



Experiencias de simulación físicamente basada de escurrimiento superficial en cuencas de llanura en ambientes rurales y urbanos

Gerardo Riccardi^{1,2}, Erik Zimmermann^{1,3}, Pedro Basile¹, Hernán Stenta¹, Carlos Scuderi¹ C. y Juan Rentería¹

¹ CURIHAM y Departamento de Hidráulica, FCEIA, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba 245 bis (2000), Rosario, Argentina

² CIC-CIUNR, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba 245 bis (2000), Rosario, Argentina

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Mail de contacto: riccardi@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presenta una serie de aplicaciones de diversas variantes de un sistema de modelación hidrológica-hidráulica físicamente basado cuasi 2D en las que se ha utilizado esta herramienta tecnológica en la simulación a nivel de cuenca, en el mapeo de zonas inundables, en el diseño de obras de infraestructura de saneamiento, en el diagnóstico de obras de desagües existentes en ambientes urbanos, en la descripción de la base hidrodinámica a nivel de cuenca para la simulación de producción y transporte de sedimentos, como así también en la modelación de escurrimiento en grandes ríos aluviales. Los resultados obtenidos han sido completamente satisfactorio. En los casos de aplicación se ha llegado a resultados satisfactorios mostrando el modelo una apropiada capacidad de reproducción de los procesos presentes en la transformación lluvia-caudal y la propagación de flujo en cuencas de llanura y cursos de agua.

Palabras claves: modelos distribuidos, escurrimiento superficial, simulación físicamente basada.

ABSTRACT

This paper describes a series of applications of several alternatives of a hydrologic-hydraulic modeling physically based quasi-2D in which this tool is used for: the rainfall-runoff transformation on large basins, zoning of flood areas and development of legislation floodplain, the design of hydraulic structures, the diagnosis of existing drainage networks on urban environments, as well as hydrodynamic basement for the simulation of production and transport of sediments flood on large basins and large alluvial rivers. The results obtained were entirely satisfactory, showing an appropriate capability of reproduction of the real process of rainfall-runoff transformation and flow propagation.

Keywords: distributed models, flow propagation, physically based simulation.

Introducción

La generación de excedentes hídricos superficiales como la descripción de los diferentes mecanismos involucrados en su movimiento constituye uno de los principales procesos del ciclo hidrológico. Particularmente en esta región, la pampa húmeda, donde están presentes sistemas hidrológicos de llanura transicionales y no típicos, los excedentes hídricos superficiales se vinculan directamente a la generación de inundaciones.

Los primeros abordajes en la descripción de la respuesta hidrológica en cuencas se centraron en la generación de información en las secciones de control o punto de salida de la cuenca, no determinándose en su interior parámetros de flujo físicamente reales como

alturas, velocidades y caudales. A través del avance del conocimiento hoy día se cuenta con modelos y estructuras de simulación que permiten desagregar la mayoría de los procesos hidrológicos intervinientes en la transformación lluvia-caudal en unidades espaciales pequeñas. Un modelo hidrológico-hidráulico es un ensamble de descripciones matemáticas de componentes del ciclo hidrológico; la estructura y arquitectura de dicho modelo están determinadas por el objetivo para el cual el modelo es construido (Singh y Woolhiser, 2002).

Actualmente existe en el ámbito internacional, la disponibilidad de un variado grupo de modelos matemáticos hidrológicos-hidráulicos, contemplando algunos el transporte

de sedimentos y/o contaminantes y permitiendo la simulación por eventos o continua o ambas modalidades. Singh y Woolisher (2002) como así también Borah y Bera (2003) reseñan el estado del arte sobre los modelos disponibles: AGNPS, ANSWERS, DWSM, KINEROS, CASC2D, HSPF, MIKE SHE, PRMS, SWAT, entre otros. Borah y Bera (2003) identificaron y compilaron las bases matemáticas de los diferentes componentes de estos modelos. Dicha compilación resulta útil para la adecuada elección del modelo a utilizar en una determinada aplicación, dependiendo de: la dimensión de la cuenca, las escalas espacio-temporales deseadas, la aproximación esperada de los resultados, la experiencia del usuario, los recursos computacionales disponibles, entre otros factores.

