



Hacia la Constitución de un Sistema de Alerta Hidrológico en el área del Gran Rosario. Experiencias aprendidas

Carlos Scuderi^{1,2}, Gerardo Riccardi^{1,3}, Erik Zimmermann^{1,2}, Pedro Basile¹, Hernán Stenta¹, Juan Rentería¹ y María Ciabattari¹

¹Departamento de Hidráulica y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³CIC-CIUNR. Universidad Nacional de Rosario

Riobamba 245 bis, (2000), Rosario, Santa Fe, Argentina

Telefax: +54-341-4808541 - Mail de contacto: cscuderi@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

La autoridad hídrica provincial gestionó la instalación de una red de sensores para registro de variables hidrológicas en tiempo real en la zona del Gran Rosario (Santa Fe, Argentina). Junto a esta tarea, también encargó el desarrollo de un modelo de pronóstico de niveles. En este trabajo se presenta la estructura de dicho modelo y los resultados obtenidos hasta el presente. La arquitectura comprende diferentes módulos: (a) generación de lluvia; (b) determinación del estado de humedad antecedente; (c) cálculo de pérdidas por infiltración; y (d) transformación lluvia-caudal y pronóstico de niveles. El desempeño del modelo propuesto fue satisfactorio, medido en términos de comparación entre limnigramas observados y simulados. Los eventos de mediana magnitud ocurridos evidencian cierta sensibilidad de los resultados respecto al estado antecedente de la cuenca; manifestando la tendencia de que cuanto más importante es el evento o mayor es la humedad antecedente, los resultados presentan mayor certidumbre.

Palabras claves: Sistemas de alerta, Modelos distribuidos, Pronóstico de niveles

ABSTRACT

The provincial water authority managed the installation of a real-time sensor network to record hydrological variables in the area of Rosario (Santa Fe, Argentina). This authority also commissioned the development of a forecasting model. This paper presents the structure of the model and the results obtained. The architecture consists of different modules: (a) rain generator, (b) determination of the antecedent moisture condition, (c) calculation of infiltration losses, and (d) rainfall-runoff and forecasting model. The proposed model's performance was satisfactory in terms of comparison between observed and simulated water levels. Medium-scale events occurred show some sensitivity of results to the antecedent moisture condition of basin, showing the trend that more important is the event or greater the antecedent moisture, results are more accurate.

Keywords: warning systems, distributed models, forecasting levels

Introducción

La región del Gran Rosario situada en el sur de la provincia de Santa Fe (Argentina) alberga uno de los principales centros urbanos del país. Este sector, perteneciente a la Pampa húmeda, presenta una topografía sumamente plana con escasas pendientes y suelo de tipo arcilloso-limoso con permeabilidad moderada a moderadamente lenta. Estas particularidades sumadas al incremento en la densidad poblacional y a la impermeabilización de los suelos, debido a prácticas agrícolas intensivas y al auge de los emprendimientos inmobiliarios privados, incrementan la producción de escurrimiento superficial generando mayores

condiciones de vulnerabilidad frente a las inundaciones. Razón por la cual la protección de la población, generalmente de sectores marginados que ocupan los márgenes de los cursos de agua, como de bienes materiales cobra cada vez mayor importancia.

Las autoridades hídricas provincial y municipal han ejecutado varias obras; como una presa de atenuación de crecidas, una serie de conductos aliviadores y varios tramos de canalizaciones. En cuanto a las acciones no estructurales, se destaca la definición de mapas de inundación que han servido como base para legislar sobre el uso de la tierra (Riccardi et al., 1997 y 2001). Otra medida de tipo no estructural es la puesta en marcha, a

partir del año 2007, de una red de sensores para registro de precipitación y niveles en secciones características de los cursos de la región. Junto a ello, se encargó la realización de un modelo de pronóstico de crecidas para la constitución de un Sistema de Alerta contra inundaciones a tiempo real a ser implementado en la cuenca del arroyo Ludueña.

Los sistemas de alerta a tiempo real permiten el seguimiento de las variables hidrológicas (principalmente lluvia y niveles) junto con la elaboración de pronósticos de la evolución de niveles. Aldana Valverde (2002) indica las premisas a cumplir en modelación de sistemas de alerta para ser utilizada en tiempo real: (a) sencillez de operación, (b) precisión de resultados, (c) tiempo de ejecución breve y (d) capacidad de autocalibración de parámetros.

