

Modelo lluvia-escurrimiento para la cuenca del río Reno

Rainfall-runoff model for Reno's river basin

Yakelin Rodríguez López¹, Norberto Marrero de León² y Laura Gil Urrutia³

RESUMEN. La posibilidad de contar con modelos que reproduzcan el comportamiento de las cuencas hidrográficas ante la ocurrencia de lluvias intensas que provocan inundaciones es de suma importancia, ya que pueden predecirse las afectaciones en el sector socioeconómico de la zona en estudio, como por ejemplo en el sector de la agricultura. En el presente estudio se obtuvo un modelo lluvia-escurrimiento semidistribuido a escala de evento en la cuenca del río Reno, localizado en la región Emilia Romagna, Italia, para lo cual se dispuso del SIG Arcview, con la extensión Hec-GeoHMS y del software Hec-HMS para la simulación hidrológica del proceso. El modelo obtenido logra reproducir eventos de gastos máximos que sean independientes y que su gasto pico supere los 350 m³/s con un error por debajo del 10%.

Palabras clave: gastos, Hec-HMS, ArcView, error, afectaciones

ABSTRACT: The possibility to have models reproducing the behavior of hydrographical basins due to the occurrence of heavy rains which could cause flooding is very important to predict damages over the study area, for example in the agricultural sector. In this study, a semi-distributed rain-runoff model was created to be applied for maximum events in the river Reno basin, located in the Emilia Romagna region, Italy. To do such a study a GIS (ArcView v.3.3) and its Hec-GeoHMS extension, together with the Hec-HMS software, were used in the basin hydrological simulation. The obtained model is able to reproduce independent maximum events for peak flows greater than 350 m³/s and errors below 10%.

Keyword: flow, Hec-HMS, ArcView, error, damages

INTRODUCCIÓN

La cuenca hidrográfica es la base para el manejo integrado del recurso hídrico. En ella se realizan las observaciones del ciclo hidrológico, se evalúan las potencialidades de los recursos hídricos y se define el desarrollo hidráulico: el uso del agua para riego, para el consumo humano, entre otros, y se establecen las medidas de alerta y prevención contra las inundaciones (García, 2006).

La problemática asociada a las avenidas y las inundaciones que provocan es compleja, ya que intervienen numerosos factores entre los cuales se encuentran la magnitud y localización de las poblaciones, las obras y la actividad antropogénica en las zonas estudiadas, las características fisiográficas y morfo-métricas de la cuenca incluyendo su sistema fluvial.

Los modelos de transformación lluvia-escurrimiento son una herramienta muy útil en la previsión de las avenidas. Contar con ellos en nuestros países es necesario, ya que se ven afectados con frecuencia por lluvias intensas, que provocan inundaciones en intervalos de tiempo relativamente cortos, las que traen consigo muchos daños sociales y económicos.

Objetivos del estudio

- Obtener el modelo hidrológico conceptual semidistribuido de la cuenca del río Reno mediante la aplicación de instrumentos de análisis en plataforma SIG (Hec-GeoHMS).
- Obtener el modelo calibrado de transformación de la lluvia en escurrimiento para la cuenca del río Reno, a partir de la caracterización física de la misma y de las observaciones del comportamiento hidrológico de la zona.

Recibido 24/06/09, **aprobado** 21/06/10, **trabajo** 22/10, **investigación**.

¹ Ingeniera Hidráulica, Master en Ingeniería Hidráulica, Profesora Instructora, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", CUJAE, Calle 114, No. 11901, e/ 119 y 127, Marianao, C. Habana, Cuba.
E-yake@cih.cujae.edu.cu

² Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular Consultante, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", CUJAE.

³ Ingeniera Civil, Máster en Ciencias en la especialidad de Geología, Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del río Lempa-El Salvador.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente estudio se ha empleado el software ArcView con las extensiones: Hec-GeoHMS, Spatial Analyst, 3D Analyst, Geoprocessing, GridAnalyst11, Xtools y Poligonos Thiessen, el programa de simulación hidrológica Hec-HMS, así como Microsoft Excel para el análisis de la información recolectada y la representación de los resultados obtenidos.

