

Metodología para la simulación hidrológica de eventos extremos máximos en ausencia de datos hidrométricos a escala horaria

Methodology for hydrological simulation of maximum extreme events, in absence of hourly scale floods data

Yakelin Rodríguez López¹, Norberto Marrero de León²

RESUMEN. Para enfrentar el fenómeno de las inundaciones resulta imprescindible realizar análisis hidrológicos a escalas pequeñas de tiempo en muchos de los casos a escala horaria. Esto dificulta los estudios, debido a la necesidad de contar con mediciones de gastos que satisfagan esta condición. Es por esta razón que este trabajo brinda una propuesta de metodología para enfrentar situaciones con estas características, basado en varios estudios realizados en cuencas cubanas de máxima prioridad nacional.

Palabras clave: gastos, Hec-HMS, ArcView, variantes, inundación.

ABSTRACT. To face the phenomenon of the floods it is indispensable to carry out hydrological analysis to small scales of times, in many of the cases to scale hourly. This hinders the studies, due to the necessity of having expenses measurements that satisfy this condition. For this reason, this investigation proposes a methodology to face situations like these, based on several studies carried out in some important Cuban basins.

Keywords: expenses, Hec-HMS, ArcView, variants, flooding.

INTRODUCCIÓN

Los eventos extremos máximos requieren de mucha atención debido a los daños que causan las consecuentes inundaciones. Cuba es azotada frecuentemente por fenómenos extremos de lluvias, ya sean de naturaleza convectiva o ciclónica.

Las características litológicas, así como el relieve y la forma estrecha de la isla de Cuba provocan que en la mayoría de las cuencas cubanas la componente del escurrimiento superficial tenga mayor peso que la componente subterránea.

Uno de los principales logros de la Defensa Civil Nacional es el Sistema de Alerta Temprana, pero el mismo se ve limitado en sus posibilidades por la falta de herramientas científicamente sustentadas para la correcta predicción de las avenidas y sus inundaciones, de ahí que sus pronósticos tienen que ser conservadores para poder garantizar la salvaguarda de

las vidas humanas y de los principales renglones de la economía nacional o regional. En correspondencia con lo anterior, entre el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) se proyecta el desarrollo de actividades científicas y tecnológicas tendientes a lograr una herramienta ingeniera mediante la cual poder, de manera confiable y eficiente, realizar predicciones de avenidas y sus consecuentes inundaciones (Estrada, 2008).

El objetivo de esta investigación consiste en brindar una metodología para realizar los estudios de simulación hidrológica en países tropicales utilizando software de aplicación mundial, apoyados en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Resulta muy importante en los estudios de este tipo, sobre todo cuando no existen suficientes datos para calibrar el modelo hidrológico, contar con un análisis de los resultados de varias simulaciones de eventos que puedan producirse en

Recibido 15/07/09, aprobado 22/09/10, trabajo 54/10, investigación.

¹ Ingeniera Hidráulica, Máster 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, La 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".

la zona para conocer las características generales de las respuestas de la cuenca ante dichos eventos, y así poder tomar decisiones, partiendo de la información de la lluvia que esté cayendo en la región en un momento dado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El problema abordado en esta investigación ha despertado mucho interés en el organismo rector de la actividad hidráulica en el país, el INRH, quien ha contratado el servicio del CIH, en una primera etapa, para el desarrollo de un proyecto que tiene como uno de los objetivos predecir el comportamiento hidrológico de cuatro cuencas cubanas clasificadas como de máxima prioridad nacional.

Por lo general, la condición de las cuencas cubanas (en cuanto a información disponible) es que cuentan con muchos pluviómetros instalados con alrededor de 30 años de observación, pero en pocas existen pluviógrafos en funcionamiento y las cartas de los que pudieron existir, en su mayoría, no están disponibles por diferentes motivos. Es por esta razón que predecir el comportamiento temporal de las lluvias máximas es una tarea que requiere de un trabajo investigativo profundo. Una alternativa a este problema es evaluar diferentes variantes a partir de estudios realizados del comportamiento de las precipitaciones tanto para Cuba como para las zonas de Estados Unidos más próximas a la Isla. A continuación se muestra una metodología propuesta para encarar esta situación.

