



Comparación de la respuesta hidrológica en una cuenca de llanura mediante el uso del modelo HEC-HMS y el modelo de aproximación difusiva VMMHH 1.0

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

¹Departamento de Hidráulica (EIC) y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Univ. Nac. de Rosario. Riobamba 245 bis (2000), Rosario, Santa Fe, Argentina

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

³CIC-CIUNR. Universidad Nacional de Rosario, Riobamba 245 (2000), Rosario, Santa Fe, Argentina
Mail de contacto: hstenta@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se describe la implementación; calibración y explotación de dos modelos matemáticos en la cuenca del Arroyo Ludueña (Rosario, SF) para su posterior comparación en términos de respuesta hidrológica. Uno de ellos corresponde a la utilización del sistema de modelación matemática HEC-HMS (USACE, 2000) (modelo de parámetros semidistribuido). El otro es un modelo matemático distribuido; físicamente basado; constituido mediante esquema de celdas, denominado VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009). Una vez calibrados ambos modelos se realizaron corridas para diferentes escenarios de diseño. Los resultados indican que el sistema HEC-HMS reproduce caudales máximos superiores a los obtenidos mediante el modelo VMMHH1.0. Se concluye que este efecto se debe, principalmente, al predominio de los efectos difusivos en el proceso de generación y traslado del escurrimiento superficial no contemplados en el sistema HEC-HMS. Se remarca la importancia de la utilización de modelos físicamente basados en zonas de llanura, donde se requiere incorporar explícitamente los efectos de difusión mencionados.

Palabras clave: modelos distribuidos y semidistribuidos, escurrimiento superficial, zona de llanura.

ABSTRACT

In this work the implementation, calibration and operation of two mathematical models in the Ludueña basin (Rosario, SF) is presented. The comparison of both models in terms of hydrological response is made. One of them is the mathematical modeling system HEC-HMS (USACE, 2000) (semidistributed parameters model). The other one is the distributed mathematical model, physically based, called VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009). Simulations for both models were executed for different design scenarios. The results indicate that the HEC-HMS model reproduced peak flows greater than the VMMHH1.0 model. This effect is due mainly to the dominance of diffusive effects in the process of generation and propagation of surface runoff. The importance of physical models based on flatlands basins is recommended where it is required incorporating the effects of diffusion explicitly mentioned.

Keywords: distributed and semidistributed models, runoff, flatland basins

Introducción

En hidrología, el modelo es una necesidad que surge de la complejidad, tanto de los fenómenos a estudiar como del comportamiento de los parámetros que lo caracteriza, fundamentalmente respecto a su variabilidad espacial y temporal. Los modelos permiten una representación voluntariamente simplificada para el cómodo estudio de un determinado fenómeno o conjunto de fenómenos (Zimmermann, 2004)

En lo que respecta al análisis dinámico de las perturbaciones antrópicas que inciden sobre las cuencas hidrográficas; es cada vez más necesario contar con herramientas que permitan introducir con el mayor detalle posible todas las alteraciones que modifican los estados de equilibrio del sistema (canalizaciones artificiales, bajos naturales, alcantarillas y terraplenes, entre otras).

Particularmente en el subsistema hídrico la demanda actual respecto a los sistemas de modelación matemática tiene que ver con

herramientas de simulación para diagnóstico, reproducción, planificación y proyecto de obras.

En la actualidad, están disponibles una extensa variedad de modelos matemáticos de escurrimiento superficial y una de las más amplias clasificaciones que se pueden hacer de los mismos es agruparlos en modelos de parámetros semidistribuidos y de parámetros distribuidos.

Los modelos de parámetros semidistribuidos integran características de la cuenca sobre un área dada, despreciando las heterogeneidades dentro del área, resultando en condiciones simplificadas del escurrimiento. Un problema asociado a los modelos de parámetros semidistribuidos es la dificultad en la obtención de un valor simple representativo de un parámetro variable espacialmente; que pueda conducir a una predicción precisa de la respuesta de la cuenca (Wood, 1983).

