

Simulación hidrológica en dos subcuencas de la cuenca del río Zaza de Cuba

Yakelin Rodríguez López

Doctora en Ciencias Técnicas, Profesora Auxiliar, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

e-mail: yake@cih.cujae.edu.cu

Norberto Marrero de León

Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

e-mail: marrero@tesla.cujae.edu.cu

RESUMEN

El estudio del proceso lluvia - escurrimiento es imprescindible para el pronóstico de inundaciones y la puesta en marcha de los sistemas de alerta temprana. El presente estudio recoge un procedimiento que puede ser empleado en la modelación hidrológica de eventos extremos máximos de escurrimiento. El caso de estudio es la cuenca del río Zaza, donde se encuentra uno de los mayores embalses de Cuba. En el proceso de calibración-validación de los parámetros, se logró obtener un modelo que representa el proceso lluvia escurrimiento en las dos subcuencas aforadas de esta zona (Paso Ventura y Yayabo), produciéndose errores en la estimación del caudal máximo menores que 16 %. La modelación se realizó con el software de simulación hidrológica HEC-HMS.

Palabras clave: calibración, cuenca, escurrimiento, lluvia, modelación

Hydrological simulation results in two sub-basins of Zaza basin

ABSTRACT

The study of the rainfall - runoff process is essential for flood forecasting and implementation of early warning systems. This study reports a method that can be used in hydrological modeling of runoff extreme maximums. The case study is the Zaza river basin, where the largest reservoir in Cuba is located. In the process of calibration-validation of parameters, it was possible to obtain a model that represents the rainfall-runoff process in the two gauged sub-basins in this area (Paso Ventura and Yayabo), causing errors in the estimation of the maximum flow rate less than 16 %. The model was implemented using the hydrological simulation software HEC-HMS.

Keywords: calibration, basin, runoff, rainfall, modeling

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones por avenidas constituyen ocurrencias naturales o tecnológicas (por ejemplo fenómenos climatológicos extremos, rotura de presas, deficiente operación de obras de control como compuertas, válvulas, entre otros), causantes en general de trastornos, peligros y daños a múltiples actividades, bienes y hasta la misma vida del hombre. La problemática asociada con este evento hidrológico extremo es compleja, ya que intervienen numerosos factores incluidos en las características físicas y morfométricas de las cuencas hidrológicas superficiales, tales como la hidrografía, los tipos y usos del suelo, la geología, la actividad antrópica, entre otros (Rodríguez 2011).

El estudio hidrológico de cuencas hidrográficas constituye una etapa muy importante en la modelación de eventos extremos máximos de lluvias y gastos máximos. El conocimiento de las condiciones de la zona de estudio, las características fisiográficas de la cuenca y del sistema fluvial, entre otras, permite la caracterización del área analizada y condicionan el éxito de la modelación. En Cuba la prevención, atenuación o mitigación de avenidas a causa de lluvias intensas sigue siendo un problema a resolver, la cual se inicia con la modelación hidrológica de la causa climatológica del fenómeno, o sea, la precipitación, y del efecto, el escurrimiento, a partir de una metodología apoyada sobre bases científicas y tecnológicas actuales. La modelación hidrológica es una tarea difícil debido a que depende de muchos factores, que deben determinarse a partir de un gran volumen de información, que en la mayoría de las cuencas cubanas se carece o no está completa (Estrada 2011).

El presente estudio tiene como objetivo brindar un procedimiento para la modelación hidrológica de cuencas, en las condiciones limitadas de información generalmente disponible en las cuencas cubanas, a partir del empleo del software de simulación hidrológica HEC-HMS y aplicar el mismo a dos subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Zaza.

PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio que se analiza es la cuenca del río Zaza, ubicada en la zona central de Cuba, abarcando parte de los territorios de las provincias Villa Clara y Sancti Spíritus. El área de la cuenca es de 2 378,28 km² hasta su desembocadura al mar, su perímetro es 334,4 km y la longitud del río principal es de 127,2 km (Rodríguez 2011).