Los modelos CASC2D, DWSM, KINEROS, MIKE SHE y PRMS utilizan ecuaciones físicamente basadas y son capaces de representar la propagación de ondas de crecidas por eventos. Los modelos ANSWERS, ANSWERS-Continuous, y HSPF emplean ecuaciones de almacenamiento y no son capaces de describir ondas de crecida. Por otra parte los modelos AGNPS, AnnAGNPS y SWAT utilizan ecuaciones de flujo basadas en almacenamiento y relaciones empíricas para determinar volúmenes de escurrimiento y caudales máximos, no siendo capaz de describir tampoco ondas de crecidas (Borah y Bera, 2003). Focalizando en el desarrollo local de tecnologías de simulación físicamente basada con capacidad para la propagación de flujo superficial y paralelamente al desarrollo internacional en el campo de la modelación matemática hidrológica-hidráulica de escurrimiento superficial, en el Departamento de Hidráulica y en el CURIHAM (FCEIA, UNR) desde 1995 se trabaja en los desarrollos y aplicaciones de diversas variantes de un modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasi-2D físicamente basado con capacidad simulación en ambientes rurales y urbanos y en grandes ríos (Riccardi, 2000a y b; Riccardi et al., 2008a y b).

En este trabajo se presenta la formulación del sistema de modelación y una serie de las aplicaciones del modelo conjuntamente con las características relevantes de cada caso.

Formulación del Sistema de Modelación

El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). Actualmente, el sistema permite la simulación de generación de excedentes superficiales, el escurrimiento

superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos, como así también la propagación de crecidas en grandes ríos. En cada unidad de discretización espacial el balance de volúmenes es manejado por el planteo de la ecuación de continuidad, en tanto que el escurrimiento superficial resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemática, difusiva y dinámica, de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales, conductos y valles de inundación. Para contemplar alternativas puntuales de flujo se incorporaron leyes de descarga para puentes, vertederos, alcantarillas y terraplenes. 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.

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 desde 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, intercepción, almacenamiento superficial, infiltración e intercambio externo de caudales en la celda i , A_{S_i} y z_i área mojada superficial y nivel de agua en celda i ; $Q_{k,i}$ caudal intercambiado entre celdas k e i .

Leyes de descarga entre celdas

Unión Cinemática: Se utiliza cuando la información del mecanismo hidrodinámico se propaga solamente hacia adelante:

$$Q_{k,i} = K_{k,i} \sqrt{\frac{z_{f,k} - z_{f,i}}{l_{k,i}}} \quad (2)$$

donde $K_{k,i}$ es el coeficiente de transporte definido a partir de la ecuación de Manning, $z_{f,k}$ y $z_{f,i}$ son las cotas de fondo de las celdas y $l_{k,i}$ es la distancia entre centros de celdas.

Unión tipo Río Simple: Se utiliza para escurrimientos con preponderancia de las fuerzas de gravedad, presión hidrostática y fricción. El caudal se deduce por discretización de la ecuación de momento para flujo con fuerzas inerciales despreciables y considerando la ecuación de Manning:

$$Q_{k,i} = \text{signo}(z_k - z_i) \frac{K_{k,i}}{\sqrt{l_{k,i}}} \sqrt{z_k - z_i} \quad (3)$$

donde z_k y z_i son los niveles de agua en las celda k e i respectivamente.

Unión cuasi dinámica

$$Q_{k,i} = \pm \frac{K_{k,i}}{\sqrt{|I_{k,i}|}} \sqrt{ABS \left[\frac{z_k - z_i}{1 + [K_{k,i}/\sqrt{|I_{k,i}|}]^2 / 2g (A_i^{-2} - A_k^{-2})} \right]} \quad (4)$$

Unión tipo Vertedero: representa vinculaciones donde se evidencia un límite físico como terraplenes de rutas, vías, etc. Se utiliza las ecuaciones de vertederos de cresta ancha:

$$Q_{k,i} = \mu_1 b \sqrt{2g} (z_k - z_w)^{3/2} \text{ libre} \quad (5)$$

$$Q_{k,i} = \mu_2 b \sqrt{2g} (z_i - z_w) \sqrt{z_k - z_i} \text{ ahogado} \quad (6)$$

donde z_w y b son la cota de fondo y longitud vertedero y μ_1 , μ_2 son los coeficientes de gasto de vertedero libre y ahogado.

Unión tipo Puente: se utiliza la expresión de caudal para vertederos con escalón de fondo nulo.