Respecto a la conceptualización del modelo matemático a utilizar en alerta de crecidas, pueden ser considerados modelos distribuidos o concentrados (Hsu et al., 2003). Los primeros, físicamente basados, son aptos para representar los mecanismos internos que se desarrollan en la cuenca durante el transcurso de una crecida (Ogden et al., 2000). Presentan como contrapartida, la cantidad de datos requeridos para su funcionamiento, el recurso computacional necesario y el tiempo de cálculo. Los modelos agregados o concentrados al no considerar las leyes físicas que operan en la cuenca, relacionan la precipitación caída con el nivel de agua en los cursos de manera simplificada (Kothyari y Singh, 1999). En cuanto a la velocidad de cálculo, los modelos concentrados pueden resultar más eficientes debido a la simplicidad en su constitución. La falencia de estos modelos es no permitir considerar la variabilidad espacial de las precipitaciones ni la heterogeneidad de la cuenca.

Aplicaciones prácticas de modelos distribuidos a pronóstico de crecidas fueron hechas por Cabral et al. (1990) citado por Bras y Garrote (1995) y Hsu et al. (2003). Por otro lado, aplicaciones de modelos concentrados fueron hechas por Kothyari y Singh (1999) y Bruen y Yang (2005). En Argentina, Caamaño Nelli et al. (1998) utilizaron tres modelos de tipo producto de potencias. Localmente, Scuderi et al. (2006, 2007) utilizaron un modelo hidrológico-hidráulico distribuido para predicción de crecidas del arroyo Ludueña.

El objetivo de este trabajo es presentar la configuración del modelo de pronóstico de niveles, su puesta en operación, calibración y explotación en eventos lluviosos; aplicado a la cuenca del arroyo Ludueña.

Metodología

Cuenca de estudio

La cuenca del Aº Ludueña (Fig. 1) se sitúa entre los paralelos 32º 45' y 33º 08' S y los meridianos 61º 04' y 60º 39' O. La red hídrica se compone del Aº Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat con sus tributarios, con una longitud de 140 Km. Alcanzando en épocas lluviosas una longitud de 370 Km por la agregación de cursos intermitentes. El área de aporte es de 740 Km² y su elevación varía entre 70 m y 18 m sobre el nivel del mar. El caudal base del Aº Ludueña es de 0.5 m³.s⁻¹, alcanzando los 80 m³.s⁻¹ en crecidas ordinarias y caudales superiores a los 400 m³.s⁻¹ en eventos extraordinarios (R > 50 años, Riccardi et al., 2002). El suelo presente es de tipo arcilloso-limoso con permeabilidad moderada a moderadamente lenta (INTA, 1983), y pendiente media del orden de 1.5 m.Km⁻¹. La precipitación media anual es de 960 mm (SMN, 2008). Los centros urbanos ocupan una superficie estimada de 35 Km²; mientras que la región se encuentra atravesada por numerosas vías de comunicación viales y ferroviarias con una extensión del orden de 220 Km. La agricultura constituye el principal uso del suelo, destacándose el cultivo de soja, maíz y trigo.

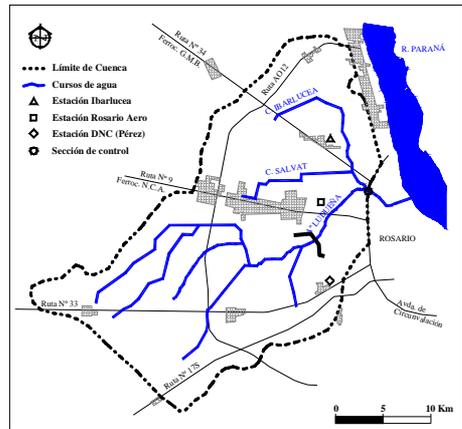


Fig. 1. Cuenca del Aº Ludueña.

Inundaciones y obras en la región

En la zona del Gran Rosario se han producido inundaciones en forma periódica, aprox. cada 20 años; cabe destacar entre los últimos eventos el desborde del Aº Ludueña en el año 1986 que afectó unas 2000 ha y 80000

habitantes (Riccardi et al., 2001) y el evento del año 2007. Durante este último, ocurrido entre el 26 y 30 de marzo del 2007, se registraron 365 mm. La tormenta, $R > 500$ años, estuvo asociada a una cota alta del río Paraná (cuerpo receptor del A° Ludueña) que actuó de tapón hidráulico; poniendo a prueba las obras de evacuación existentes (Riccardi, 2007).