Metodología propuesta:

1. Recopilar datos necesarios para el estudio.
 - Modelo digital de elevaciones (MDE) a una escala adecuada (1:25 000 o menor) que incluya la zona en estudio.
 - Coordenadas del cierre o salida de la cuenca.
 - Ubicación de las zonas de alto riesgo a las inundaciones dentro de la cuenca.
 - Datos de lluvias de los pluviómetros (valores de las láminas de lluvia, así como su ubicación y altura) ubicados dentro y fuera (cercanos a la divisoria) de la cuenca.
 - Curva de gastos contra nivel en uno o varios puntos del sistema fluvial, preferiblemente ubicados en las zonas de alto riesgo.
 - Datos de tipo y uso de suelos de la zona (como alternativa, valores del Número de la Curva, NC, al menos por subcuencas, partiendo de la premisa de que se usarán los métodos propuestos por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos).
 - Coordenadas de ubicación del o los embalses, en caso de su existencia en la cuenca bajo estudio.
2. Representación de la cuenca mediante un SIG compatible con las extensiones de carácter hidrológico que se utilizarán.
3. Obtención del modelo hidrológico conceptual de la cuenca.
4. Creación de varios escenarios de lluvias máximas que impacten la cuenca.
5. Seleccionar los métodos más adecuados para la modelación hidrológica a partir del software seleccionado para el estudio.
6. En caso de existir embalses en la cuenca se deben suministrar

sus datos técnicos fundamentales.

7. Comprobar la correcta selección de los métodos y de sus parámetros y efectuar la corrida de simulación correspondiente para cada uno de los escenarios de lluvias máximas contenidos en el diseño de los experimentos.
8. Realizar el análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca en todos los puntos de interés para todas las simulaciones realizadas.
9. Analizar las posibles afectaciones por inundación para las diferentes variantes.

Representación de la cuenca mediante un SIG

A partir del MDE con el empleo del SIG ArcView GIS ver3.3 y sus extensiones (programas complementarios que proporcionan funciones especializadas de SIG): **Spatial Analyst** y **HEC-GeoHMS**, se obtienen ocho conjuntos de datos que describen los patrones de drenaje de la cuenca y permiten la delimitación de las subcuencas y la red de drenaje (Fernández, 2005).

La herramienta HEC-GeoHMS ha sido desarrollada como un grupo de herramientas hidrológicas geoespaciales para ingenieros e hidrólogos con una limitada experiencia en SIG. Se usa para procesar los datos de la cuenca después de haber realizado una preparación y compilación inicial de los datos del terreno (Nanía, 2007). Esta extensión conecta al SIG con el software de simulación hidrológica Hec-HMS.

Modelo hidrológico conceptual

A la hora de decidir el modelo hidrológico conceptual de la cuenca hay que tener en cuenta que este puede ser agregado, distribuido o semidistribuido. Los modelos agregados simulan el funcionamiento del sistema cuenca de forma global, en cambio los distribuidos consideran la distribución espacial y temporal de todas las variables y características físicas de la cuenca involucrada en el proceso de simulación y por último los modelos semidistribuidos, se pueden considerar como un caso intermedio de los dos anteriores, integrando un modelo agregado "n" veces, tantas como se divida la zona en subcuencas (González *et al*, 1998). Con la limitación en cuanto a la disponibilidad de información que se presenta en las cuencas cubanas, lo más aconsejable es concebir un modelo semidistribuido o cuasi-distribuido como también se les conoce.