El SIG ArcView puede considerarse como un conjunto organizado de hardware, software, datos y técnicas eficientemente diseñadas para la captura, almacenamiento, actualización, manipulación, visualización y análisis de información geográficamente referenciada. A partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) es capaz, con la ayuda de la extensión Hec-Geo HMS, de obtener la divisoria de la cuenca (Engineers, 2003), dándole como dato el punto de cierre de la misma. Además permite dividir la cuenca en tantas subcuencas como el usuario determine, y asignarle a cada una valores de parámetros hidrológicos como el CN, preparando la información de forma tal que sirva de entrada al Hec-HMS para iniciar la simulación hidrológica.

Con el propósito de cumplir las expectativas esperadas para este estudio se desarrolló la siguiente metodología:

1. Análisis de la información disponible.
2. Selección de los eventos de gastos máximos a simular.
3. Representación de la cuenca mediante un SIG.
4. Determinación de las áreas de influencia para cada pluviómetro.
5. Obtención de un modelo calibrado que reproduzca los eventos seleccionados mediante el software Hec-HMS.

Estudio de caso

La cuenca del río Reno hasta el cierre en Casalecchio, posee una superficie de 1041,4 km² con una longitud del río principal de 77 Km., la cual se encuentra localizada al noroeste de Italia, en la región de Emilia Romagna. Las cotas varían de un máximo de 1900 m.s.n.m en el sur-oeste hasta un mínimo de 63 m.s.n.m en la sección de cierre (Figura 1). La ubicación de las estaciones empleadas en el estudio también se muestra en la Figura 1.



FIGURA 1. Ubicación de la cuenca y de las estaciones de medición.

La información requerida por el modelo semidistribuido para la transformación de la lluvia en escurrimiento, fue suministrada por el Departamento de Ingeniería de la Estructura, del Transporte, del Agua y del Levantamiento del Territorio (DISTART) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Bologna. Dicha información estaba disponible en el periodo del 1 de enero de 1993 al 31 de diciembre de 2000, la cual se relaciona a continuación:

1. Las series de precipitación horaria de 11 pluviómetros ubicados dentro y fuera de la cuenca. Debe señalarse que no se dispuso de equipos pluviográficos.
2. Las series de observaciones de los caudales horarios en dos estaciones hidrométricas, Vergato y Casalecchio.
3. El valor del Número de la Curva (CN) para celdas de 250 x 250m. Estos valores, como es conocido, dependen de las condiciones de humedad previa en el suelo (en este caso se asumieron condiciones medias, o sea, categoría II), la clase

hidrológica de los suelos, los tipos de vegetación, las formas predominantes de los cultivos y el estado con respecto a la formación del escurrimiento.

4. El MDE con celdas de 80 x 80 m.

Análisis de la información disponible

Primeramente se analizaron los datos de las estaciones pluviométricas y se obtuvo un gráfico que representa en que período funcionaban las mismas (Figura 2), con este se logró identificar los intervalos de tiempo, durante los ocho años, en

que se contaba con información de las precipitaciones.

Como un segundo paso en el análisis de la información disponible, se trabajó con las series de gastos horarios, llegando a conocer el momento donde se producen los máximos gastos. Además, se representó en un gráfico de forma simultánea, el comportamiento de los caudales de las dos estaciones de aforo, Vergato y Casalecchio, con el propósito de analizar el tiempo que mediaba entre una estación y la otra, en producirse el pico en el hidrograma, así como los valores y diferencias de los caudales máximos.