Estos hechos han llevado a las autoridades a ejecutar un conjunto de obras hidráulicas, ampliando la capacidad de evacuación desde $75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $285 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en prácticamente un lapso de 50 años. Conjuntamente, en el año 1996 se terminó de construir una presa de retención de crecidas que regula el caudal del 53% del área de la cuenca. Recientemente, las autoridades han comenzado a estudiar la implementación de medidas no estructurales como por ejemplo la generación de mapas de inundación para regulación del suelo (Riccardi et al., 1997 y 2001).

A comienzos del año 2007 se instalaron en la cuenca 4 sensores pluviométricos y 11 limnimétricos que transmiten en forma automática con intervalo de 15 minutos. Esta información junto con la actualización de las condiciones físicas e hidráulicas de la cuenca y la implementación de un modelo de pronóstico de niveles, constituyen el inicio para la puesta en marcha de un Sistema de Alerta contra inundaciones a tiempo real. Los datos pluviométricos fueron contrastados con la estación Rosario Aero (SMN) resultando que todas las estaciones miden por debajo de la estación de testeo, en un rango que varía entre 24% y 14% en menos. Los sensores limnimétricos han sido sometidos a situaciones de vandalismo como rotura de cables, robo de las fuentes de alimentación o de los sensores. Un análisis pormenorizado del desempeño de los sensores puede ser consultado en Scuderi et al., 2009.

Modelo de pronóstico de niveles

El modelo de pronóstico de niveles fue desarrollado por el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario (Riccardi et al., 2008 y 2009) en el marco de un convenio celebrado entre la autoridad hídrica provincial y la mencionada institución. El mismo consta de 4 módulos que serán detallados a continuación:

Módulo generador de precipitación distribuida

Utiliza los datos de la red de sensores pluviométricos para asignar a cada unidad de discretización el valor de lluvia correspondiente

por medio de la metodología de polígonos de Thiessen; permitiendo el ingreso de datos en forma automática o manual; chequeando los datos e informando la aparición de inconsistencias (Rentería et al., 2009).

Módulo estimador de la condición antecedente

El estado antecedente de la cuenca al inicio de un evento constituye una de las mayores incertidumbres en el proceso del pronóstico de niveles; para este trabajo, Zimmermann (2009) propuso utilizar el Índice de Precipitación Antecedente (IPA). Este parámetro es función de la precipitación total caída el día anterior y de un coeficiente de decaimiento k que depende del día del año. El IPA fue limitado por los valores de 114 mm y 288 mm, correspondientes a la lámina equivalente del punto de marchitez permanente (R_{PMP}) y de saturación (R_{SAT}) respectivamente.

Módulo para cálculo de pérdidas por infiltración

Para considerar el término de infiltración se adoptó el método de Green y Ampt, el cual permite calcular la tasa de infiltración f [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$] y la profundidad acumulada de agua infiltrada en función del tiempo F [mm] a partir de los parámetros: (a) conductividad hidráulica vertical del suelo K [$\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$], (b) potencial de succión del suelo en el frente húmedo ψ [mm], (c) porosidad η , y (d) humedad inicial θ_i (Chow et al., 1994). El parámetro K de cada asociación de suelo fue calculado según la metodología presentada en Zimmermann et al. (2008), siendo identificadas 14 asociaciones y obteniendo un valor de K medio para la cuenca de $100 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$. El parámetro ψ fue calculado utilizando los coeficientes de la curva de Van Genuchten α y n , obtenidos a partir de datos de composición textural y características físico-químicas de cada asociación (Rawls et al., 1983). Zimmermann et al. (2009) vinculó el IPA con Se mediante la siguiente fórmula:

$$Se = \frac{IPA_n - R_{PMP}}{R_{SAT} - R_{PMP}} \quad (1)$$

Módulo de transformación lluvia-escurrentía y pronóstico de niveles

El modelo de transformación lluvia caudal utilizado para pronóstico de niveles es un modelo hidrológico-hidráulico distribuido desarrollado por Riccardi (2000) y denominado CTSS8, basado en el esquema de celdas interconectadas propuesto por Cunge. El

modelo permite el análisis de escurrimiento cuasi-bidimensional; considerando en cada unidad de discretización precipitación, pérdidas por interceptación, infiltración, almacenamiento superficial, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. La información requerida por el modelo es la topografía de la cuenca; las características geométricas, físicas e hidráulicas de los cursos, terraplenes y obras de arte como alcantarillas y puentes; nivel de agua inicial en cada celda; hietograma neto de la tormenta; pérdidas iniciales; y condición de borde en la sección de control. Conjuntamente con el modelo, se utilizó la plataforma para entrada e interpretación de datos denominada Simulaciones 2.0 (Stenta et al., 2005).