De forma general, los pasos a seguir para la obtención del modelo hidrológico conceptual preliminar (porque el definitivo se obtendrá al incorporar los elementos hidrológicos, como por ejemplo un embalse) con el SIG y sus extensiones son los siguientes:

1. Pre procesamiento del terreno (se realiza una serie de análisis de la zona a partir de la información que brinda el SIG en esta etapa, como mapas de la dirección del flujo, el sistema fluvial, así como las posibles cuencas existentes).
2. Extracción del área de la cuenca objeto de estudio (a partir del punto de cierre de la cuenca se obtiene el parteaguas o divisoria de la misma).
3. Procesamiento de la cuenca (esta opción permite unir subcuencas, unir cauces, obtener el perfil del río y separar cuencas en las confluencias).

4. Obtención de las características de la cuenca y su sistema fluvial.
5. Exportación al software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling Sistem) (se realizan una serie de operaciones para preparar los datos que sirvan de entrada al HEC-HMS).

Un ejemplo de un modelo hidrológico conceptual preliminar se muestra en la Figura 1:

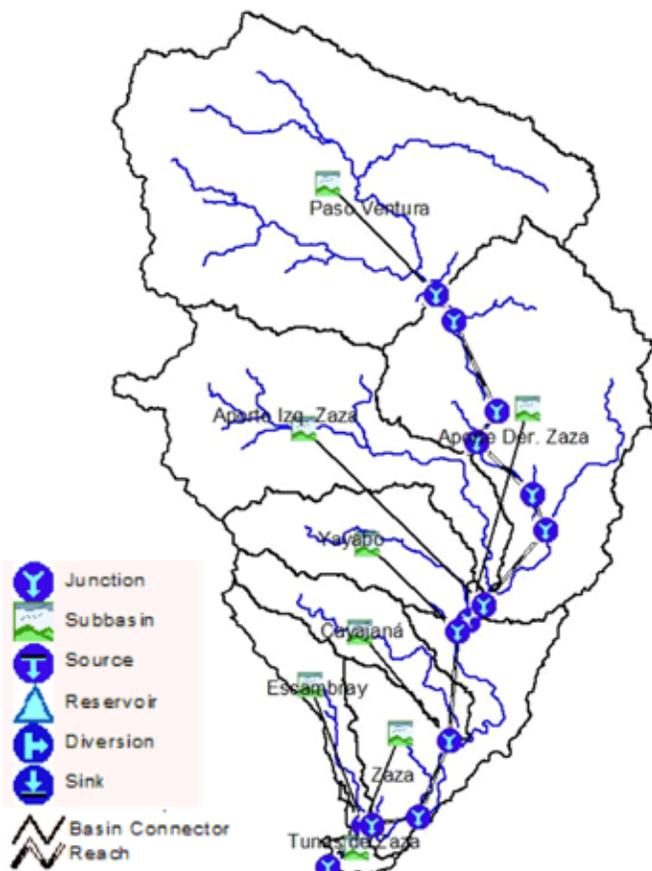


FIGURA 1. Modelo hidrológico conceptual preliminar de Cuenca Zaza a exportar al HEC-HMS.

Desarrollo de varios escenarios de lluvias máximas que impacten la cuenca

Como es conocido, las lluvias máximas son caracterizadas en la práctica por 3 parámetros: duración, lámina total e intensidad así como por la variación temporal (hietograma) de estas dos últimas durante el tiempo que dure la tormenta o aguacero. En cuanto a la duración a escoger debe tenerse en cuenta los registros de lluvias máximas históricas que caractericen la zona de estudio. Por ejemplo, en (II-UNAM, 1996) se plantea “En cuencas pequeñas o en el diseño de estructuras menores, se recomienda usar duraciones menores o iguales a 6 h, sin embargo, también se suele considerar que la duración sea igual al tiempo de concentración”. Otra duración muy frecuentemente utilizada para estudios de inundación es la de 24 horas acerca de la cual se refieren los siguientes comentarios.