Para la modelación hidrológica de las subcuencas pertenecientes a esta cuenca se contó con información pluviométrica de 70 equipos (ubicados dentro y fuera de la cuenca pero cerca del parteaguas), hidrogramas, cartas de limnógrafos y curvas de gastos de las estaciones de aforo Paso Ventura (sobre el río Zaza) y Bernardo Arias (sobre el afluente Yayabo) (ver figura 1), mapas de los tipos de suelos, la ubicación de los embalses dentro de la cuenca (aunque sólo se considera el más grande) y el modelo digital de elevaciones (MDE) a escala: 1:25 000.

Procedimiento empleado para la modelación hidrológica de cuencas

El procedimiento empleado se resume en las tareas siguientes:

- Recopilación de la información hidrometeorológica disponible
- Selección de los eventos para calibrar y validar el modelo lluvia – escurrimiento
- Obtención de hietogramas
- Obtención del Modelo Hidrológico Conceptual (MHC) de la cuenca
- Selección de los métodos empleados en la modelación hidrológica
- Procesamiento de la información hidrométrica

- Calibración del modelo lluvia – escurrimiento
- Validación del modelo obtenido

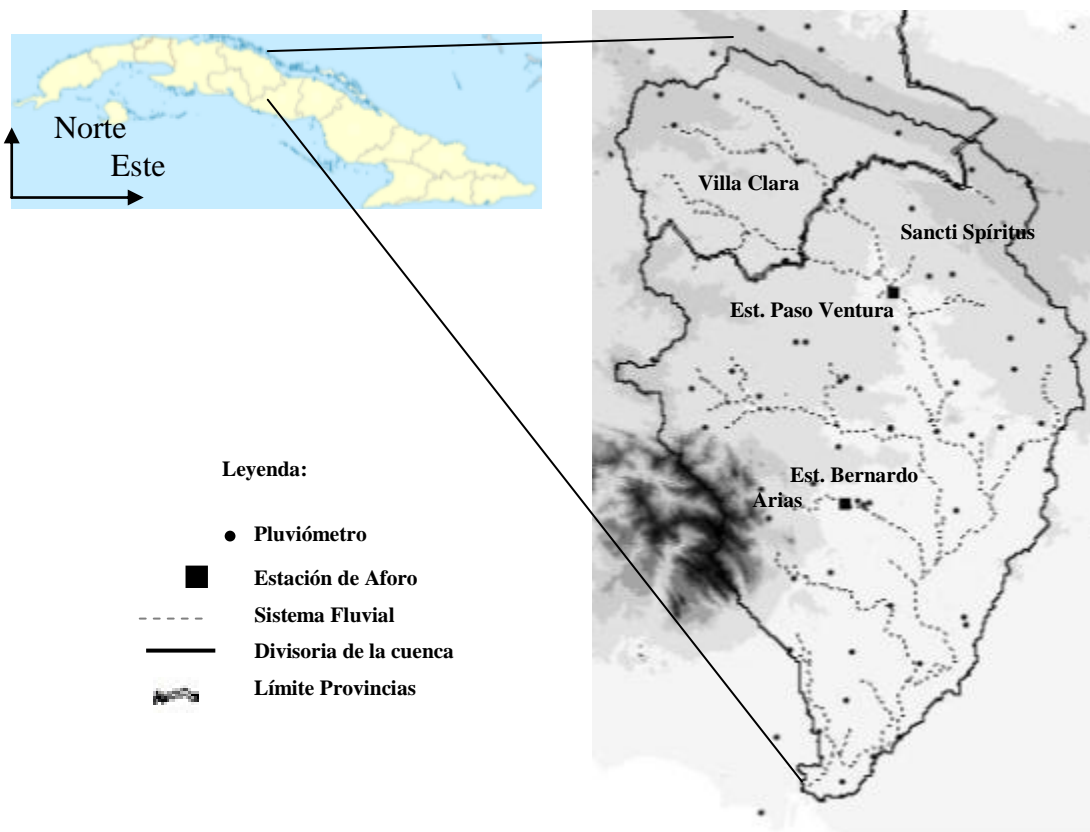


Figura 1. Ubicación de la cuenca Zaza, de los pluviómetros disponibles y de las estaciones hidrométricas para el estudio

Recopilación de la información hidrometeorológica disponible

Para el presente estudio se contó con hidrogramas calculados por especialistas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) que están encargados de la cuenca, para un evento lluvioso en el año 2002. Además se recopilaron las curvas de gastos de las estaciones hidrométricas, obtenidas a partir de aforos realizados en el año 2005. También se tenían cartas limnimétricas de varios eventos al igual que las series de gastos máximos anuales para las dos estaciones.