Unión Perdida de carga

$$Q_{k,i} = \sqrt{2g} \sqrt{\frac{z_k - z_{cri}}{\left(\frac{1}{Cd_L^2 A_{cri}^2} - \frac{1}{A_k^2} \right)}} \text{ libre} \quad (7)$$

$$Q_{k,i} = \sqrt{2g} \sqrt{\frac{z_k - z_i}{\left(\frac{1}{Cd_S^2 A_{Sc}^2} - \frac{1}{A_k^2} \right)}} \text{ ahogado} \quad (8)$$

donde z_{cri} y A_{cri} son el tirante y el área crítica de la sección de paso, A_{Sc} y A_k las áreas de la sección de control y de la celda k , en tanto que Cd es el coeficiente de gasto sea libre o sumergido.

Función de volumen de celda

La función de volumen o almacenamiento en celda cumple un papel fundamental en la descripción del escurrimiento y ha sido motivo de una serie de estudios complementarios a fin de su adecuada definición. En la actualidad la función volumen vs altura en cada celda del valle se define a partir de un conector en cruz, el cual va incrementando su área superficial y su volumen a medida que aumenta la altura (Fig. 1). Los parámetros geométricos a definir en cada celda son el ancho mínimo (Anmin) y la pendiente lateral (ITA).

Aplicaciones

El sistema de modelación se ha aplicado en una variada cantidad de casos. A continuación se describe una síntesis de cada aplicación con algunas características particulares de cada caso.

Modelado hidrológico-hidráulico en cuencas de llanura

Estas aplicaciones consistieron en la simulación hidrológica-hidráulica cuasi 2D, físicamente basada a nivel de cuenca, comprendiendo la generación de excedentes hídricos superficiales y la correspondiente propagación del escurrimiento generado.

Cuenca Arroyo Ludueña

La primer aplicación realizada del modelo ha correspondido a la cuenca del arroyo Ludueña en el año 1995 (Riccardi, 2000a). La zona modelada comprendió una extensión superficial de 700 km² y una pendiente media de 1.0 ‰. La red de cursos permanentes y transitorios comprendió 140 km. El caudal en crecidas ordinarias alcanza los 80 m³/s y en extraordinarias (recurrencias mayores a 50 años) los caudales fueron superiores a 400 m³/s. En esta aplicación fueron empleados 70 elementos, estableciendo una densidad de 0.10 celdas/km². El modelo fue alimentado con lluvia neta (previa deducción de pérdidas mediante método del CN), computando niveles, caudales y velocidades en todo el dominio espacial. La condición de borde aguas abajo se trató de una relación H-Q en el puente vial de la Av. de Circunvalación de Rosario.

Una posterior aplicación fue realizada por Riccardi (2000b). Con un dominio espacial con celdas cuadrangulares de 1000 m x 1000 m, lo que determinó una densidad de 1 celda/km². Este rediseño del dominio espacial constituyó un primer paso hacia una mas adecuado método de intercambiar información en formato raster tanto de datos como resultados del modelo. Una mejora en la descripción del mecanismo propagatorio se logró a partir de la incorporación de un modelo digital de terreno elaborado con la misma definición que el modelo hidrológico-hidráulico.

Stenta et al. (2008) utilizó el modelo para el análisis de grilla y escalamiento de coeficiente de rugosidad y de la función de almacenamiento, con lo que amplía la utilización del modelo con densidades de 4, 16 y 32 celdas/km². Actualmente la constitución con celdas de 250 x 250 m (16 celdas/km²) es utilizada como modelo de pronósticos de

niveles dentro del sistema de alerta hidrológico en la cuenca del arroyo Ludueña (Riccardi et al., 2009; Scuderi et al., 2009). En este caso el campo areal de lluvias totales de cada tormenta se establece a partir de constituir la lluvia regional mediante la metodología de Thiessen. La asignación de condiciones antecedentes se realiza a partir de la aplicación de una formulación del índice de humedad antecedente (IPA) desarrollado en forma específica para esta cuenca (Zimmermann et al., 2009). El IPA se relaciona directamente con el grado de saturación relativa (Se) mediante una relación ajustada por Zimmermann et al. (2008). La lluvia neta se determina a partir del algoritmo de Green y Ampt y mediante la proposición de una pérdida inicial por intercepción en follaje y almacenamiento en microdepressiones superficiales. Esta aplicación fue utilizada también para la definición de nuevos escenarios de diseño hidrológico en la cuenca (Riccardi et al., 2008c).