Los modelos de parámetros distribuidos intentan cuantificar la variabilidad hidrológica que ocurre en un rango de escalas; por medio de la división de la cuenca en un número de unidades o celdas. En tal aproximación, los procesos con una longitud de escala menor que el tamaño de la celda son representados implícitamente (parametrizados) mientras que los procesos con longitudes de escala mayores que el tamaño de la celda son representados explícitamente a través de las variaciones entre las diferentes celdas que componen la cuenca. En general los modelos de parámetros distribuidos representan fenómenos locales con considerable detalle; mientras que la variabilidad dentro de la celda es despreciada (Blöschl y Sivapalan, 1995).

En lo que respecta al proyecto de obras, la utilización de un modelo hidrológico tiene como fin principal la obtención del hidrograma o caudal máximo para el diseño de la obra particular y/o la determinación de los posibles impactos. La adecuada obtención, o la reducción de la incertidumbre en la determinación del caudal máximo tienen implicancias directas tanto en lo que respecta a los costos derivados para la materialización de las obras como en la determinación de los impactos ante inundaciones.

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio de dos modelos matemáticos de características diferenciadas y la comparación de las respuestas hidrológicas para eventos extraordinarios. Uno de los modelos corresponde al sistema de modelación HEC-HMS que constituye un modelo de parámetros semi-distribuidos y el otro modelo corresponde al sistema de modelación VMMHH 1.0 (Riccardi

et al., 2009) que se caracteriza por ser un modelo de parámetros distribuidos cuasi 2-D físicamente basado.

Descripción de los Trabajos

Se realizó la modelación matemática de la cuenca del A° Ludueña mediante la utilización del sistema de modelación hidrológica HEC-HMS (USACE, 2000) y mediante el modelo matemático distribuido; físicamente basado, denominado VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009).

Los modelos se calibraron para un evento extraordinario ocurrido entre los días 27 y 31 de Marzo de 2007, donde se produjo una precipitación total media de aproximadamente 360 mm.

Posteriormente se realizaron las simulaciones para dos escenarios de proyecto y se realizó la comparación de resultados en términos de hidrogramas en la sección de control.

Los escenarios de proyecto considerados surgen del estudio de Rehidrología en la Cuenca del A° Ludueña (Riccardi et al., 2008). Los mismos se utilizan para el proyecto de obras de protección urbana contra inundaciones ante eventos extraordinarios.

El presente trabajo se ordena como sigue: descripción de la cuenca del A° Ludueña, implementación y calibración para ambos modelos matemáticos. Simulación de escenarios de proyecto; análisis de los resultados y elaboración de las conclusiones.

Descripción de la Cuenca del A° Ludueña

La cuenca del A° Ludueña se encuentra situada en el sector sur-este de la provincia de Santa Fe, República Argentina. Encierra un sector de la ciudad de Rosario; engloba una serie de localidades aledañas y desemboca en el río Paraná. Tiene un área de aporte de aproximadamente 700 km²; una pendiente media de 1,4 por mil; una red hídrica constituida por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Funes-Salvat; y una serie de cursos y cañadones impermanentes. Se encuentra la presa de retención de crecidas en la rama del A° Ludueña; regulando los aportes de una área de 390 km², que corresponde al sector centro-sur de la cuenca. En la región se presentan terraplenes viales y de ferrocarriles que alteran la dinámica hídrica superficial. En la cuenca alta se presentan 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 sección de control de la cuenca corresponde al cruce del A° Ludueña con la Av. de Circunvalación.

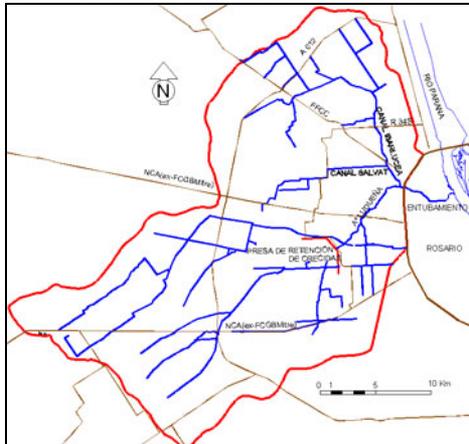


Fig. 1. Cuenca del A° Ludueña.