Selección de los eventos para calibrar y validar el modelo lluvia – escurrimiento

Según Estrada (2011) y Pacheco (2011), para la selección de los eventos a calibrar y validar se deben analizar, simultáneamente, los registros de lluvia y de gastos máximos. Así, en el caso de la información de precipitación, se presentan las siguientes dificultades: cuando se miden los valores de lluvia a partir de los pluviómetros, esta lectura se realiza a las 8:00 am de cada día, y debe anotarse en este día, pero realmente es necesario dilucidar en que día (o días) ocurrió el

volumen de agua precipitada que dio lugar a los gastos o caudales, por lo que es preciso comparar el conjunto de pluviógrafos, en caso de existir, con los hidrogramas.

A partir de las recomendaciones realizadas por Estrada (2011) y Pacheco (2011) y las experiencias de los autores en la modelación de eventos extremos máximos de lluvia y escurrimiento, se propone el procedimiento presentado en el diagrama de la figura 2.

Las estaciones que registran la precipitación, algunas veces están cerca del centro de la tormenta, otras veces cerca de los bordes exteriores y otras veces entre estos dos puntos. Una lluvia intensa es improbable que esté distribuida de forma uniforme sobre una cuenca grande. Para una probabilidad y duración específica, la lámina promedio sobre un área es menor que la lámina en puntos cuyos valores estén por encima de la promedio anterior. Debido a esto se recomienda realizar un ajuste a la lluvia puntual por área, empleando el gráfico propuesto originalmente por USWB (1958).

La selección de los eventos se realizó empleando el procedimiento propuesto en la figura 2 y considerando los criterios siguientes:

- A partir de la serie de gastos máximos anuales de las dos estaciones hidrométricas, se verificaron los años en que se presentó el máximo caudal en la misma fecha en las dos estaciones hidrométricas.
- Para los eventos que cumplieran con la condición anterior, se seleccionaron primeramente, los que contaran con información hidrométrica (limnigramas, curvas de gasto o aforo, hidrogramas) en las dos estaciones, para la calibración del modelo para cada evento.
- Analizando la información disponible, solo cuatro eventos cumplen con la condición anterior (años 1991, 1996, 1999 y 2002), es por ello que se decidió escoger otros seis eventos que al menos tuvieran registros hidrométricos en una de las estaciones. Los eventos seleccionados se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Relación de los eventos seleccionados para la modelación hidrológica

Evento	Año	Periodo de ocurrencia de la lluvia	Q _{máx} Paso Ventura		Q _{máx} Bernardo Arias	
			Q _{máx}	Fecha de ocurrencia del Q _{max}	Q _{máx}	Fecha de ocurrencia del Q _{max}
Evento 69	1969	6-7 jun	1543	6/jun	-	-
Evento 77	1977	6-9 jun	1490	8/jun	374	18/jun
Evento 78	1978	17-19 oct	2044	18/oct	482	17/oct
Evento 88	1988	31may-3-jun	1708	1/jun	415	1/jun
Evento 90	1990	24-28 may	758	28/may	538	27/may
Evento 91*	1991	21-23may	1705	22/may	182	22/may
Evento 95	1995	13-15 oct	1204	21/jun	336	14/oct
Evento 96*	1996	17-19 oct	2149	18/oct	420	18/oct
Evento 99*	1999	14-17 oct	2201	15/oct	339	15/oct
Evento 2002*	2002	11-14 jun	3858	13/jun	465	13/jun

*Eventos en los que se cuenta con información hidrométrica en las dos estaciones.