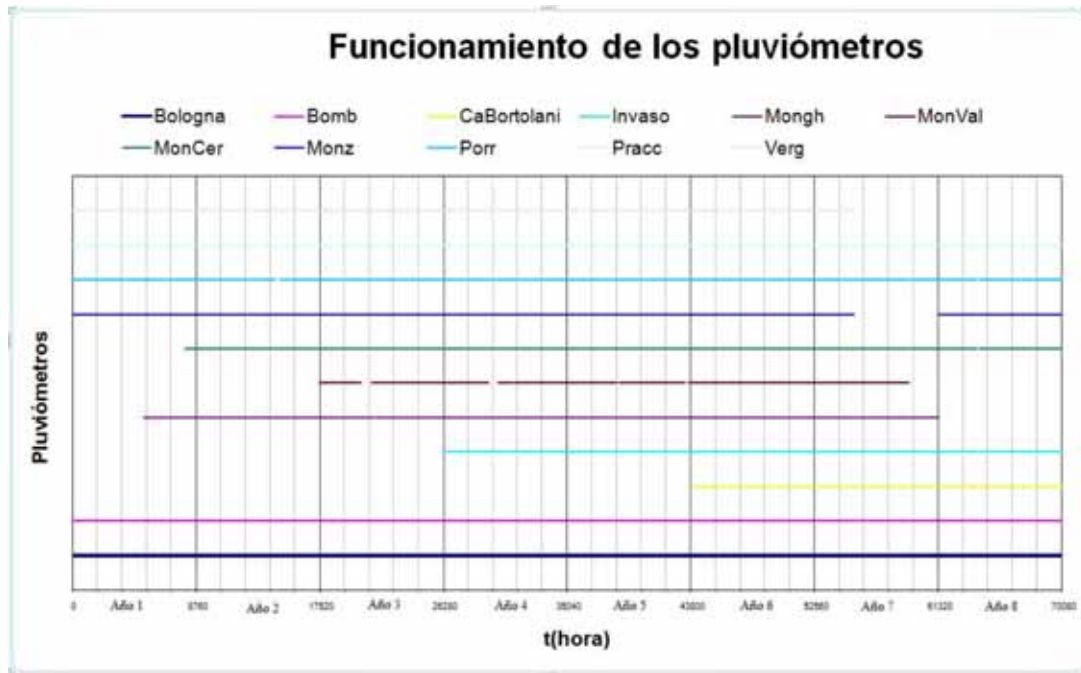


FIGURA 2. Funcionamiento de los pluviómetros en todo el período analizado.

Selección de los eventos de gastos máximos a simular

Para la selección de los eventos se tomó en consideración para cada año el evento que representaba el caudal máximo, logrando identificar un evento por año y dos en el segundo y el último año que son los que mayores gastos registran en toda la serie. Los eventos seleccionados se muestran en el Cuadro 1.

En la Figura 3 se muestra un gráfico de los gastos de los eventos seleccionados. Se puede observar que no todos los

eventos son independientes (un evento de gastos máximos no es independiente si está influenciado por una tormenta anterior que no es la que se está analizando y debido a ello el gasto inicial del hidrograma está muy por encima del gasto medio del río) y que los gastos máximos alcanzados varían desde 60,5 hasta 1508 m³/s, así como que registran dos picos en algunos de ellos, por lo que se encuentran recogidos una amplia gama de situaciones posibles a ocurrir en la cuenca.

CUADRO 1. Relación de los eventos seleccionados para la simulación

Nombre del evento	Período	Año	Caudal máximo registrado (m ³ /s) en el cierre de la cuenca
Evento 1	21/10/93 - 24/10/93	1	60,5
Evento 2.1	11/06/94 - 14/06/94	2	813
Evento 2.2	20/09/94 - 23/09/94	2	1508
Evento 3	22/12/95 - 26/12/95	3	281
Evento 4	17/11/96 - 21/11/96	4	271
Evento 5	2/01/97 - 05/01/97	5	340
Evento 6	15/04/98 - 17/04/98	6	179
Evento 7	8/02/99 - 11/02/99	7	377
Evento 8.1	05/11/00 - 07/11/00	8	1208
Evento 8.2	19/11/00 - 22/11/00	8	593