Implementación mediante el sistema HEC-HMS

En la modelación mediante el sistema HEC-HMS se han incorporado las subcuencas de los canales Ibarlucea y Salvat. La subcuenca perteneciente a la rama del A° Ludueña se ha modelado desde la presa de retención de crecidas hacia aguas abajo, por lo que dicha presa representa una condición de borde en la cual se produce el ingreso de caudal correspondiente al hidrograma de salida de la misma para el evento correspondiente.

En la Fig. 2 se representan el esquema de la cuenca mediante la utilización del sistema HEC-HMS. Se han definido los siguientes elementos para la constitución del modelo:

- 17 subcuencas (8 correspondientes a la subcuenca del canal Ibarlucea, 4 correspondientes a la subcuenca del canal Salvat y 5 correspondientes a la subcuenca del A° Ludueña aguas debajo de la presa de retención de crecidas).

- 15 tramos de curso (8 pertenecientes a la subcuenca del canal Ibarlucea, 3 a la subcuenca del canal Salvat y 4 a la subcuenca del A° Ludueña aguas debajo de la presa de retención de crecidas).

- 4 almacenamientos (correspondientes a diferentes secciones de control asociadas al cruce de un curso con un terraplén carretero o ferroviario (R9 y A° Ludueña, Ibarlucea y R34N; bajo Coromina e Ibarlucea y calle Baigorria).

- 1 fuente, para simular el hidrograma de salida de la presa de retención de crecidas del A° Ludueña asociada a cada evento simulado.

- 1 elemento representativo de la sección de salida.

- 15 nodos para evaluar diferentes aportes y salidas.

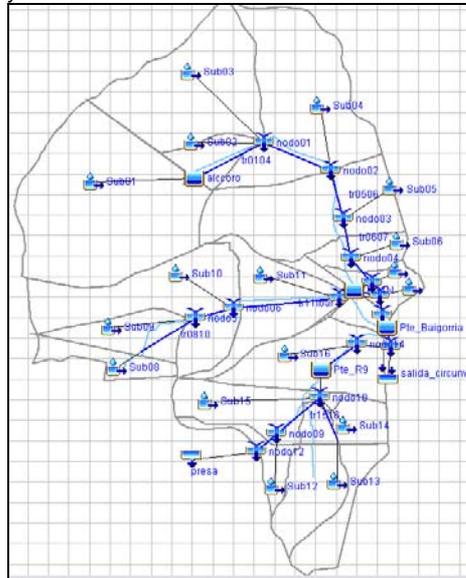


Fig. 2. Modelo de la cuenca del A° Ludueña mediante el sistema HEC-HMS.

Para la representación del proceso de transformación lluvia-caudal se utilizó el método del H.U.S. del Servicio de Conservación de Suelos de EEUU (SCS, 1971 y 1986). Para cada subcuenca se determinaron sus características físicas: área, longitud, desnivel, pendiente. La determinación del tiempo de concentración se realizó aplicando la formulación de Ventura citado por Orsolini et al. (2000):

$$T_c = \alpha \times \sqrt{\frac{A}{S}} \quad (1)$$

Donde T_c es el tiempo de concentración de la subcuenca, en hs; α es un coeficiente empírico que depende principalmente de las características topográficas de la cuenca; A es el área de la subcuenca, en Km^2 y S es la pendiente de la subcuenca, en m/m .

En la Tabla 1 se detallan las características de las diferentes subcuencas.

Tabla 1. Características de las subcuencas.

ID	A(Km²)	L(Km)	DH(m)	S(‰)	TC(hs)
1	62,9	11,3	12,9	1,1	17,6
2	7,1	5,6	2,5	0,4	9,5
3	37,7	10,7	5,1	0,5	21,1
4	43,7	10,1	6,7	0,7	19,3
5	33,7	7,3	8,2	1,1	13,0
6	7,5	4,5	9,6	2,1	4,4
7	6,5	3,7	10,8	2,9	3,5
8	7,4	5,2	5,0	1,0	6,6
9	10,9	8,0	9,3	1,2	7,3
10	34,0	11,2	15,2	1,4	11,9
11	20,3	8,5	16,0	1,9	7,8
12	5,8	4,1	10,2	2,5	4,8
13	16,3	6,2	10,5	1,7	9,8
14	3,2	2,8	3,0	1,1	5,4
15	16,4	8,3	17,7	2,1	8,8
16	20,7	9,0	14,8	1,6	11,2
17	3,5	2,5	1,3	0,5	6,5

Para la obtención del LAG o Tiempo de retardo del método del H.U.S. del SCS de los EEUU se utilizó la relación $LAG = 0,6 \times Tc$.