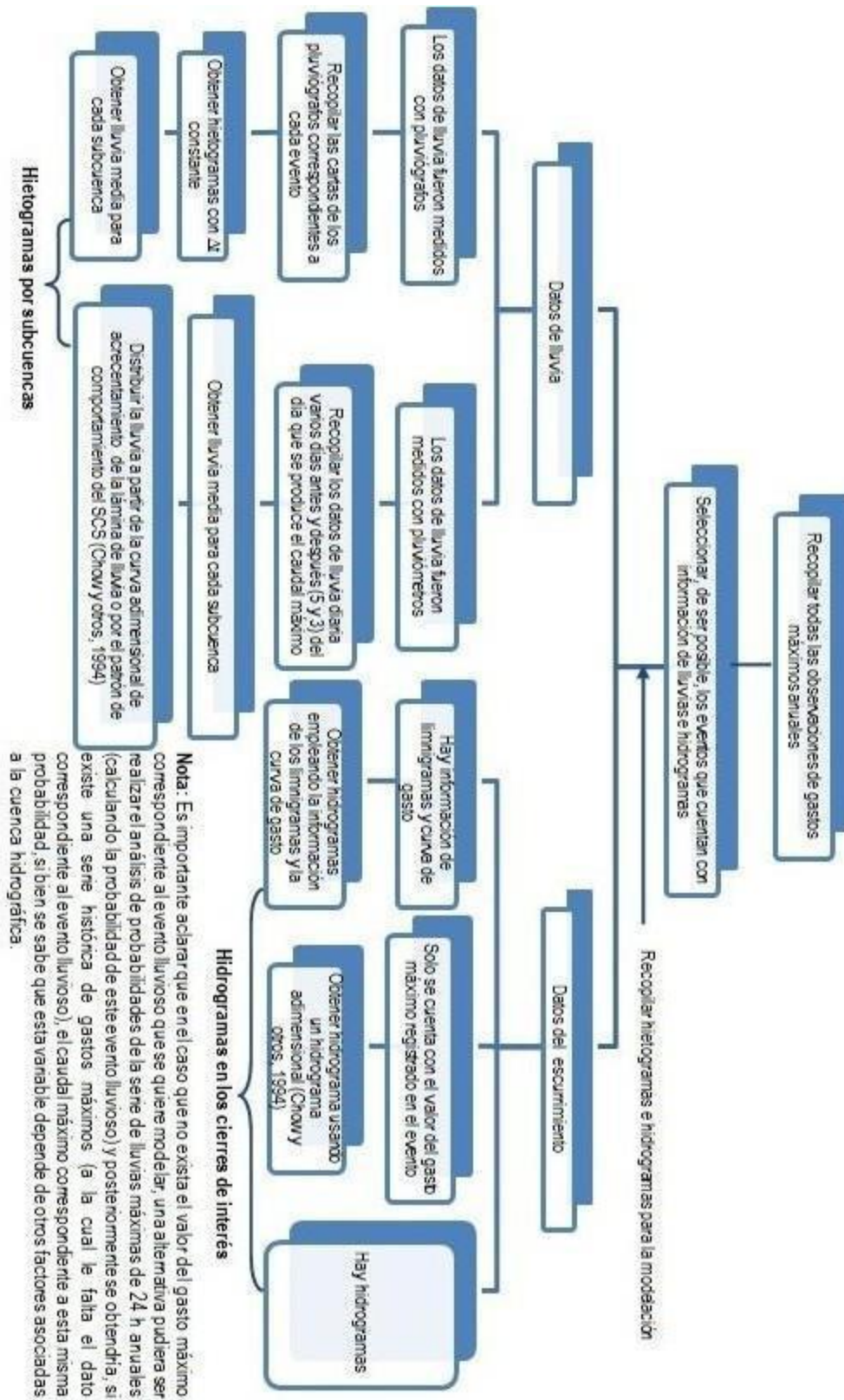


Figura 2. Esquema que representa el procedimiento propuesto para la selección de los eventos

Obtención de hietogramas

En el estudio realizado por Sifuma (2011) se demuestra que para los eventos de lluvia de los años 1978, 1996, 1999 y 2002 la distribución temporal de la precipitación debe realizarse utilizando la curva de masa obtenida para las precipitaciones en Cuba por Trusov (1986). Esta curva es la que emplea Alexeev (1972) en su método, que aún se utiliza en la práctica hidrológica en el país.

