectivas acciones por llevar a cabo por los organismos públicos de defensa civil.

Conclusiones

Se han presentado los resultados obtenidos a partir de la operación del modelo VMMHH 1.0 de simulación hidrológica-hidráulica, físicamente basado, de parámetros distribuidos cuasi-2D, utilizado para el pronóstico en tiempo real de la evolución de los niveles de agua en la cuenca hidrográfica de llanura del arroyo Ludueña, en la provincia de Santa Fe, Argentina, durante el periodo 2008-2010. Se evaluó la respuesta del modelo en 13 eventos de lluvias moderadas. Estuvieron involucradas lluvias totales medias areales entre 36 y 120 mm, con valores de lluvias netas que se valorizaron entre 12 y 37 mm, y duraciones de los periodos lluviosos entre 2 y 24 horas. En cuanto a los estados de condición antecedente, presentes en las distintas tormentas, variaron desde estados de saturación relativa (S_e), propios de cuenca prácticamente seca hasta saturada, hasta valores areales medios entre 0.11 y 0.87.

Los niveles máximos calculados han presentado una aproximación satisfactoria a los valores observados en un sitio cercano al cierre de la cuenca. A medida que pueda disponerse de datos desde la mayoría de los sensores limnimétricos de forma simultánea, se podrá avanzar en la confiabilidad de los resultados. Los caudales inferidos en la sección de control de la cuenca, a partir de relaciones $H-Q$ y de aforos realizados durante los eventos, presentaron un valor máximo de 130 m³/s, no registrándose en este periodo desbordes masivos. Si bien la red de toma de datos en línea fue diseñada con nueve estaciones limnigráficas, no se han podido registrar tormentas con mediciones simultáneas en todos las estaciones. En el único punto donde se ha contado con registros de todos los eventos ocurridos a la fecha es en la sección de control de la cuenca, por lo que la mayor certeza sobre la respuesta del modelo se presenta en tal sección de control. Los resultados indican un aceptable grado de representación del escurrimiento superficial, en término de niveles, caudales y

volúmenes en el punto de cierre de la cuenca, donde la aproximación entre niveles máximos observados y pronosticados establece un promedio de los valores absolutos de los EPNM del 10.8%. En lo que respecta a caudales y volúmenes escurridos, el promedio de los valores absolutos de los errores porcentuales de los máximos fue de 20%. El modelo reproduce también de manera satisfactoria los tiempos característicos de la onda de crecida.

En lo que respecta a un mejoramiento de la correlación entre niveles observados y calculados, se ha comprobado que es deseable realizar simples correcciones en línea. El sencillo procedimiento aquí reportado, involucrando un patrón de corrección cada seis horas, da como resultado un notable mejoramiento, alcanzándose valores límites de EPNM, ECM y EAM de 8.4%, 0.14 m y 0.10 m, respectivamente, en la sección de cierre de la cuenca.

La grilla espacial cuadrangular adoptada ha significado una notable ventaja para intercambiar información y resultados desde y hacia sistemas de información geográfica en formato raster, pero teniendo la desventaja de la necesidad de demasiados elementos en zonas del dominio espacial donde no redundan en mayor precisión del cálculo de las variables hidráulicas. No obstante, considerando la dinámica propagatoria del sistema hídrico, el tamaño de la cuenca (740 km²), el tamaño de grilla empleada (250 m), el costo computacional y el tiempo de cálculo para la simulación de pronósticos de niveles para 12, 24 o 48 horas, no resulta una desventaja que influya sobre la elaboración de los pronósticos. La relación tiempo de cálculo *versus* tiempo de prototipo, adoptando un $dt = 5$ s, es 30, por lo que puede considerarse totalmente adecuado para un modelo hidrológico-hidráulico aplicado al pronósticos de niveles en cuencas de llanuras con características como la aquí estudiada.

Se concluye además que la mayor incertidumbre en los resultados en las tormentas simuladas se relaciona con la limitada representación del campo areal de precipitaciones por los pluviógrafos existentes y disponibles en cada tormenta (tres a cuatro funcionando por

evento). De la experiencia recogida a la fecha desde la operación del modelo y un análisis de sensibilidad, surge la necesidad de contar con datos de lluvia en forma simultánea y en línea en al menos 10 sitios. En este sentido, se estima a futuro mejorar la descripción de la distribución espacial de la lluvia, a partir de información proveniente de dos radares meteorológicos ubicados a algo menos de 150 km de la cuenca.