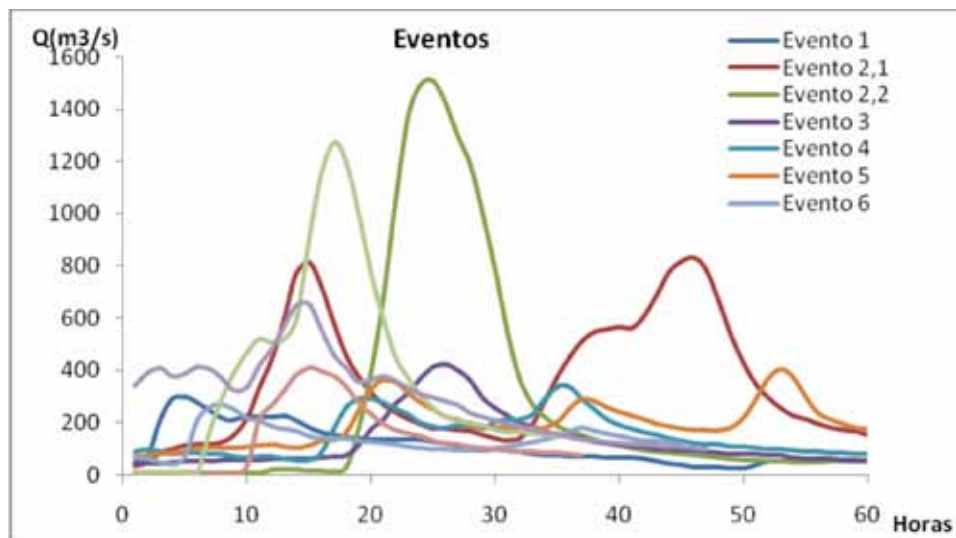


FIGURA 3. Gráficos de los eventos seleccionados.

Posteriormente se analizó el comportamiento de las precipitaciones para cada evento en relación con el gasto observado en las estaciones hidrométricas, con el objetivo de identificar el tiempo que existía entre la ocurrencia de las precipitaciones y la formación de las avenidas. A manera de ejemplo se muestra el evento 2,2, ocurrido en noviembre del 2000, en la Figura 4.

Representación de la cuenca mediante un SIG

Para la obtención del modelo hidrológico conceptual de

la cuenca a utilizar en el programa HEC-HMS se parte del uso de ArcView con la extensión Hec-Geo HMS, para lo cual se tiene el MDE para una zona que comprende la cuenca en estudio.

Se decidió la obtención de un modelo semidistribuido debido al hecho de que se solo se contaba con información puntual de la lluvia. La posibilidad de utilizar un modelo distribuido implicaba contar, entre otros, con datos del radar y en este caso no se tenían.