Hasta el momento, los autores han reconocido dos variantes para distribuir temporalmente la lluvia de 24 horas, a falta de registros pluviográficos, estas alternativas se explican a continuación:

Variante A: Usando el patrón de comportamiento de la lluvia determinado por el Servicio de Conservación del Suelo (SCS) de los Estados Unidos.

El SCS del U. S. Department of Agriculture (1986) desarrolló hietogramas sintéticos adimensionales de tormentas para utilizarse en los Estados Unidos con duraciones de tormentas de 6 y 24 horas. Estos hietogramas se dedujeron al utilizar la información presentada por Hershfield (1961) y Miller, Frederick y Tracey (1973) y datos de tormentas adicionales. Existen cuatro tormentas de 24 horas de duración, llamadas Tipo I, IA, II y III, representadas en forma de curvas de masa (Tabla 1) a partir de las cuales se elaboran los hietogramas correspondientes. Los Tipos I y IA corresponden al clima marítimo del Pacífico con inviernos húmedos y veranos secos. El Tipo III corresponde al Golfo de México y las áreas costeras del Atlántico, donde las tormentas tropicales producen lluvias de 24 horas muy grandes. El Tipo II corresponde al resto del país (Chow *et al.*, 1994).

Por lo anteriormente expuesto, el tipo de tormenta que debe utilizarse en nuestro país es el tipo III, debido a la similitud de las tormentas que dieron origen a este patrón de comportamiento y las tormentas que se producen en la isla.

TABLA 1. Distribución de la lluvia de 24 h de duración según el SCS (representadas en forma de curvas de masa)

		Tormenta de 24 horas			
		Pr/P24			
Hora t	t/24	Tipo I	Tipo IA	Tipo II	Tipo III
0	0	0	0	0	0
2.0	0.083	0.035	0.050	0.022	0.020
4.0	0.167	0.076	0.116	0.048	0.043
6.0	0.250	0.125	0.206	0.080	0.072
7.0	0.292	0.156	0.268	0.098	0.089
8.0	0.333	0.194	0.425	0.120	0.115
8.5	0.354	0.219	0.480	0.133	0.130
9.0	0.375	0.254	0.520	0.147	0.148
9.5	0.396	0.303	0.550	0.163	0.167
9.75	0.406	0.362	0.564	0.172	0.178
10.0	0.417	0.515	0.577	0.181	0.189
10.5	0.438	0.583	0.601	0.204	0.216
11.0	0.459	0.624	0.624	0.235	0.250
11.5	0.479	0.654	0.645	0.283	0.298
11.75	0.489	0.669	0.655	0.357	0.339
12.0	0.500	0.682	0.664	0.663	0.500
12.5	0.521	0.706	0.683	0.735	0.702
13.0	0.542	0.727	0.701	0.772	0.751
13.5	0.563	0.748	0.719	0.799	0.785
14.0	0.583	0.767	0.736	0.820	0.811
16.0	0.667	0.830	0.800	0.880	0.886
20.0	0.833	0.926	0.906	0.952	0.957
24.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Fuente: U.S. Dept. of Agriculture. Soil Conservation Service, 1973, 1986.

Al ser este patrón adimensional se necesita realizar un estudio de probabilidad de la lluvia diaria para obtener las láminas correspondientes a diferentes probabilidades, para darle dimensiones al hietograma. Un ejemplo de este proceso se muestra en la Figura 2:

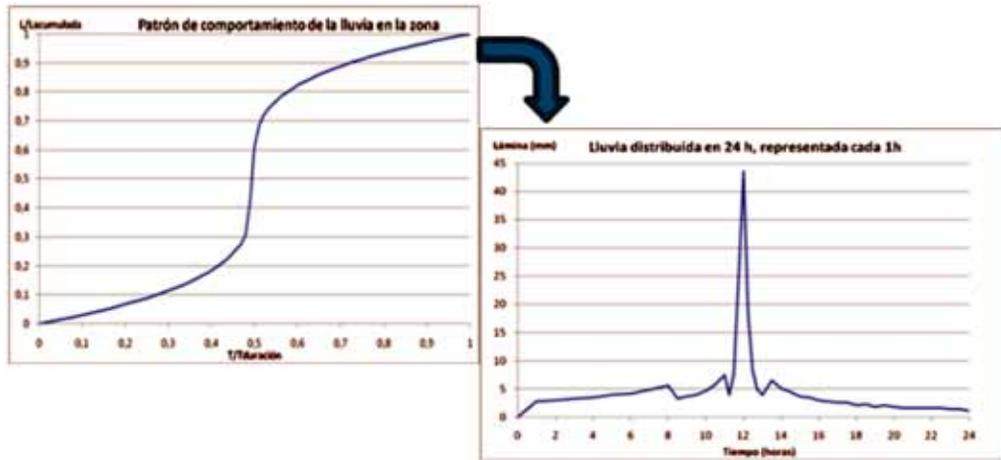


FIGURA 2. Ejemplo del dimensionamiento del patrón de comportamiento de la tormenta tipo III en un hietograma para una lluvia del 1% de probabilidad para una zona en la cuenca del río Zaza.

Variante B: Basada en un estudio de las intensidades de lluvia mayores de 50 mm para Cuba.

El estudio de Planos *et al.*, 2004, se basa en analizar las lluvias mayores de 50 mm, con una duración superior a 60 minutos para precipitaciones convectivas y ciclónicas, a partir de la información pluviométrica y pluviográfica que manejan el INRH y el Instituto de Meteorología (INSMET). Basados en una serie de mapas obtenidos (láminas de 100, 50, 20, 10, 5 y 2 años de periodo de retorno, probabilidades de excedencia para una lluvia de 100 mm en varios periodos de retorno, así como la lámina promedio de lluvia máxima absoluta, entre otros) estos investigadores realizaron una valoración integral del peligro por precipitaciones intensas logrando clasificar las áreas del país por grado de peligro.

Posteriormente se procede a la categorización de las áreas de peligro, aplicando la clasificación descrita en la tabla 2. Para obtener una evaluación integral del peligro en cada zona representada por un pluviómetro, se obtiene el valor promedio de los indicadores presentados en la tabla 2 y sobre esta base, el grado de peligro se valoró según se muestra en la Tabla 3.

Los autores delimitan tres regiones de peligro, clasificadas como: **AI**: peligro moderado, **AII**: peligro y **AIII**: mayor peligro (en esta última región están sumadas las áreas de mayor peligro y la de peligro extremo). Por último para cada área de peligro se presentan las curvas de Intensidad, Frecuencia y Duración (IFD) para diferentes probabilidades.

TABLAS 2 y 3. Criterios utilizados para clasificar el peligro en el mapa de evaluación integral y categoría de peligro por intensas lluvias (Planos *et al.*, 2004)

Indicador	Rango	Categoría	Rango Categoría	Descripción
Lámina máxima promedio	<100	1	< 1	Área de peligro moderado
	101 - 125	2	2 - 3.9	Área de peligro
	126 - 150	3	4 - 4.9	Área de mayor peligro
	151 - 200	4	5	Área de peligro extremo
	>200	5		
Frecuencia láminas > 100 mm	<0.2	1		
	0.2 - 0.29	2		
	0.3 - 0.39	3		
	0.4 - 0.49	4		
	> 0.49	5		
Lámina Máxima absoluta	<100	1		
	100 - 199	2		
	200 - 299	3		
	300 - 399	4		
	>399	5		
Probabilidad excedencia en 2 años lámina => 100 mm	< 0.5	2		
	>0.5	4		

Para dar una visión del comportamiento espacial del peligro por precipitaciones intensas confeccionaron el mapa que se muestra en la Figura 3.