La aplicación con grilla de 1000 m x 1000 m fue empleada por Basile et al., (2008) como base hidrodinámica para modelar la generación y transporte de sedimentos a nivel de cuenca.

Cuenca Arroyo Saladillo

Otra aplicación del modelo se realizó en la cuenca del arroyo Saladillo que comprende 3200 km² de superficie (Fig. 2). En los trabajos de Rentería et al. (2006) se trabajó con elementos de 1000 x 1000 m. donde se examinó acerca de la utilización de modelos digitales elaborados a partir de curvas de nivel (digitalización cartas IGN) y a partir de cotas publicadas por el proyecto SRTM de la NASA. En trabajo posterior de Stenta et al. (2008) se investigó el efecto del tamaño de grilla empleando densidades de 0.25, 1, 4 y 16 celdas/km². La señal de entrada en la modelación fue la lluvia total, acompañada de la deducción de la lluvia neta, considerando el estado inicial de la red de cursos y como condición de borde la desembocadura en el río Paraná mediante una cascada de gran altura con formación de tirante crítico y desacople hidrodinámico. La constitución grilla de 250 m x 250 m resultó en 51200 celdas, siendo la máxima cantidad de elementos experimentadas a la fecha. Dicha constitución está siendo actualmente utilizada como modelo de pronósticos de niveles en la cuenca en el marco del sistema de alerta del arroyo Saladillo (Riccardi et al., 2009).

Aplicaciones en otras cuencas

Otras aplicaciones como modelo

hidrológico-hidráulico fue realizado en diversas cuencas como la de Santa Catalina, comprendiendo 135 km² (Cazenave et al., 2005; Stenta et al., 2008), Santa Teresa 14 km², Stenta et al., 2006), Cañada de Gómez 267 km² (Riccardi et al., 2008a), Chañar Ladeado, 24 km² (Zimmermann et al., 2004), y región de 3 Arroyos en 1700 km² (Scioli, 2009).

Acople con plataforma para pre y post procesamiento de datos y resultados

A medida que fue aumentando la cantidad de información demandada por el modelo y en función de la posibilidad de ir mejorando el nivel de detalle se decide en el año 2003 el desarrollo y acople de una plataforma para visualización, pre y post procesamiento de datos y resultados en software de ventanas (Stenta et al., 2005). La última versión del modelo adaptado para simulación en dominio de celdas cuadrangulares es el hoy denominado VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009).

Propagación de crecidas para la delimitación de mapas de inundación

El modelo fue empleado también para la descripción del tránsito de crecidas extremas sobre cursos de agua y planicies de inundación con la correspondiente determinación de los mapas de inundación asociados a cada crecida. Los ambientes de modelación estuvieron conformados por zonas rurales y urbanas, en tanto que el escurrimiento fue descrito transitando en forma encausada por cursos de agua, cunetas, calles como por valles de inundación con características de flujo mantiforme. Se han experimentado dominios espaciales constituidos por celdas irregulares como así también dominios constituidos por grillas de celdas cuadrangulares. El tipo de flujo simulado fue del tipo no uniforme e impermanente.

Valle Arroyo Saladillo

El mapeo de inundaciones en el arroyo Saladillo (Riccardi, 2000b) fue realizado en un área de 28 km², con una longitud de cauce principal de 7 km, considerando una densidad de 4 celdas/km² La pendiente media del tramo es de 0.0018 m/m. La condición de borde aguas arriba fueron hidrogramas entrantes por cauce y por valle de inundación, en tanto que la condición de borde aguas abajo fue una cascada de 7 m de altura donde existe la formación de tirante crítico. Fueron representadas crecidas con recurrencias desde

30 a 500 años, lo que determinó hidrogramas con caudales máximos en el rango desde 1100 hasta 2000 m³/s, con tiempo de base de hidrogramas del orden de 144 hs. Los niveles máximos en el curso principal fueron cercanos a los 8.50 m en tanto que en el valle de inundación los máximos valores se establecieron en los 2.30 m.