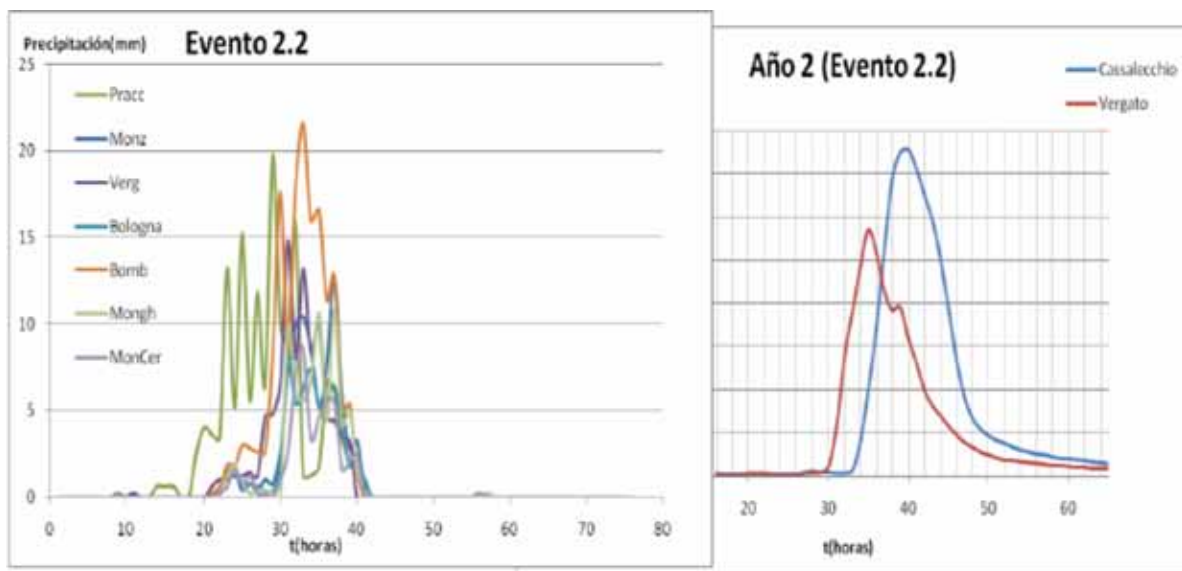


FIGURA 4. Gráficos del comportamiento de las precipitaciones en la cuenca (izquierda) y gastos registrados en las estaciones hidrométricas (derecha).

A partir del análisis del MDE se definieron: la cuenca del río Reno en función del punto de cierre ubicado en la estación hidrométrica de Casalecchio, la red de drenaje principal y la división en subcuencas, para lo cual se tuvo en cuenta las características de la red de drenaje principal y la ubicación de las estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca (Figura 5).

En el menú Hydrologic Parameters, que se activa gracias a la extensión Hec-Geo HMS (Engineers, USAC, 2003), se le asignó el valor del CN a cada una de las subcuencas obtenidas, a partir de la información del mapa del CN, para con esto pasar a la obtención del modelo hidrológico conceptual semidistribuido de la cuenca a exportar (en este caso con 4 subcuencas y 5 uniones) al programa Hec-HMS (Figura 5).