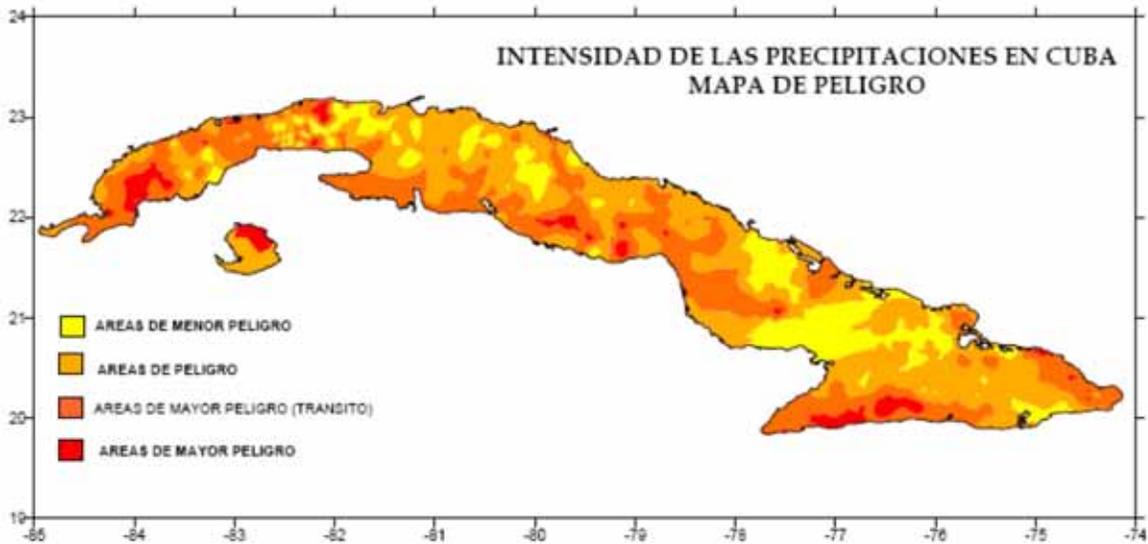


FIGURA 3. Mapa de peligro por inundaciones intensas (Planos *et al.*, 2004).

Para evaluar la distribución temporal de la precipitación en la cuenca se emplea la información de las curvas IFD para un área de peligro, o la combinación de varias áreas de peligro, en función de la zona en estudio y su afectación por una o varias áreas de peligro.

A partir de las curvas IFD se obtienen los hietogramas para una duración y probabilidad determinada. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de esta transformación para una lluvia de duración de 24 horas y probabilidades de 1 y 10%.

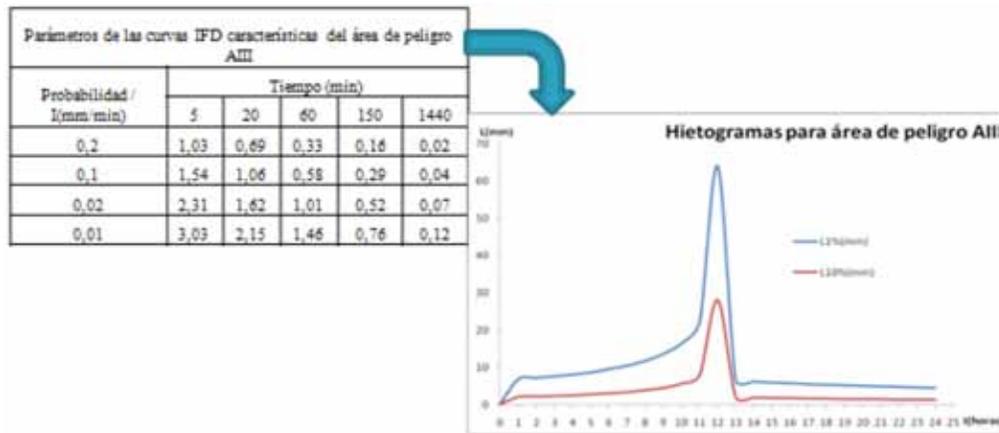


FIGURA 4. Obtención de los hietogramas con duración de 24 horas y probabilidades de 1 y 10% a partir de las curvas IFD obtenidas por Planos *et al.* (2004), para la cuenca Zaza.