Valle Arroyo Ludueña

El mapeo de inundaciones en el arroyo Ludueña fue realizado en 3 oportunidades desde 1995 debido a las alteraciones que se fueron presentando tanto sobre los hidrogramas entrantes al tramo como en el propio valle de inundación y los cursos de agua. Un primer mapeo se llevó a cabo con una discretización espacial de 202 celdas, alcanzándose una densidad de 8 celdas/km². La aplicación incluyó la propagación en cauce, valle de inundación y grandes conductos cerrados. La pendiente media del tramo modelado fue de 0.001 m/m. Se reprodujeron crecidas extremas de 100 y 500 años de recurrencia, involucrando caudales máximos de 300-400 m³/s. Los valores máximos de alturas en cauce fueron del orden de 5.00 m mientras que en el valle los valores extremos fueron del orden de 1.00 m. Además de caudales y niveles fueron determinadas velocidades medias y permanencia de agua para distintos niveles en el valle de inundación. Esta información fue de importancia para la definición de las zonas con riesgo de inundación (Riccardi, 2000a).

La aplicación más reciente en este ambiente fue realizada con un modelo de grilla cuadrangular de 250 m x 250 m, involucrando una extensión superficial de 80 km², con una densidad de 16 celdas/km² (Fig. 3). Se determinaron además, manchas de inundación y permanencia de niveles en canales secundarios y terciarios. En estas aplicaciones las condiciones de borde entrantes fueron hidrogramas por cauces y planicies, en tanto que la condición de borde saliente fue una ley h(t) que representa la variación de niveles del río Paraná (Stenta et al., 2009).

Los mapas de inundación resultantes constituyeron la base técnica para la regulación del uso y ocupación del suelo en el valle de inundación en la cuenca baja del arroyo. A partir de los mapas la autoridad hídrica municipal (en el caso de Rosario) elaboró la respectiva ordenanza que legisla el uso y ocupación del valle.

Simulaciones como base hidrodinámica en grandes ríos

Estos casos corresponden a simulaciones del escurrimiento en tramos del río Paraná.

Tramo Puerto San Martín

Esta aplicación corresponde a la modelación en un tramo de 5300 m de longitud. La discretización espacial empleada fue rectangular de 50 m de ancho (en sentido transversal a la corriente) x 100 m de largo (en sentido de la corriente). El total de elementos de discretización fue de aproximadamente 2000 celdas, involucrando una densidad de 200 celdas/km². Las condiciones de borde empleadas fueron hidrogramas entrantes en todo el borde y ley h(t) en el borde saliente aguas abajo. Las condiciones iniciales de flujo impuestas fueron las alturas de agua en cada celda. Los márgenes del río fueron representados como contornos rígidos. El rango de caudales circulantes en las respectivas aplicaciones fue de 14000 a 30000 m³/s. Las profundidades náuticas máximas simuladas fueron del orden de 15 m. El modelo fue utilizado para simular años típico, mínimo y máximo, como así también en simulaciones continua de 10 años. Los resultados en términos de las variables hidráulicas: niveles, velocidades y caudales, permitieron alimentar el modelo de tránsito sedimentológico para analizar las variaciones morfológicas del fondo de un canal de acceso a puerto emplazado en la zona (Basile y Riccardi, 2002).

Tramo Diamante-Ramallo

Otra aplicación en el río Paraná se lleva a cabo actualmente (García et al., 2008) y tiene como objetivo principal evaluar procesos de inundación-sedimentación en valles aluviales de grandes ríos de llanura. En una primera etapa del trabajo se planteó la calibración de los procesos hidráulicos en el curso principal, cursos secundarios y planicie aluvial. Sucesivamente, se prevé desarrollar y acoplar un módulo de simulación sedimentológica, que permitirá la representación del transporte de sedimentos y de los procesos de erosión/sedimentación. El área en estudio se limitó a la zona que comprende el cauce principal y valle de inundación del río Paraná, desde la ciudad de Diamante en el extremo aguas arriba hasta la ciudad de Ramallo en el extremo aguas abajo. El ancho del río varía entre 40-60 km, mientras que, el ancho del cauce principal varía entre 0.5-3 km. La longitud del tramo modelado es de 200 Km. El

área total de modelación es de 8000 Km². Las celdas del dominio son de 500m x 500m. Actualmente el modelo cuenta con 30000 elementos que representan el curso principal, los cursos secundarios y el valle de inundación. La constitución tiene una densidad de 4 celdas/km². Las condiciones de borde entrante al tramo se trata de hidrogramas y las condiciones de borde aguas abajo son leyes del tipo nivel-caudal. Los caudales modelados se encuentran entre 8000-50000 m³/s, con pendientes hidráulicas en el rango de 0.0002 a 0.0005 m/m.

Propagación de crecidas en zonas urbanas con sistemas menor y mayor de drenaje

En este tipo de aplicaciones el modelo fue adaptado para ser utilizado en la evaluación de impacto ante inundaciones en ambientes urbanos.