La información topográfica se concentra en un Modelo Digital de Terreno (MDT) que ha tenido sucesivas evoluciones (Riccardi, 2000; Riccardi et al., 2002; Stenta, 2008; Riccardi et al., 2008 y 2009), estando la información georreferenciada en el sistema Gauss Krugger Faja 5 (Posgar 94). El MDT de la cuenca está constituido por una grilla ortogonal regular con elementos de 250 m x 250 m (Fig. 2), siendo algunos valores característicos: (a) dominio de 11855 elementos y 23370 vinculaciones; (b) 1510 elementos para los cursos de agua; (c) 845 vinculaciones terraplén y 114 vinculaciones alcantarilla y puente.

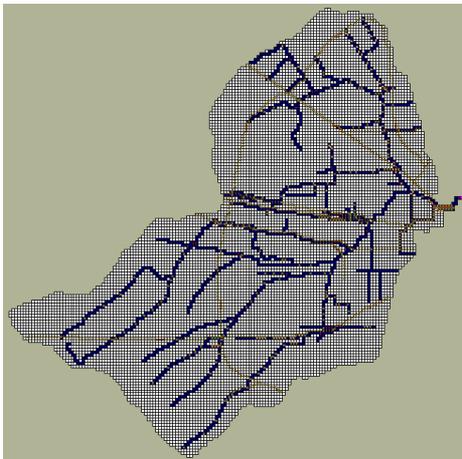


Fig. 2. MDT de la cuenca del Aº Ludueña.

Los cursos presentan los siguientes valores de base de fondo (BF) y profundidad (P), Aº Ludueña: BF desde 8 a 25 m y P desde 3.5 a 5 m; canal Ibarlucea: BF entre 7 y 35 m y P entre 1.5 y 5 m; y canal Salvat: BF desde 2 a 3 m y P

desde 1.5 a 2.5 m. El coeficiente de rugosidad de Manning propuesto para los cursos fue de 0.028 a 0.033, mientras que para el valle el mismo estuvo entre los valores de 0.080 y 0.120 (Riccardi, 2000; Riccardi et al., 2001, 2002; Stenta, 2008).

Protocolo para pronóstico de niveles

El protocolo de trabajo para pronóstico de niveles ante un evento puede ser descrito como sigue: (a) descarga de registros pluviométricos y consistencia de los mismos; (b) determinación a partir de los registros anteriores, por metodología de Thiessen, de la lámina total correspondiente a cada elemento de la cuenca; (c) estimativa de la condición de humedad antecedente, a partir del IPA; (d) cálculo de la lámina de lluvia neta en cada elemento del dominio, utilizando la metodología de Green-Ampt; (e) asignación de alturas iniciales en cada elemento del dominio; (f) identificación de la cota del río Paraná, condición de borde aguas abajo de la sección de control; (g) ejecución del modelo matemático hidrológico-hidráulico para predicción de niveles; (h) identificación de los niveles en secciones características y comparación con los valores registrados por los limnímetros; (i) optativo: planteo de otras condiciones de humedad antecedente, nuevos pronósticos de niveles y comparaciones con los datos medidos. Las etapas (a) a (d) son efectuadas por el módulo GEH (Rentería et al., 2009).

Selección de tormentas y generación de lluvia neta

Durante el período comprendido entre el 01/07/2007 y el 31/07/2009 no se presentaron episodios importantes que produjeran inundaciones en la cuenca; no obstante en la Tabla 1 se muestran los 5 mayores eventos seleccionados para este trabajo. En dicha tabla ROS indica la estación Rosario Aero (testeo), mientras que las restantes pertenecen a la red telemétrica, ROL: Roldán, IBA: Ibarlucea, PER: Pérez, y ZAV: Zavalla.

Tabla 1. Eventos seleccionados.

Fecha	ROS	ROL	IBA	PER	ZAV
29/11/08	116	7	46	80	53
02/02/09	88	57	38	95	102
10/02/09	62	60	52	89	70
20/02/09	86	66	65	62	87
03/03/09	111	85	86	97	89

El cálculo de la tasa de infiltración presentó cierta incertidumbre que fue acotada testeando algunas metodologías con el propósito de obtener el mejor ajuste al comparar los valores pronosticados con los registros limnimétricos (Riccardi et al., 2009). La mejor estimativa de niveles se obtuvo para: pérdida inicial de 9 mm; factor de modificación para K igual a 0.80 y factor de modificación para ψ de 0.90. El parámetro Se fue utilizado para generar dos pronósticos, uno de mínima (factor multiplicador de Se = 1.0) y otro de máxima (factor multiplicador de Se = 1.3); contemplando de esta forma la incerteza asociada a la condición antecedente. En la Tabla 2 se presentan la precipitación en Rosario Aero, la precipitación media en toda la cuenca calculada con los sensores, la condición antecedente utilizada y los valores mínimo y máximo de precipitación neta asociados a la aplicación de los parámetros mencionados precedentemente.