La confección de las variantes a analizar también pueden estar sujeta a los siguientes elementos cambiantes: la dirección del impacto de la tormenta en la cuenca, el estado de humedad del suelo, el nivel en el embalse, así como otras condiciones que se puedan considerar como posibles alternativas.

Selección de los métodos para la simulación hidrológica

El software HEC-HMS emplea los siguientes modelos para la obtención de uno general que transforme la lluvia en

escurrimiento en la cuenca bajo estudio:

- Pérdidas.
- Transformación lluvia neta - escurrimiento.
- Flujo base.
- Tránsito de la avenida por el cauce

Para cada modelo se proponen varios métodos, cuyo criterio de selección depende de la información disponible, del conocimiento del modelador de cada modelo, así como de las características de la cuenca.

Representación del comportamiento del embalse en la cuenca

El software HEC-HMS da la posibilidad de incluir en el modelo hidrológico conceptual de la cuenca los elementos hidrológicos que se necesiten representar. A continuación se relacionan estos elementos, que pueden introducirse haciendo uso de los iconos del programa (Nanía 2007):

1. El embalse (reservoir), se emplea para modelar la retención y la atenuación de un hidrograma (gráfico que representa el gasto que circula en un punto del río en el tiempo) causado por un embalse o depósito de retención.
2. Las fuentes (Source), se usan para introducir agua dentro del

modelo de la cuenca, no tiene entradas y la salida la define el usuario.

3. Los sumideros (sink), se aplican para representar el punto de salida de la cuenca, la entrada puede provenir de uno o más elementos situados aguas arriba de este elemento. El sumidero no tiene salida.
4. La derivación (diversion), se usa para modelar un flujo de agua que abandona o sale de un tramo de cauce.

Un ejemplo de cómo quedaría el modelo hidrológico conceptual de la cuenca Zaza, ejemplo que se ha venido mostrando, se observa en la figura 5, donde ya se encuentra incluido el embalse Zaza para su posterior análisis.



FIGURA 5. Modelo hidrológico conceptual de la cuenca del río Zaza, incluyendo el embalse.

Análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca

En esta sección se relacionan algunas de las conclusiones principales derivadas de estudios realizados en el CIH en varias cuencas cubanas, con la participación de los autores, estudiantes y profesores de la carrera de Ingeniería Hidráulica del Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”-CUJAE, como parte de las tareas planteadas en los proyectos que se desarrollan con el INRH.

En dichos estudios se ha llegado a los siguientes criterios a partir de los análisis realizados, que pueden llevar al lector a no tomar un camino erróneo en su investigación:

- La dirección de la tormenta tiene influencia en el pico del hidrograma y en el tiempo en que éste se alcanza.
- Resulta evidente que la condición de suelo seco en la cuenca, al tener una capacidad de infiltración mucho mayor, produce

hidrogramas de menor gasto pico y volumen que en los escenarios de mayor humedad.

- ▶ Aunque el hietograma empleado en la variante A, parte de un hietograma adimensional propuesto por el SCS, aplicado a una lluvia de 24 horas de duración y un tiempo al pico de la lámina máxima que se alcanza a la mitad del aguacero, se obtuvieron gastos máximos que corresponden a los expuestos por los expertos del INRH que han trabajado en esta región. Sería recomendable realizar simulaciones con otras duraciones de las tormentas.
- ▶ Si se parte de un análisis como el de la variante B, se obtendrán gastos máximos y volúmenes que sobrepasan los obtenidos con lluvias registradas en la cuenca, lo cual merece un estudio más detallado, debido a que esta conclusión se ha obtenido para uno sólo de los estudios de caso (cuenca Zaza).
- ▶ Si se define una variante que implique una lluvia más intensa en una zona alta de la cuenca, se evidencia la influencia de la misma, debido a que el hidrograma obtenido tiene un pico mayor y con un tiempo base mayor.