Para representar el proceso de traslado en la red de cursos se utilizó el método de propagación de Muskingum-Cunge (Cunge, 1969). Para cada tramo se determinó la sección del curso con su correspondiente valle de inundación; la longitud del tramo y su pendiente. En la Tabla 2 se representan las características principales de la red de cursos.

Para representar el proceso de control de flujo en el cruce de los cursos a través de las alcantarillas y/o puentes se utilizaron las relaciones entre volumen-cota y caudal-cota obtenidas en función de la topografía; de las características de las obras de cruce y de las condiciones aguas abajo.

Implementación mediante el sistema VMMHH 1.0

El sistema de modelación VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009) es un modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-bidimensional basado en un esquema de celdas interconectadas. El sistema surge de la fusión del modelo matemático CTSS8 (Riccardi, 2000) y de la plataforma computacional Simulaciones 2.0 (Stenta et al., 2005). 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 información necesaria de lluvia neta en cada celda se plantea la utilización de las

metodologías reconocidas de Green y Ampt o del Servicio de Conservación del Suelo de EEUU (Chow et al., 1994). El escurrimiento resultante puede ser propagado 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.

Tabla 2. Características de los cursos.

ID	DH(m)	L(Km)	S(‰)
1	2,50	3,90	0,64
2	2,10	3,90	0,54
3	2,20	3,10	0,71
4	0,90	1,70	0,53
5	0,60	1,00	0,60
6	4,25	3,40	1,25
7	5,95	3,30	1,80
8	6,00	5,47	1,10
9	0,20	0,27	0,74
10	0,70	0,65	1,07
11	2,70	2,30	1,17
12	2,70	3,35	0,81
13	3,80	5,00	0,76
14	0,60	1,00	0,60
15	1,00	1,50	0,67

Se contemplan alternativas puntuales de flujo mediante la incorporación de leyes de descarga para puentes, vertederos y alcantarillas. 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. 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; que definen el dominio del sistema hídrico a modelar. Las celdas pueden ser tipo valle o río que representan el flujo superficial y en canal 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 estos.

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 triangular con un punto bajo central y pendientes laterales. La sección transversal efectiva de almacenamiento y conducción es, entonces, representada por una aproximación triangular.

La ventaja fundamental de este modelo con aproximación de onda difusiva y simulación del flujo cuasi-bidimensional frente a otros modelos de tipo cinemática o empíricos, está relacionada con la posibilidad de transmitir información en cualquier dirección del dominio bidimensional. Esto hace que no se deban prefiar los sentidos de escurrimiento y especificar los funcionamientos hidráulicos de elementos (por ejemplos embalses); pudiendo el modelo discernir en cada paso de tiempo las direcciones del escurrimiento superficial de acuerdo a los gradientes hidráulicos (Riccardi, 2005).

Se implementó el modelo matemático en la cuenca del A° Ludueña a partir de la siguiente información:

a) Generación del modelo digital del terreno, obtenido en base a la georreferenciación y vectorización de cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional y de puntos relevados en campo;

b) Modelación del sistema de drenaje. Las trazas de los cursos y sus características hidráulicas se obtuvieron mediante relevamientos realizados y de información de reconocimiento en campo. Se modeló una extensión de 370 Km de cursos permanentes e impermanentes.

c) Modelación del trazado vial y ferroviario. Las características y ubicación de los terraplenes viales y ferroviarios de mayor impacto desde el punto de vista de la dinámica hídrica se obtuvieron mediante recopilación de información proveniente de organismos públicos y privados. Se modeló una extensión de 220 Km de terraplenes.

d) Modelación de alcantarillas y puentes. Las dimensiones, ubicación y características de los puentes y alcantarillas se obtuvieron a partir de relevamientos. Se definieron un total de 62 alcantarillas y 10 puentes en toda la cuenca.

e) Condiciones de borde e iniciales del modelo. Para las diferentes corridas es necesario definir las siguientes condiciones de borde e iniciales: i) Alturas de agua en todas las celdas del modelo: se obtuvo a partir de considerar situación de caudal base en la red de cursos; ii) Lluvia neta: que corresponde al escenario a modelar; iii) Condiciones de borde aguas abajo: asociada a la cota del Río Paraná.