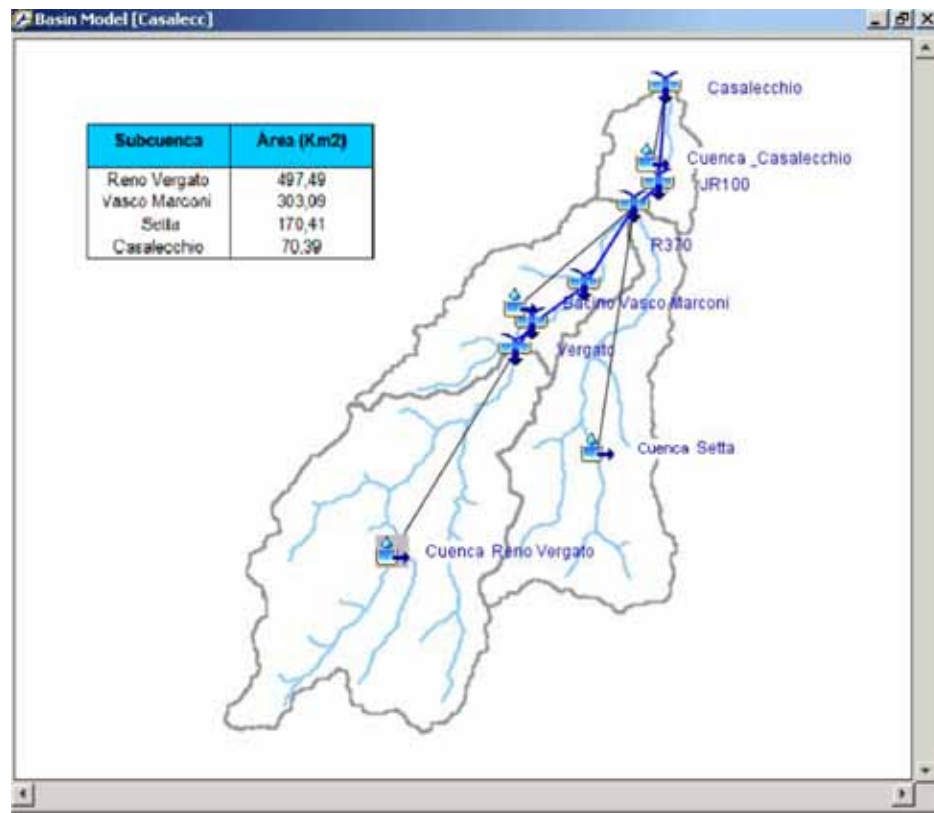


FIGURA 5. Modelo hidrológico conceptual semidistribuido de la cuenca a modelar con el programa Hec-HMS.

Determinación de las áreas de influencia para cada pluviómetro

El método de los polígonos de Thiessen establece que la lluvia de una zona de la cuenca será igual a la precipitación registrada por el pluviómetro cuya área de influencia incluye dicha zona, afectada por un factor de ponderación igual al área de influencia entre el área total de la cuenca. Este método tiene como inconveniente que no toma en consideración en forma directa las influencias de la orografía en la lluvia (Campos 1992). Esta deficiencia puede ser superada con la utilización del método de las curvas isoyetas, pero dicho procedimiento necesita de muchísima información pluviométrica (espacial y temporal) que en el momento del estudio no se disponía.

En los eventos modelados no se pudo utilizar todas las estaciones pluviométricas, debido a que en los periodos de

simulación no se encontraban todas en funcionamiento. Por lo que, para cada evento se crearon los polígonos correspondientes a las estaciones en funcionamiento y a partir de estos se estableció el área de influencia de cada pluviómetro, obteniéndose luego la serie de precipitación media ponderada para cada subcuenca.

Obtención de un modelo calibrado que reproduzca los eventos seleccionados mediante el software Hec-HMS

El software Hec-HMS usa un modelo separado para representar cada componente del proceso de formación del escurrimiento (Scharffenberg *et al.*, 2008). En función de los datos disponibles, se realizó la selección de los métodos a emplear, la cual se muestra en el Cuadro 2.

CUADRO 2. Métodos empleados y parámetros a calibrar para la modelación a escala de evento

Procesos del escurrimiento	Método	Parámetros a calibrar por subcuencas
Modelo para evaluar las pérdidas	Número de la curva del SCS (CN)	CN por subcuencas Abstracción inicial
Escurrimiento directo	Hidrograma unitario de Clark	Tiempo de concentración Coeficiente de almacenamiento
Tránsito de avenida en el río	Muskingum	Constante de almacenamiento o factor de tiempo de viaje, $K(h)$, constante para todo el tramo Factor adimensional de ponderación, X , de los caudales de entrada y salida en el tramo en la determinación del volumen

A) Estimación de las pérdidas

Los parámetros en juego en este caso son el CN y la abstracción inicial. En el caso del CN se partió de los valores que se tenían de datos, para la condición de humedad II, para celdas de tamaño 250 x 250m. Los mismos fueron asignados a cada una de las celdas que conforman la cuenca, mediante el uso del software ArcView y la extensión Hec-GeoHMS. A continuación se promediaron los valores del CN para cada una de las subcuencas determinadas, los que se muestran en el Cuadro 3.