Analizar las posibles afectaciones por inundación para las diferentes variantes

Al contar con los hidrogramas para las diferentes variantes en un punto de la cuenca y si se tiene la curva de gasto (relación de nivel de agua contra caudal) se pueden hacer estimaciones de las posibles afectaciones como consecuencia de la inundación en esa área, empleando para ello los valores de gastos máximos obtenidos e interpolando en la curva para conocer el nivel que puede alcanzar el agua en esas condiciones. Para un estudio más profundo y detallado sobre las profundidades y áreas de inundación se recomienda utilizar algún software de simulación hidráulica, tal como el Hydrologic Engineering Center–Hydraulic Analysis System (HEC–RAS).

CONCLUSIONES

- Los estudios hidrológicos apoyados en las herramientas informáticas actuales brindan muchas posibilidades, entre las que se pueden citar la visualización y el análisis de los datos.
- La carencia de datos de lluvia a escala horaria, obliga a crear diferentes variantes para el análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca ante diferentes escenarios, así mismo la información del tipo y uso del suelo es de vital importancia en el estudio hidrológico.
- La creación de varios escenarios permiten evaluar la cuenca ante diferentes situaciones que se pueden presentar en la realidad, lográndose conocer el comportamiento de los caudales máximos y los hidrogramas de las avenidas en las zonas vulnerables a las inundaciones.
- Para lograr mejores resultados es imprescindible contar con planos cartográficos a pequeñas escalas (de 1:25 000 a 1:10 000) de la cuenca, además deben realizarse análisis más a fondo del comportamiento de las precipitaciones en la zona de estudio y de ser posible encontrar un patrón de distribución de la lluvia para la región. Es importante contar con información más específica (en cuanto al tiempo) de la lluvia y del escurrimiento en las estaciones de medición, para lograr calibrar el modelo lluvia – escurrimiento, empleando el programa HEC-HMS.
- Los autores consideran que se deben hacer extensivos trabajos de esta naturaleza al resto de las cuencas cubanas que son frecuentemente golpeadas por inundaciones, con la debida capacitación de personal de la producción para que domine las herramientas informáticas que son muy usadas a nivel internacional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHOW, V. T. M., R. DAVID R; W. MAYS: *Hidrología aplicada*, Transversal 42B No. 19-77. Santafé de Bogotá, Colombia, Traducido de la primera edición en inglés de Applied Hydrology, 585pp. Bogotá, Colombia, 1994
- ESTRADA, V.: *Diseño de la investigación*, Diseño de la investigación en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, INRH, Dirección del Trasvase, Raudal, Holguín, Cuba, 2008.
- FERNÁNDEZ, H. M.: *Curso avanzado de Arcview 3.x.*, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (ISPJAE), CUJAE, Marianao, La Habana, Cuba, 2005.
- GONZÁLEZ, L. J.M.; B. MARTÍNEZ y N. MARRERO: *Hidrología Superficial para Ingenieros*, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (ISPJAE), Ed. CUJAE, La Habana, Cuba, 1998.
- Manual de Ingeniería de Ríos. Estudio Hidrológico para Obras de Protección*, Capítulo 3, Instituto de Ingeniería, Comisión Nacional del Agua, UNAM, Ciudad México, México, 1996.
- NANÍA, L. S.: *Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1*, 76pp., Universidad de Granada, Curso de especialización: Cálculo de Avenida con HEC-HMS y SIG. L. S., Granada, España.2007.
- PLANOS, E., M. LIMIA y R. VEGA, R.: *Intensidad de las precipitaciones en Cuba*, 80pp., Programa Ramal: Análisis y pronóstico del tiempo y el clima terrestre y espacial, Proyecto 4053, La Habana, Cuba, 2004.