El modelo se implementó mediante la utilización de la plataforma computacional Simulaciones 2.0 (Stenta et al., 2005) que permite la interacción gráfica y visual para el ingreso de información y visualización de resultados. El modelo se constituyó con un total de 11200 elementos (9970 elementos tipo valle

y 1230 elementos tipo río) y 22095 vinculaciones (17920 tipo valle-valle; 2040 tipo valle-río; 1183 tipo río-río; 72 vinculaciones tipo alcantarilla y puentes; y 880 tipo terraplenes)

En la Fig. 3 se representa el modelo de la cuenca del A° Ludueña.

Calibración

En ambos modelos se utilizaron los parámetros calibrados y validados que surgen de trabajos antecedentes (Stenta, 2008; Riccardi, 2007; Zimmermann, 1997), alcanzándose resultados satisfactorios. A modo de ejemplo; en la Fig. 4 se representa el hidrograma observado y los hidrogramas obtenidos mediante el proceso de calibración en ambos sistemas de modelación asociado al evento ocurrido entre los días 27 y 31 de Marzo de 2007; con una lluvia total de aproximadamente 365 mm y una lluvia neta de 153 mm.

En el sistema HEC-HMS el rango de variación del parámetro α es de 0,08 a 0,10; los valores para el coeficiente de rugosidad de Manning del curso se encuentran en el rango 0,028-0,033 y en el sector del valle de inundación de 0,08-0,10. Para la elaboración de las curvas de altura-caudal se utilizaron coeficientes de descarga de alcantarillas y puentes entre 0,75 y 0,85.

En el sistema VMMHH 1.0, los valores resultantes de la calibración son: coeficiente de rugosidad de Manning del curso entre 0,028-0,033 y en el sector del valle de inundación de 0,08-0,10; coeficientes de descarga en obras de arte 0,75-0,85; desborde de terraplenes 0,2; pendiente transversal de almacenamiento y conducción en celdas 1:0.019 (H:V).

Escenarios utilizados en la explotación

Los escenarios corresponden a eventos extraordinarios y surgen del estudio de Rehidrología de la Cuenca del A° Ludueña (DH, 2008). Los mismos presentan las siguientes características:

Recurrencia de la Precipitación Total: 100 años. Duración de la precipitación total: 5 días. (Día 1: 19 mm + Día 2: 45 mm + Día 3: 190 mm + Día 4: 22 mm + Día 5: 18 mm). Distribución diaria mediante bloques alternos. Distribución subdiaria según coeficientes de relación entre láminas de diferentes duraciones. Distribución areal uniforme. Cota Río Paraná en desembocadura 8,47 m IGN.

Para la determinación de la condición de humedad antecedente se utilizó el concepto de Índice de Precipitación Antecedente (IPA); se vinculó por medio de una regresión lineal el IPA

y el número de curva (CN) y se obtuvieron los valores de CN variable por día asociados a diferentes probabilidades de excedencia de humedad antecedente en base a un estudio estadístico de condiciones de humedad antecedente en tormentas reales (Zimmermann et al., 2009):

Escenario E1, CN variable por día: 75,8; 77,4; 81,6; 90; 90. Probabilidad de excedencia $P(x>0)=0,5$. $P_{neta} = 153$ mm.

Escenario E2, CN variable por día: 87,3; 88,8; 90; 90; 90. Probabilidad de excedencia $P(x>0)=0,05$. $P_{neta} = 198$ mm.