En lo que concierne a la información de humedad antecedente, se evidencia una mayor incertidumbre cuando las condiciones son cercanas a la de "cuenca seca" ($Se < 0.50$). En términos medios puede concluirse que considerando un margen de humedad antecedente del +20% por sobre el valor determinado con el IPA, el rango de los volúmenes de escorrentía estimados y observados se aproximan en forma satisfactoria.

Debido al notorio nivel de cambios en la morfología de la red de canales por la ejecución de obras de canalización que se están llevando a cabo, es muy recomendable el continuo seguimiento de la constitución del modelo para la adecuada actualización de las dimensiones de la red de canales constituida.

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento aportado para la realización de los trabajos por el MASPMA (Santa Fe) y por el proyecto PID UNR ING237 19/I263. Además, se agradece la información brindada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

Recibido: 05/06/11
Aceptado: 16/07/12

Referencias

- ARDUINO, G., REGGIANI, P., and TODINI, E. Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 9, No. 4, 2005, pp. 280-284.
- BASILE, P., RICCARDI, G., ZIMMERMANN, E., and STENTA, H. Simulation of erosion-deposition processes

- at basin scale by a physically-based mathematical model. *International Journal of Sediment Research*. Vol. 25, No. 2, 2010, pp. 91-109.
- BRAS, R.L. and GARROTE, L. A distributed model for real-time flood forecasting digital elevation models. *Journal of Hydrology*. Vol. 167, 1995, pp. 279-306.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Modelo matemático determinístico para pronóstico de crecientes en cuencas rurales. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. IX, núm. 1, 1994, pp. 43-62.
- CUNGE, J. *Two Dimensional Modeling of Flood Plains*. Cap.17 Unsteady flow in open channels. Mahmood, K. and Yevjevich, V. (editors). Fort Collins: Water Resources Publications, 1975, pp. 705-762.
- CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R. y WAYS, L.M. *Hidrología Aplicada*. Bogotá: MacGraw-Hill, 1994, 554 pp.
- DE ROO, A.P.J., WESSELING, C.G., and VAN DEURSEN, W.P.A. Physically based river basin modelling within a GIS: The LISFLOOD model. *Hydrological Processes*. Vol. 14, 2000, pp. 1981-1992.
- GARCÍA-BARTUAL, R. Herramientas de predicción a corto plazo de caudales de crecida. *Jornadas sobre sistemas de ayuda a la decisión ante problemas hidráulicos e hidrológicos en tiempo real*. Madrid: CEDEX, 2002. pp. 208-231.
- GOSWAMI, M., O'CONNOR, K., BHATTARAI, K., and SHAMSELDIN, A. Assessing the performance of eight real-time updating models and procedures for the Brosna River. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 9, No. 4, 2005, pp. 394-411.
- HORRIT, M.S. and BATES, P.D. Predicting floodplain inundation: Raster-based modeling versus the finite element approach. *Hydrological Processes*. Vol. 15, 2001, pp. 825-842.
- HSU, M.H., FU, J.C., and LIU, W.C. Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River, Taiwan. *Journal of Hydrology*. Vol. 283, 2003, pp. 267-280.
- INTA. *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Tomo II. Proyecto PNUD Argentina 85/019. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca, 1990, 677 pp.
- JASPER, K., GURTZ, J., and LANG, H. Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*. Vol. 267, 2002, pp. 40-52.
- JULIEN, P. and SAGHAFIAN, B. CASC2D user's manual - A two dimensional watershed rainfall-runoff model. Civil Eng. Report, CER90-91PYJ-BS-12. Fort Collins: Colorado State University, 1991.
- LAMBERTI, P. and PILATI, S. Flood propagation models for real-time forecasting. *Journal of Hydrology*. Vol. 175, 1996, pp. 239-265.
- LIU, Z., MARTINA, M. and TODINI, E. Flood forecasting using a fully distributed model: application of the TOPKAPI model to the upper Xixian catchment. *Hydrology & Earth System Sciences*. Vol. 9, No. 4, 2005, 347-364.
- OGDEN, F.L., SHARIF, H.O., SENERATH, S.U.S., SMITH, J.A., BAECK, M.L., and RICHARDSON, J.R. Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997. *Journal of Hydrology*. Vol. 228, 2000, pp. 82-100.
- RENTERÍA, J., GARCÍA P., RICCARDI G., ZIMMERMANN, E., STENTA, H., SCUDERI, C. y BASILE, P. *Software de pronóstico de alerta contra inundaciones en las cuencas de los arroyos Ludueña y Saladillo (Santa Fe, Argentina)*. XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Argentina, vol. 1, CD, núm. T53, 2009, 12 pp.
- RICCARDI, G. *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica Cuasi-2D Multicapa para Ambientes Rurales y Urbanos*. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina, vol. II, 2000, pp. 159-168.
- RICCARDI, G., ZIMMERMANN, E., BASILE P., STENTA H., SCUDERI, C. y RENTERÍA, J. *ReHidrología y Modelo de Pronósticos arroyos Ludueña y Saladillo*. Informes de Avance 1, 2, 3 y 4. Rosario, Argentina: Convenio FCEIA-MASP, 2009, 583 pp.
- SCUDERI, C., RICCARDI, G. y ZIMMERMANN, E. *Pronóstico preliminar de crecidas en tiempo pseudo real en una cuenca de llanura*. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, 2006, 10 pp.
- SINGH, R. *Real time flood forecasting – Indian experiences*. International G-WADI Modeling Workshop, National Institute of Hydrology, Roorkee, India, 2005, 34 pp.
- STENTA, H., RENTERÍA, J. y RICCARDI, G. *Plataforma Computacional para Gestión de Información en la Simulación Hidrológica-Hidráulica del Escurrimiento Superficial*. XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza, Argentina, vol. 1, CD, núm. T74, 2005, 13 pp.
- STENTA, H., RICCARDI, G. y BASILE, P. Influencia del grado de discretización espacial en la respuesta hidrológica de una cuenca de llanura mediante modelación matemática distribuida. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXIII, núm. 3, julio-septiembre de 2008, pp. 123-138.
- ZIMMERMANN, E., SCUDERI, C., RICCARDI, G., STENTA, H., BASILE, P., GARCIA, M. y RENTERÍA, J. *Asignación de parámetros hidráulicos de suelos utilizando composición textural, características físicas y estratigráficas*. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, vol. 1, CD, 2008, 10 pp.
- ZIMMERMANN, E., BASILE, P., LÓPEZ, C., RICCARDI, G., STENTA, H., SCUDERI, C. y RENTERÍA, J. *Condiciones antecedentes para la tormenta de diseño en el área del gran Rosario*. XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Argentina, vol. 1, CD, núm. T201, 2009, 11 pp.