CUADRO 3. Valores del CN en condición II y del tiempo de concentración obtenidos con la fórmula de Giandotti y en la calibración del modelo para cada subcuenca

Subcuenca	CN _{II}	tc (Giandotti)	tc (California)	tc (Calibración)
Casalecchio	76	11,60 h	1,80 h	1,00 h
Vasco Marconi	54	7,10 h	5,10 h	1,60 h
Setta	53	8,20 h	5,60 h	3,50 h
Reno Vergato	50	11,00 h	6,40 h	5,80 h

B) Método para estimar el escurrimiento directo

Como una primera aproximación, se calculó el tiempo de concentración para cada subcuenca por la fórmula de Giandotti (1). Esta ecuación es la que se propone emplear en Italia, pero tiene la limitación que se usa en cuencas de montaña. Los valores obtenidos con ella se observan en el Cuadro 3:

$$tc = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}} \quad (1)$$

donde:

tc: tiempo de concentración, h;

S: área de la subcuenca, km²;

L: longitud del cauce principal en cada subcuenca, km; (véase la Figura 5).

H: altura media de la subcuenca respecto a la sección de cierre de cada una, m.

$$tc = 0.02 * \frac{L^{0.77}}{5^{0.335}} \quad (2)$$

donde:

tc : tiempo de concentración, min;

L : longitud del río, m;

S: pendiente del río = $\frac{\Delta H}{L}$ (tanto por uno)

ΔH : desnivel del río principal, m.

Haciendo una optimización de una de las simulaciones realizadas se observó que estos debían tomar valores más bajos para poder reproducir los eventos. Entonces se decidió probar con la fórmula de California (2), que es muy empleada en el mundo entero para contrastar los valores obtenidos por la fórmula anterior, cuyos resultados se muestran en el Cuadro 3. Se puede observar que las diferencias entre los resultados obtenidos por ambas ecuaciones son grandes. Se debe agregar además que sólo la subcuenca Reno-Vergato se acerca a una cuenca de montaña, que es donde debe emplearse la ecuación 1. Debido a este análisis se decidió reducir los tiempos de concentración para todas las subcuencas en función de la pendiente y el área, como indicaba los resultados de las optimizaciones de este parámetro del modelo. Los valores del tiempo de concentración

resultantes de la optimización se muestran en el Cuadro 3, en la última columna.

C) Tránsito de la avenida en los tramos de ríos

El método de Muskingum es un método de tránsito hidrológico que se usa comúnmente para manejar relaciones variables de caudal-almacenamiento. Este método modela el almacenamiento volumétrico de la creciente en un canal de un río mediante la combinación del almacenamiento de cuña y prisma (CHOW et al., 1994). Los parámetros del método de Muskingum son: K, constante de almacenamiento y X, factor de ponderación, que expresa la influencia relativa de los gastos de entrada y salida del tramo en el volumen de almacenamiento del mismo.

Al coeficiente de almacenamiento se le dio un valor de 0.5 h, que parecía razonable para la zona, por las características que presenta y por criterios recogidos de conocedores de la cuenca. Este valor arrojó resultados aceptables en la simulación, por lo que fue el criterio que se manejó para la obtención del modelo a escala de evento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

D) Resultados obtenidos en la simulación

Al simular los eventos seleccionados con el modelo obtenido, se determinan para cada uno, el gasto pico en el cierre de la cuenca y la hora en la cual se alcanza. Estos resultados se muestran en el Cuadro 4:

Al realizar un análisis de los resultados obtenidos se puede observar que el modelo reproduce con mayor exactitud los gastos máximos por encima de 350 m³/s, con errores absolutos por debajo del 10% (cinco eventos), sin embargo para valores inferiores, en tres de los eventos, el error está por debajo del 20% y sólo en dos eventos supera el 30%. El primer evento fue el de peor resultado ya que el error en la simulación es de 48,10%, este evento es no independiente (porque se observa que está precedido de una lluvia anterior que provocó una elevación en el nivel del agua en el río) por lo que esta condición empeora el resultado obtenido. Debido a este análisis se puede plantear que el modelo obtenido puede reproducir eventos que sean independientes y con gastos mayores a 350 m³/s produciendo errores por debajo del 10%.