Ambiente urbano San Lorenzo (SF)

La zona modelada involucró 10 km² en dos capas. La capa superior correspondió al escurrimiento superficial por cordones-cunetas, zanjas y calles y la capa inferior comprendió la red de conductos subterráneos, siendo las vinculaciones tipo bocas de tormenta los nexos entre ambos sistemas. Fueron empleados 1400 elementos, alcanzándose una densidad de 140 celdas/km², permitiendo este nivel de detalle tanto en la capa superficial como en la subterránea definir variables hidráulicas a nivel de cada esquina. El modelado ha permitido definir para los escenarios considerados, alturas de agua en cordón y caudales en esquinas con sus respectivas permanencias. Estableciendo a priori condiciones para determinados niveles de afectación de las inundaciones, fue posible cuantificar los impactos (leve a fuerte) a nivel de esquinas (Fig. 4). La modelación del escenario completo permitió en las distintas etapas del proyecto de obras estructurales, retroalimentar el diseño elaborado por los ingenieros proyectistas hasta alcanzar las hipótesis de proyecto planteadas originalmente (no inundación para R = 5 años). Ha resultado de particular importancia la determinación de la evolución de la mitigación del impacto por inundaciones al plantear las diversas etapas del plan de obras compatible con financiamiento a mediano plazo. El uso del modelo ha permitido determinar no solo el impacto, sino también: detectar conductos con insuficiente capacidad, flujos inversos, necesidad de mayores longitudes de bocas de tormentas, entre otros elementos de interés para los ingenieros proyectistas (Riccardi et al.,

2008b).

San Gregorio (SF)

En este caso el área en estudio fue de 3 km², empleándose la misma densidad de elementos que en el caso de San Lorenzo. Al no existir en este caso red subterránea de conductos, el escurrimiento se desarrolla en superficie en forma mantiforme y encausado por cunetas, zanjas y cursos de agua menores. Al igual que en el caso anterior, fue analizado un escenario actual y una serie de escenarios con diferentes variantes de obras de escurrimiento superficial del tipo de cunetas revestidas (DH, 2006).

Conclusiones

El modelo presentado se ha comportado de forma muy robusta en todos los casos de aplicación. Si bien desde lo conceptual el esquema es fuertemente implícito en todas las aplicaciones se ha adoptado el paso de tiempo de cálculo de forma tal que la velocidad de cálculo sea superior a la celeridad de la onda de la crecida descrita ($\Delta x/\Delta t > c$).

Todos los flujos simulados se trataron de diferentes variantes de escurrimientos con características claramente difusivas.

La utilización de dominios espaciales cuadrangulares favorece el intercambio de información y resultados en formato raster desde y hacia sistemas de información geográfica. Características topográficas y geométricas, variables hidrológicas e hidráulicas como campos de lluvias, rugosidades, humedad del suelo, parámetros hidráulicos de suelos, etc., pueden ser introducidos fácilmente desde los SIG.

En todos los casos, las celeridades de las ondas reproducidas han mostrado semejanzas con las crecidas observadas, demostrando una satisfactoria capacidad de describir la dinámica propagatoria del escurrimiento.

Referencias

- Basile, P., Riccardi, G., y Stenta, H. (2008), Modelo CTSS8-SED para simulación físicamente basada y espacialmente distribuida de procesos hidrológicos y erosión-sedimentación en cuencas de llanura, en *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura*, UNR Editora, pp. 234-253.
- Basile, P. y Riccardi G. (2002), Application of a quasi-2d hydro-morphological model to the Argentinean Paraná River, *International Journal of Sediment Research*, IRTCES, Beijing, China, V. 171, N° 1, pp. 20-30.