Abstract

RICCARDI, G., STENTA, H., SCUDERI, C., BASILE, P., ZIMMERMANN, E. & TRIVISONNO, F. Application of a hydrological-hydraulic model for real-time water level forecasts. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 1, January-March, 2013, pp. 83-105.

The application of a hydrological-hydraulic model to generate real-time water level forecasts is described. The model is physically based and spatially-distributed, simulating rainfall-flow processes and surface runoff propagation in a quasi-2D form in rural and urban environments. The application was performed in the flat basin of the Ludueña Creek (Santa Fe, Argentina). The model was constituted, calibrated and validated in the year 2008, and was later used during 13 rainy events to generate real-time forecasts of water levels, flows and runoff and storage volumes in locations characteristic of the spatial domain. The results indicate an acceptable degree of representation of surface runoff in the closed basin, where the average of the absolute values for percentage error between maximum observed and calculated levels is 10.8% and 20 % in terms of flows and volumes, respectively. In addition, acceptable results have been reached for reproducing the general shape of flood waves as well as forecasting water levels remaining at previously established alert thresholds.

Keywords: physical modeling, hydrological alert, level forecasting.

Dirección institucional de los autores

Dr. Gerardo Riccardi

Profesor adjunto, investigador CIC-CIUNR
Universidad Nacional de Rosario
Riobamba 245 bis
2000 Rosario, ARGENTINA
Teléfono: +54 (341) 4808 541
riccardi@fceia.unr.edu.ar

Dr. Hernan Stenta

Docente investigador
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Riobamba 245 bis
2000 Rosario, ARGENTINA
Teléfono: +54 (341) 4808 541
hstenta@fceia.unr.edu.ar

M.C. Carlos Scuderi

Docente Investigador
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Riobamba 245 bis
2000 Rosario, ARGENTINA
Teléfono: +54 (341) 4808 541
cscuderi@fceia.unr.edu.ar

Dr. Pedro Basile

Profesor adjunto
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Riobamba 245 bis, 2000 Rosario, ARGENTINA
Teléfono: +54 (341) 4808 541
pbasile@fceia.unr.edu.ar

Dr. Erik Zimmermann

Profesor adjunto
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario.
Riobamba 245 bis, 2000 Rosario, ARGENTINA
Teléfono: +54 (341) 4808 541
erikz@fceia.unr.edu.ar

Ing. Franco Trivisonno

Becario de Investigación
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Riobamba 245 bis
2000 Rosario, ARGENTINA
Teléfono: +54 (341) 4808 541
franco.trivi@gmail.com