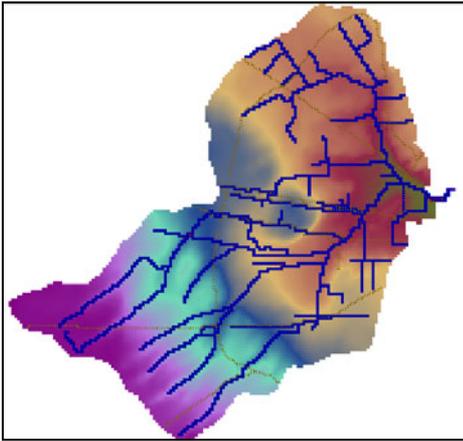


Fig. 3. Modelo de la cuenca del Aº Ludueña mediante el sistema VMMHH 1.0.

Análisis de Resultados

Mediante la definición de ambos escenarios se realizaron las simulaciones correspondientes en ambos sistemas de modelación.

En las Figs. 5 y 6 se representan los hidrogramas calculados por el sistema VMMHH 1.0 y por el sistema HEC-HMS en la sección de control para el escenario E1 y E2 respectivamente.

En la Tabla 3 se resumen los valores de caudales máximos y tiempo al pico para ambos escenarios obtenidos mediante los dos sistemas de modelación utilizados.

Respecto a los valores de caudales máximos se obtuvieron resultados en lo que se evidencia que la respuesta mediante el sistema HEC-HMS es superior a los caudales máximos obtenidos mediante el sistema VMMHH 1.0. Las diferencias, en términos porcentual respecto al sistema VMMHH 1.0 se encuentran entre 36,7 % (E1) y 35,9 % (E2).

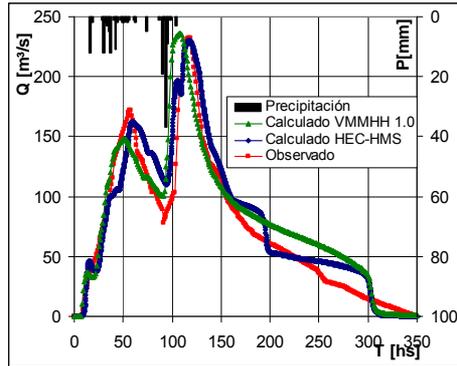


Fig. 4. Hidrogramas observado y calibrados para ambos modelos. Evento 27-31 de Marzo de 2007.

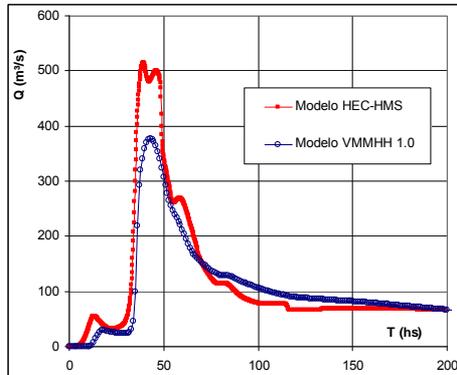


Fig. 5. Hidrogramas calculados mediante el sistema VMMHH 1.0 y el sistema HEC-HMS. Escenario E1.

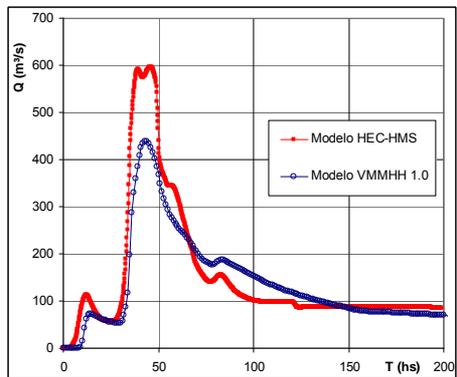


Fig. 6. Hidrogramas calculados mediante el sistema VMMHH 1.0 y el sistema HEC-HMS. Escenario E2.

Tabla 3. Caudales máximos y tiempos al pico para ambos escenarios.