- Borah D.K. y M. Bera (2003). "Watershed-Scale Hydrologic and Nonpoint-Source Pollution Models: Review of Mathematical Bases". Trans. of the ASAE. Vol. 46(6), 1553-1556.
- Cazenave G., Dalponte, D., Rentería J., Rinaldi, P., Stenta H., Varna, M., Vives L., Clause, A., Riccardi, G. y Venere M. (2005), Modelación numérica del escurrimiento superficial: aplicación de modelos agregados y distribuidos en la cuenca del arroyo del Azul, Cong. Nacional del Agua, Mendoza.
- Cunge, J. (1975) Two Dimensional Modelling of Flood Plains Cap. 17 Unsteady flow in open channels (Ed. Mahmood K. and Yevjevich V.) Water Resources Publications, Fort Collins.
- DH (2006), Plan Director de Desagües Urbanos San Gregorio (SF), Informe Final, Departamento de Hidráulica, FCEIA, UNR, Rosario.
- García M., Basile P., Riccardi G. y Stenta H. (2008), Modelación Hidrodinámica Cuasi-2D a Gran Escala Espacial De Un Tramo Del Río Paraná, XXIII Cong. Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia. 15 p.
- Rentería J., Stenta H., Riccardi G. y Scuderi C. (2006), Análisis de la Respuesta Hidrológica en la Cuenca del Ao Saladillo (Argentina) aplicando dos modelos digitales de terreno.", XXII Cong. Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela.
- Riccardi G., (2000a), A Cell Model for Hydrological-Hydraulic Modeling, Journal of Environmental Hydrology, 8,15, 13p, (<http://www.hydroweb.com>), San Antonio (EU).
- Riccardi G. (2000b), Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica Cuasi-2D Multicapa para Ambientes Rurales y Urbanos, XIX Cong. Latinoamericano de Hidráulica, T II, Córdoba, Argentina, 159-168.
- Riccardi, G., Zimmermann, E. Basile, P., Stenta, H., Scuderi, C., y García M. y Rentería, J. (2008a), El modelado de escurrimiento superficial en cuencas del sur de la provincia de Santa Fe Argentina, en *Modelación de Procesos Hidrológicos asociados al Escurrimiento Superficial en Áreas de Llanura*, UNR Editora, Rosario, pp. 3-20.
- Riccardi, G. Stenta, H., Postiglione, R., Ferrer, L., Forestieri, C. y Navarro, R. (2008b), Modelación físicamente basada de escurrimiento superficial en ambientes urbanos, en *Modelación de Procesos Hidrológicos asociados al Escurrimiento Superficial en Áreas de Llanura*, UNR Editora, Rosario, pp. 56-78.
- Riccardi, G., Zimmermann, E., Basile P., Stenta H., Scuderi, C., Rentería, J., (2008c y 2009), Informes Avance 1, 2 ,3 y 4, ReHidrología y Modelo de Pronósticos Arroyos Ludueña y Saladillo, Convenio FCEIA-MASP, Departamento de Hidráulica y CURIHAM, Rosario. Argentina.
- Scioli C. (2009) Modelación del escurrimiento superficial en áreas de llanura: implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla, Tesis de Maestría en Recursos Hídricos en Zona de Llanura, FCEIA, UNR, Rosario, 119p.
- Scuderi, C., Riccardi G., Zimmermann, E., Basile, P., Stenta, H., Rentería, J. y Ciabattari L. (2009), Sistema de alerta a tiempo real en la zona del gran Rosario. Resultados preliminares, Cong. Nacional del Agua 2009, Trelew, Chubut.
- Singh V. y Wollhiser D., (2002) "Mathematical Modeling of Watershed Hydrology", Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 7:4 , 270-292.
- Stenta H., Riccardi G. y Basile P. (2006), Respuestas hidrológicas en la modelación del escurrimiento en cuencas de llanura con diferentes niveles de detalle, XXIII Cong. Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guyana, Venezuela. 15p.
- Stenta H., Riccardi G. y Basile P. (2008) Similitud hidrológica en el escurrimiento superficial en cuencas rurales mediante modelación matemática distribuida, XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias, Colombia. 15p.
- Stenta H., Riccardi G., Odicini L. y Zacarias, S. (2009), Manchas de inundación en el sistema hídrico del arroyo Ludueña para eventos hidrológicos extremos dentro del distrito Rosario, Departamento de Hidráulica, FCEIA, UNR, Rosario. 7p.
- Stenta, H., Rentería, J. y Riccardi, G. (2005), Plataforma computacional para gestión de información en la simulación hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial, XX^o Cong. Nacional del Agua, Mendoza, Argentina.
- Zimmermann, E., Rentería J., Stenta, H. y Riccardi, G., (2004), Uso de Sistemas de Información Geográfica e Imágenes Satelitales y su Aplicación en Hidrología. Caso de estudio: Sector norte de Chañar Ladeado (Santa fe, Argentina), Cuadernos del CURIHAM, ISSN 1514-2906, Vol. 8, N° 1 y 2, FCEIA, Rosario, Argentina. UNR Editora.
- Zimmermann E., Scuderi C., Riccardi G., Stenta H., Basile P., García M. y Rentería J., (2008), Asignación de Parámetros Hidráulicos de Suelos utilizando Composición Textural, Características Físicas y Estratigráficas", XXIII Cong. Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- Zimmermann E., Basile P., López C., Riccardi G., Stenta H., Scuderi C. y Rentería J. (2009), Condiciones antecedentes para la tormenta de diseño en el área del gran Rosario, XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Chubut.