Tabla 2. Lluvia media, IPA y lluvia neta.

Fecha	ROS	Pmed	IPA	Pneta
29/11/08	116	50.2	202	11 / 19
02/02/09	88	74.1	155	11 / 18
10/02/09	62	66.2	215	11 / 19
20/02/09	86	72.4	250	12 / 21
03/03/09	111	88.5	263	23 / 39

Resultados

Se presentan los pronósticos en 4 secciones (limnímetros RTU_18 Presa Embalse, RTU_25 Ibarlucea Camping, RTU_26 Ibarlucea R34S y RTU_28 Embocadura) para los eventos del 10/02/09 en la Fig. 3 y del 20/02/09 en la Fig. 4; representando en línea continua el limnograma medido, en línea de trazo corto el pronóstico de mínima y en línea de trazo largo el pronóstico de máxima.

En las Tablas 3 y 4 se presentan las diferencias entre nivel máximo medido y pronosticado para la condición de mínima y de máxima (dif H, en metros) junto con las diferencias entre tiempo de pico del limnograma medido y los pronósticos de mínima y de máxima (dif T, en horas). Para cada sensor, el primer renglón de datos corresponde al pronóstico de mínima mientras que el segundo corresponde al de máxima. Los pronósticos fueron evaluados a través de los índices coeficiente de determinación R^2 y raíz del error cuadrático medio RMSE, siendo calculados hasta el registro del nivel máximo para cada limnograma.

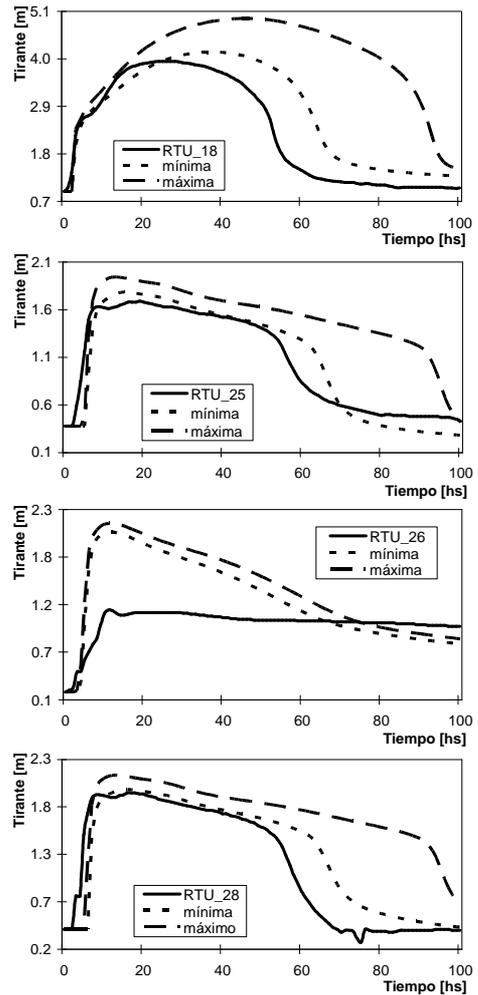


Fig. 3. Resultados para el evento del 10/02/09.

Tabla 3. Parámetros para el 10/02/09.

Sensor	dif H	dif T	R^2	RMSE
18	0.05	10	0.98	0.18
	0.60	19	0.98	0.30
25	0.08	-4	0.84	0.26
	0.21	-7	0.89	0.28
26	0.90	0	0.87	0.74
	1.00	0	0.86	0.84
28	0.04	-1	0.71	0.44
	0.18	-3	0.83	0.34