		Sistema HEC-HMS	Sistema VMMHH 1.0
E1	Qp[m ³ /s]	515,3	377,1
	Tp [hs]	39,3	44,0
E2	Qp[m ³ /s]	596,7	439,1
	Tp[hs]	45,8	44,0

Respecto a los valores de tiempo al pico, se observan resultados adecuados; la diferencia máxima en términos de horas es de 4,7 hs para E1. Lo anterior no es determinante o no constituye una diferencia significativa en este tipo de cuencas con respuestas al pico del orden de decenas de horas.

Como se indicó anteriormente, en ambos modelos se definió como ingreso el hietograma de lluvia neta correspondiente a cada escenario; por lo que implica que los volúmenes netos escurridos coinciden; las diferencias se presenta entonces en la distribución temporal de la respuesta en términos de caudales.

En los hidrogramas calculados mediante ambos sistemas (Figs. 5 y 6) se observan asimismo diferencias en la forma. Se observa que los hidrogramas calculados mediante el sistema HEC-HMS presentan diferentes caudales picos secundarios (tanto en la rama ascendente como descendente) a diferencia de los hidrogramas obtenidos mediante el sistema VMMHH 1.0. Lo anterior puede ser atribuido a la forma de generación y traslado de los hidrogramas por parte del sistema HEC-HMS. Los mismos son generados a nivel de subcuenca, lo que se traduce en una señal puntual (desde el punto de vista espacial) que es "inyectada" en el tramo de curso que será propagada. Este nivel de agregación puede resultar insuficiente cuando la dinámica hídrica de la subcuenca presenta mayores atenuaciones debidos a la presencia de bajos naturales; alcantarillas secundarias y caminos rurales que actúan como pequeños reguladores del escurrimiento superficial. Estas restricciones y condiciones de escurrimiento pueden ser incorporadas explícitamente en el sistema VMMHH 1.0; en cambio en el sistema HEC-HMS deben ser contempladas en la adopción de los parámetros de los procesos utilizados en la transformación lluvia-caudal y traslado.

Conclusiones

La utilización de sistemas semi-distribuidos como el utilizado en el presente trabajo (HEC-HMS) presentan respuestas en términos de caudales máximos en la sección de control mayores a las obtenidas mediante la utilización de un modelo distribuido de base física.

La comparación entre ambos sistemas se realizó para eventos extraordinarios; con lluvias totales asociadas a 100 años de período medio de retorno; que comúnmente son estudiadas para evaluar los niveles de impacto ante inundaciones y que pueden definir las medidas estructurales para reducir o evitar dichos impactos. A medida que se obtienen caudales superiores se incrementan los impactos y los costos de las medidas estructurales; por lo que resulta de interés la comparación de la respuesta hidrológica entre modelos de concepciones diferentes.

Las limitaciones propias del sistema HEC-HMS evidencian una sobreestimación de los caudales máximos debido principalmente a la dificultad de reproducir los mecanismos predominantes en la dinámica propagatoria en cuencas de llanura con una fuerte acción antropica. El sistema HEC-HMS reproduce mecanismos de transformación lluvia caudal y de traslado con una grado de atenuación menor que el sistema VMMHH 1.0; lo que arroja caudales máximos mayores; aún mediante la incorporación de elementos internos de regulación en el sistema HEC-HMS. La presencia de bajos naturales; alcantarillas de caminos secundarios y los propios terraplenes actúan en forma general como mecanismos de atenuación de la respuesta. Asimismo la existencia de canales artificiales, que no drenan por los sectores de bajos naturales también alteran la dinámica propagatoria y reducen los caudales máximos; ya que al poseer una capacidad limitada de conducción, los excedentes escurren por los sectores bajos según las pendientes hidráulicas disponibles. Este aspecto resulta dificultoso de incorporar en sistemas de modelación como el HEC-HMS. Es esperable que mediante un incremento del grado de discretización y la incorporación de elementos internos se logre mejorar la respuesta del sistema HEC-HMS.

Los modelos distribuidos de base física permiten la representación de los mecanismos predominantes que intervienen en la respuesta de un sistema hidrológico como el analizado en el presente trabajo. El sistema de modelación VMMHH 1.0 ha sido ampliamente utilizado en

la cuenca del A° Ludueña con muy buenos resultados.