CUADRO 4. Valores obtenidos en la modelación para el modelo a escala de evento en el cierre de la cuenca (Casalecchio)

Evento	Fecha	Caudal modelado escala de evento		Caudal observado		Errores en la simulación
		Q (m³/s)	Hora	Q (m³/s)	Hora	(%)
1	02/03/1993	60,5	0:00	40,85	4:00	48,10
2,1	12/06/1994	813	14:00	809	14:52	0,49
2,2	22/09/1994	1508	9:00	1507	9:00	0,07
3	23/12/1995	281	19:00	422	19:00	33,41
4	19/11/1996	271	0:00	338	1:00	19,82
5	04/01/1997	340	23:00	406	23:00	16,26
6	17/04/1998	179	14:00	150	16:00	19,33
7	10/02/1999	377	5:00	412	4:00	8,49
8,1	07/11/2000	1208	2:00	1273	3:00	5,11
8,2	21/11/2000	593	9:00	652	9:00	9,05

El modelo obtenido brinda la posibilidad de realizar predicciones de los valores de los gastos máximos a producirse así como los hidrogramas en diferentes puntos de la cuenca, luego de conocer el pronóstico de lluvias en una zona determinada. Esta respuesta hidrológica de la cuenca se introduce como dato en un modelo de simulación hidráulica tal como el que sustenta el software Hec – RAS y con él se pueden determinar las áreas de inundación provocadas por la tormenta simulada en el Hec - HMS y así determinar posteriormente el alcance y los posibles daños, por ejemplo en zonas agrícolas, en urbanizaciones, etc. Los resultados de tales simulaciones posibilitan tomar medidas preventivas para salvaguardar tanto vidas humanas, como bienes de los sectores económicos que se afectarán.

CONCLUSIONES

La modelación hidrológica de las cuencas hidrográficas permite realizar pronósticos de las posibles afectaciones de una zona debido a la ocurrencia de lluvias extremas máximas, es por ello que estudios de este tipo toman auge y se ven complementados con herramientas informáticas de última generación

como son los casos de los SIG y de los modelos de simulación hidrológica como el software Hec-HMS por ejemplo.

Del modelo obtenido se puede concluir que: es capaz de reproducir los eventos extremos máximos superiores a los 350 m³/s y que sean independientes de otros eventos, se comprobó en la simulación que el comportamiento y las características del suelo son factores determinantes para estimar la precipitación efectiva y que el conocimiento de la distribución espacial de la precipitación es de suma importancia en la modelación porque reducen la incertidumbre de los resultados. Además se puede plantear que el programa Hec-HMS es bastante versátil y ofrece un buen número de posibilidades para la solución de problemas de hidrología. Es muy útil en la etapa de planeamiento sobre todo porque permite predecir la respuesta hidrológica de la cuenca a partir de modificaciones en la misma. Sin embargo, para poder emplear el potencial que tiene el programa, se requiere de una buena instrumentación en las cuencas hidrográficas, que permita obtener información suficiente, además de consistente y confiable, de los diferentes parámetros hidrológicos que requiere el modelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMPOS, D. F.: *Procesos del Ciclo Hidrológico*, 524pp., Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 1992
- CHOW, V. T. M., DAVID R.; MAYS, LARRY W.: *Hidrología aplicada*, 585pp., Transversal 42B No. 19-77. Traducido de la primera edición en inglés de Applied Hydrology, Santafé de Bogotá, Colombia, 1994.
- ENGINEERS, U. S. A. C.: *Geospatial Hydrologic Modeling Extension*. 267pp., *User's Manual*, CPD-77. 609 St. Davis, CA, HQ U.S. Army Corps of Engineers. **Version 1.1.**, St. Davis, CA, 2003.
- GARCÍA, J. M. "Experiencias cubanas en la institucionalización del manejo integrado de cuencas." *Voluntad Hidráulica*, 2: 15-28, 2006.
- SCHARFFENBERG, W. A. and F. MATTHEW J.: *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*, 228pp., *User's Manual* (Version 3.2). CPD-74A. 441 G St., NW, Washington, DC, HQ U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC , USA, (2008).