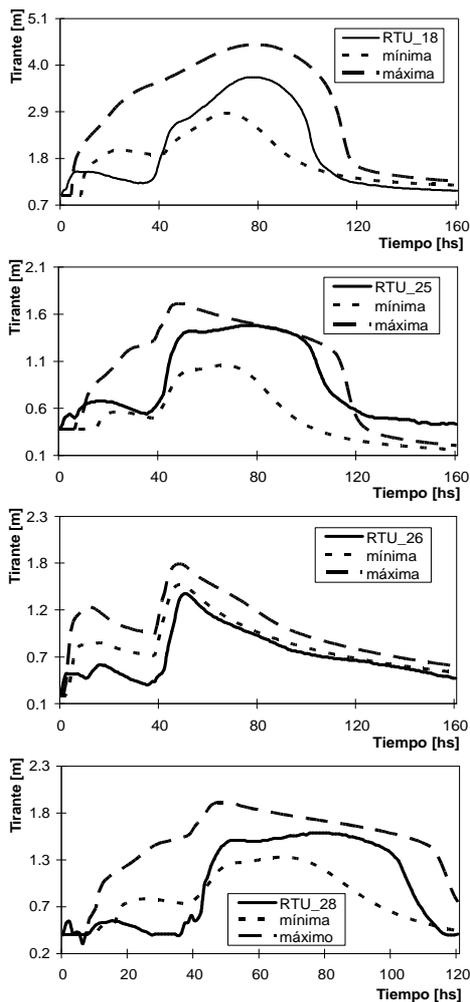


Fig. 4. Resultados para el evento del 20/02/09.

Tabla 4. Parámetros para el 20/02/09.

Sensor	dif H	dif T	R ²	RMSE
18	-1.01	- 9	0.71	0.53
	0.76	2	0.60	1.36
25	-0.46	- 9	0.96	0.28
	0.05	-26	0.62	0.41
26	0.11	- 2	0.72	0.33
	0.34	- 3	0.61	0.62
28	-0.33	- 11	0.82	0.24
	0.16	-29	0.53	0.62

La diferencia de niveles máximos (dif H) es positiva cuando el valor pronosticado es mayor que el medido, mientras que para los tiempos de pico (dif T) la diferencia es positiva cuando el pico del limnigrama pronosticado es posterior al pico medido.

Si bien las simulaciones no fueron realizadas en tiempo real, el protocolo de trabajo descrito anteriormente sirvió para poner en práctica la metodología propuesta junto con la evaluación de la performance del modelo. Para la serie de eventos analizados, pudo observarse que el modelo distribuido ha presentado un buen comportamiento en cuanto a la generación de resultados y al tiempo de cálculo (aproximadamente 11 minutos para 100 horas de pronóstico). En general la forma de los limnigramas y el valor y tiempo asociados con el nivel máximo medido son reproducidos en forma adecuada dentro del rango de pronósticos realizado por el modelo.

El valor de R² medio obtenido para el evento del 10/02/09 fue de 0.87, mientras que para el evento del 20/02/09 fue de 0.70. Por otra parte, el valor de RMSE medio obtenido para el primer evento fue de 0.42 m, mientras que para el segundo evento fue de 0.55 m.

En cuanto a las diferencias en niveles medidos y pronosticados, se obtuvo una diferencia media para el evento del 10/02/09 de 0.27 m, mientras que para el evento del 20/02/09 estas diferencias se encontraron en el orden de 0.33 m. Respecto de la diferencia temporal en la ocurrencia del nivel máximo se obtuvieron los siguientes resultados: un máximo de 10 hs de retraso para el evento del 10/02/09 y un máximo de 11 hs de anticipación para el evento del 20/02/09.

Conclusiones

Para un sistema de alerta es fundamental pronosticar con la mayor certidumbre tanto el nivel máximo a que llegará el agua en una sección en particular como el tiempo en el que se producirá dicho máximo.

La experiencia en el uso del modelo matemático hidrológico-hidráulico distribuido propuesto para pronóstico de niveles en la cuenca del A^o Ludueña resultada satisfactoria. Para los eventos analizados, la forma de los limnigramas y los valores y tiempos asociados a los niveles máximos registrados son reproducidos en forma adecuada. En cuanto al tiempo de cálculo requerido, se obtuvo para un pronóstico con horizonte de 100 hs de simulación, un tiempo de alrededor de 11 minutos; siendo un tiempo más que suficiente para permitir elaborar diferentes pronósticos y

efectuar el análisis de los resultados generados. Para el periodo analizado no se registraron eventos que representaran situaciones de riesgo para los habitantes de la cuenca; sin embargo, durante el mismo se desarrolló una metodología de trabajo a ser utilizada ante el inicio de una tormenta (Riccardi et al., 2008, 2009). En cuanto a la confiabilidad de manejo y la estabilidad en el uso, tanto del modelo matemático para pronosticar niveles como del módulo informático para calcular la lluvia neta distribuida (GEH), y de la plataforma Simulaciones ha quedado evidenciado a través de numerosos testeos, depuración de errores y un intensivo uso que estos softwares desarrollados localmente son robustos, de rápida respuesta y de manejo sencillo.