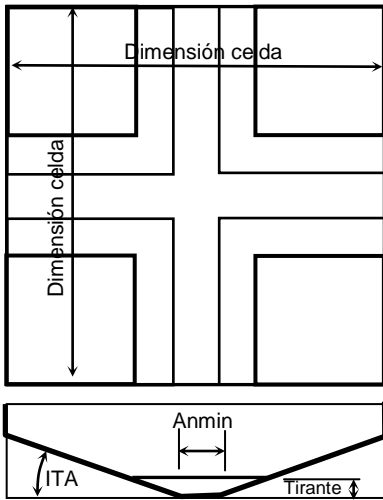


Fig. 1. Almacenamiento en celdas

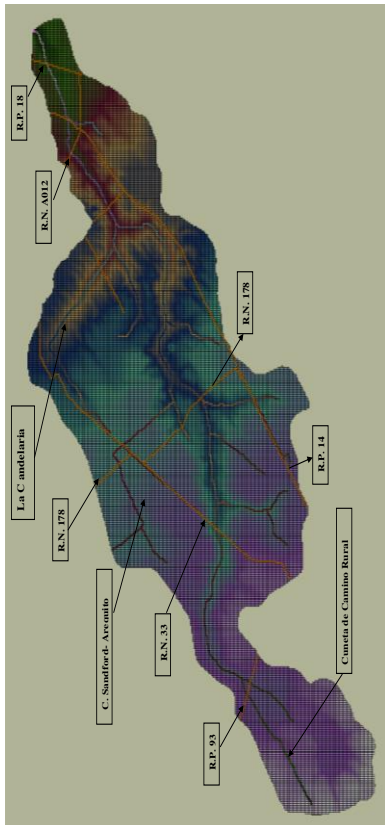


Fig. 2. Modelación en cuenca Ao. Saladillo

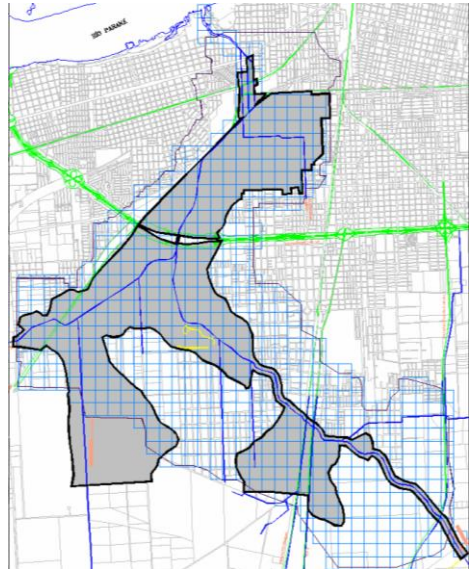


Fig. 3. Mapa de inundación valle Ao. Ludueña
R= 500 años

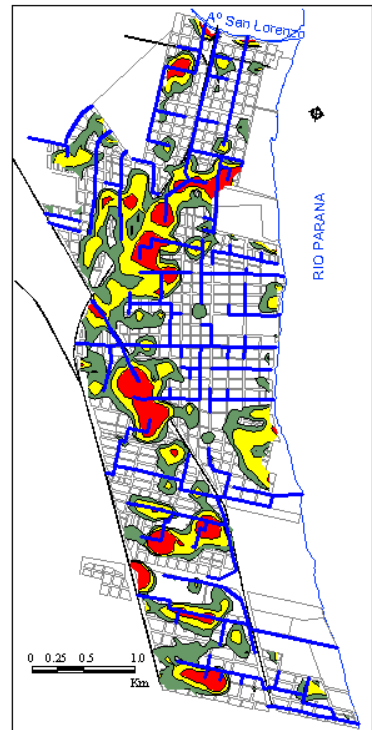


Fig. 4. Impacto en ambiente urbano ciudad de San Lorenzo (SF). R= 100 años con obras