Se resalta la importancia del trabajo que implica una adecuada constitución de un modelo semidistribuido (HEC-HMS) en lo que respecta a la definición de los parámetros empíricos y de las simplificaciones requeridas para representar los procesos de transformación lluvia-caudal; traslado y retenciones en sistemas hidrológicos semitípicos con alto grado de acción antrópica.

En función del nivel de alcance logrado hasta el presente trabajo; futuras investigaciones pueden estar orientadas a estudiar los efectos y el nivel de sensibilidad en la respuesta hidrológica de la cuenca a medida que se incrementa el nivel de detalle en la constitución del modelo mediante la implementación del sistema HEC-HMS. Niveles de detalle superiores en el grado de discretización posibilita la incorporación de mecanismos de atenuación que permitirían reproducir con mayor certeza la dinámica real de la cuenca. Se evidencia la importancia de evaluar y orientar la calibración del sistema HEC-HMS en diferentes secciones internas; lo que conlleva a lograr mayor certeza en el grado de respuesta esperable en la cuenca.

Referencias

Blöschl, G. y Sivapalan, M. 1995. Scale issues in hydrological Modelling: A Review. *Hydrological Processes*. Vol. 9, 251-290.

Chow, V. T., Maidment, D. R. y Wags, L.M. 1994. *Hidrología Aplicada*. Mac Graw-Hill, Bogotá. 554 p.

Cunge, J. A. 1969. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205-230.

INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1990. *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. Tomo II. Proyecto PNUD Argentina 85/019. 677 pag. ISBN 950-432964-2.

Orsolini, H.; Zimmermann, E. y Basile, P. (2000) *Hidrología. Procesos y Métodos*. 319 pag. UNR Editora.

Riccardi, G. 2000. Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos. *Tesis Doctoral, FCEfyN, UNC, Córdoba*.

Riccardi, G. 2005. Modelación Matemática de Flujos a Superficie Libre. *Curso de Maestría en Recursos Hídricos en Zonas de Llanura*. Fac. de Cs. Exactas, Ing. y Agrim. UNR

Riccardi, G. 2007. *Reporte Técnico sobre inundaciones ocurridas en la semana del 26 al*

31 de Marzo de 2007. Departamento de Hidráulica y CURIHAM. Abril de 2007. 12 pag.

Riccardi, G., Zimmermann, E., Mancinelli, A., Scuderi, C., Basile, P., Rentería, J. y García P. 2008. *Rehidrología y Modelo de Simulación a Tiempo Real en Sistema de Alerta Hidrológico en las Cuenas de los Arroyos Ludueña y Saladillo. Informe de Avance 1*. Departamento de Hidráulica y CURIHAM. FCElyA. UNR.

Riccardi, G., Zimmermann, E., Mancinelli, A., Scuderi, C., Basile, P., Rentería, J. y García, P. 2009. *Rehidrología y Modelo de Simulación a Tiempo Real en Sistema de Alerta Hidrológico en las Cuenas de los Arroyos Ludueña y Saladillo. Informe de Avance 4*. Departamento de Hidráulica y CURIHAM. FCElyA. UNR.

Soil Conservation Service. 1971. *National Engineering Handbook*, Section 4: Hydrology. USDA, Springfield, VA.

Soil Conservation Service. 1986. *Urban hydrology for small watersheds*, Technical Report 55. USDA, Springfield, VA

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.

Stenta, H. 2008. Efectos del Tamaño de Grilla sobre la Modelación Matemática Distribuida del Escurrimiento Superficial en Cuenas de Llanura. Trabajo. *Tesis Doctoral. FCElyA, UNR, Rosario-Santa Fe*.

USACE. 2000. *HEC-HMS hydrologic modeling system user's manual*. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

Wood, E.F. 1983. Hydrology 1979-1982. *Rev. of Geophys.*, 21 (3), 697-698.

Zimmermann, E. 1997. Vinculación entre la Hidrología y la Geomorfología en Sistemas de Avenamiento Transicional. *Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Universidad Nacional de Córdoba.

Zimmermann, E. 2004. Análisis de Sistemas Hidrológicos. *Curso de Maestría en Recursos Hídricos en Zonas de Llanura*. Fac. de Cs. Exactas, Ing. y Agrim. UNR

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.