La determinación de la condición antecedente para una tormenta y la capacidad de infiltración del suelo constituyen una de las mayores fuentes de incertidumbre del proceso de pronóstico de niveles. Para contemplar la incertidumbre de la condición antecedente fue propuesto el cálculo de un pronóstico de mínima (factor multiplicador de $Se = 1.0$) y otro de máxima (factor multiplicador de $Se = 1.3$). Por otra parte, la variabilidad en la distribución areal de la lluvia debe ser considerada, para lo cual se propone incrementar la cantidad de sensores mejorando así la representatividad espacial del evento y poder llegar a registrar mejor los máximos locales.

El funcionamiento de los sensores pluviométricos ha sido adecuado, sin embargo ya que todos los sensores miden por debajo de la estación de testeo Rosario Aero (hasta un 24% en menos) se recomienda la verificación de los mismos. Los sensores limnimétricos han estado frecuentemente sometidos a acciones de vandalismo (robo de paneles solares y sensores, corte de cableado eléctrico, etc.), presentando además algunas fallas en el registro de los datos.

Acerca de las variables que pueden ser estimadas en campo, como por ejemplo el contenido de humedad del suelo, la variación de los coeficientes de rugosidad de Manning para el valle y los cursos de agua a lo largo del año, y el grado de cobertura del suelo; se incentiva a implementar el seguimiento sistemático de las mismas. Además se demuestra que los cambios en la configuración física e hidráulica de la cuenca se producen cada vez con mayor velocidad, de aquí la importancia de invertir en campañas de recolección de datos en campo.

Como reflexión final, pero no menos importante, se indica que la puesta a punto de

un sistema de alerta en cuencas de llanura con escasa pendiente exige conocer en forma detallada, además de la configuración física e hidráulica de la cuenca, las constantes modificaciones introducidas por el hombre como terraplenamientos, canalizaciones, urbanizaciones; las cuales repercuten sobre el escurrimiento superficial y por consiguiente en la generación de posibles desbordes de cursos. Otro aspecto a considerar es lograr una serie de registros pluviométricos y limnimétricos que sean consistentes y de larga duración, para poder efectuar pronósticos con incertidumbre mas acotada y además permitir el análisis de crecidas pasadas. Solo el compromiso de todos los actores involucrados (gubernamentales, privados y sociales) logrará que se arribe a un Sistema de Alerta confiable y estable en el tiempo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el ámbito de una beca de doctorado financiada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y de un Proyecto de Investigación Orientado PICTO 2004 n° 23187 financiado por el FONCyT. Los autores agradecen al personal del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de Rosario y del Ministerio de Ministerio del Agua, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Pcia. de Santa Fe.

Referencias

- Aldana Valverde, A. L. 2002. Planificación, diseño y utilización de herramientas de ayuda a la toma de decisiones en tiempo real. *Jornadas sobre Sistemas de Ayuda a la Decisión ante Problemas Hidráulicos e Hidrológicos en Tiempo Real*, CEDEX, España.
- Bras, R. L. y Garrote, L. 1995 A distributed model for real-time flood forecasting digital elevation models. *Journal of Hydrology*, 167, pp. 279-306.
- Bruen, M. y Yang, J. 2005. Functional networks in real-time flood forecasting – a novel application. *Advances in Water Resources*, Vol. 18, 9, Sept. 2005, pp. 899-909.
- Caamaño Nelli, G. E.; Libovich, G. E. y Colladon, L.E. 1998. Pronóstico estadístico en tiempo real de crecidas para cursos serranos. *Congreso Nacional del Agua*, Santa Fe, Argentina.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R. y Mays, L. W. 1994. *Hidrología aplicada*. McGRAW HILL Interamericana S.A., Santafé de Bogotá, Colombia, 584 p.

- Hsu, M. H.; Fu, J. C. y Liu, W. C. 2003. Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River, Taiwan. *Journal of Hydrology*, 283, pp. 267-280.
- INTA. 1983. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Carta de Suelos de la República Argentina, Provincia de Santa Fe. Cartas varias.
- Kothyari, U. C. y Singh, V. P. 1999. A multiple-input single-output model for flow forecasting. *Journal of Hydrology*, 220, pp. 12-26.
- Ogden, F. L.; Sharif, H. O.; Senerath, S. U. S.; Smith, J. A.; Baeck, M. L. y Richardson, J. R. 2000. Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997. *Journal of Hydrology*, 228, pp. 82-100.
- Rawls, W. J.; Brakensiek, D. L. y Miller, N. 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 1, Jan 1983, pp. 62-70.
- Rentería, J. P.; García, P.; Riccardi, G.; Zimmermann, E.; Stenta, H.; Scuderi, C. y Basile, P. 2009. 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, Chubut, Argentina, 12 p.
- Riccardi, G. A. 2000. Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos. *Tesis Doctoral*, FCEfYN, UNC, Córdoba, Argentina.
- Riccardi, G. A. 2007. Reporte Técnico sobre la tormenta de marzo de 2007.
- Riccardi, G. A.; Zimmermann, E. D. y Navarro, R. 1997. Zonification of areas with inundation risk by means of mathematical modelling in the Rosario region, Argentina, *Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control*. International Association of Hydrological Sciences IAHS Publication n° 239, ISSN 0144-7815, ed. by George Leavesley et. al, IAHS Press, Wallingford, UK, pp. 123-135.
- Riccardi, G. A.; Zimmermann, E. D. y Navarro, R. 2001. Áreas inundadas en el Sistema Hídrico del A° Ludueña en Distrito Rosario. Informe de Avance 1. Convenio Municipalidad de Rosario-FCElyA, Rosario, Argentina.
- Riccardi, G. A.; Scuderi, C. M. y Stenta, H. R. 2002. Modelado de escurrimiento superficial con alto nivel de detalle en la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina. *XIX Congreso Nacional del Agua*, T33, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- Riccardi, G. A.; Zimmermann, E. D.; Basile, P. A.; Mancinelli, A. M.; Scuderi, C. M.; Rentería J. P. y García P. 2008, 2009. Rehidrología y Modelo de Simulación a Tiempo Real en Sistema de Alerta Hidrológico en las Cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo. Convenio Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura y Ministerio del Agua, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Pcia. de Santa Fe.
- Scuderi, C. M.; Riccardi, G. A. y Zimmermann, E. D. 2006. Pronóstico preliminar de crecidas en tiempo pseudo real en una cuenca de llanura. *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Ciudad Guayana, Venezuela, Octubre, 10 p.
- Scuderi, C. M.; Riccardi, G. A. y Zimmermann, E. D. 2007. Predicción de crecidas para un curso de llanura basada en un modelo hidrológico distribuido de celdas. *XXI Congreso Nacional del Agua*, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Mayo, 14 p.
- Scuderi, C. M.; Riccardi, G. A.; Zimmermann, E. D.; Basile, P. A.; Stenta, H. R.; Rentería, J. P. y Ciabattari, M. L. 2009. Sistema de alerta a tiempo real en la zona del Gran Rosario. Resultados preliminares. *XXII Congreso Nacional del Agua*, Trelew, Chubut, Argentina, 11 p.
- SMN. 2008. Servicio Meteorológico Nacional. Serie de precipitaciones diarias de la estación Rosario Aero, período 1935 a 2008.
- Stenta, H. 2008. Efectos del Tamaño de Grilla sobre la Modelación Matemática Distribuida del Escurrimiento Superficial en Cuencas de Llanura. Trabajo Inédito. *Tesis Doctoral*. FCElyA, UNR, Rosario-Santa Fe.
- Stenta, H.; Rentería, J. P. y Riccardi, G. 2005. Plataforma Computacional para Gestión de Información en la Simulación Hidrológica-Hidráulica del Escurrimiento Superficial. *XXº Congreso Nacional del Agua y IIIº Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Mendoza. ISBN 987-22143-0-1. CD-ROM Cap. Hidrología. T 74. pp 1-13.
- Zimmermann, E. D.; Scuderi, C. M.; Riccardi, G. A.; Stenta, H. R.; Basile, P. A.; García, M. L. y Rentería, J. P. 2008. Asignación de parámetros hidráulicos de suelos utilizando composición textural, características físicas y estratigráficas. *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena de Indias, Colombia, Sept 2008, 10p.
- Zimmermann, E. D.; Basile, P. A.; López, C.; Riccardi, G.; Stenta, H.; Scuderi, C. y Rentería, J. P. 2009. Condiciones antecedentes para la tormenta de diseño en el área del gran Rosario. *XXII Congreso Nacional del Agua*, Trelew, Chubut, Argentina, 11 p.