En cada subcuenca existían funcionando varios equipos durante el desarrollo de cada evento, por lo que se procedió a calcular la lluvia media en cada una de las dos subcuencas por evento, empleando para ello el método de los polígonos de Thiessen. Para la obtención de los hietogramas de las tormentas, como se mencionó anteriormente, se aplicó el patrón establecido por la curva de masa obtenida para Cuba, a las láminas de lluvias diarias registradas en los eventos para cada subcuenca en los 5 días antes y 3 días después de producirse el gasto máximo en el cierre de las subcuencas.

Un parámetro incierto en la modelación era el momento de inicio del aguacero (debido a que se cometen errores al registrar la lámina de lluvia de 24 horas en los registros de los pluviómetros, pudiéndose anotar días antes o después de producirse realmente el aguacero, como plantea Estrada (2011). Para definirlo se ploteó en un gráfico la lámina de lluvia varios días antes y después de observarse el mayor gasto máximo del hidrograma en cada estación hidrométrica para cada evento, para las dos subcuencas con información hidrométrica. En la figura 3 se muestra un ejemplo de cómo se registró la lluvia y como debe “correrse” la misma, para que reproduzca, en tiempo, el hidrograma observado.

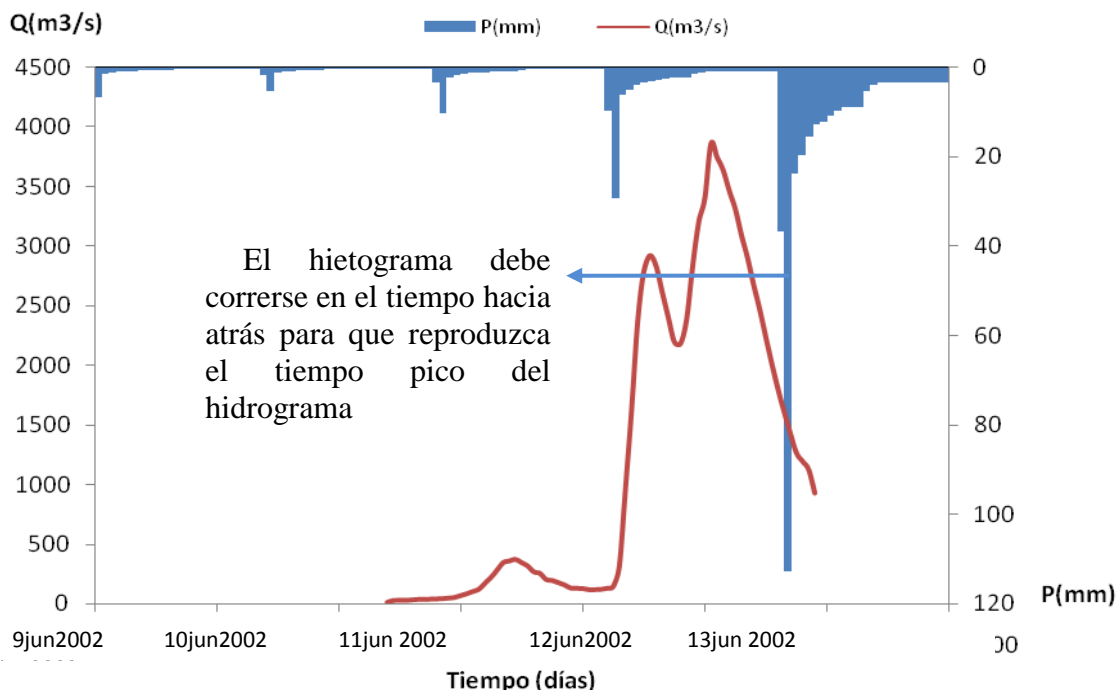


Figura 3. Representación del hietograma y del hidrógrafo observado para el evento 2002 en la subcuenca Paso Ventura (en este caso se representan 6 días donde ocurren la lluvia y el hidrograma que produce)

Obtención del modelo hidrológico conceptual (MHC)

Con el programa ArcView versión 3.3 usando las extensiones: Spatial Analyst, 3D Analyst y HEC-GeoHMS se realiza el pre-procesamiento del Modelo Digital de Elevación (MDE) a escala 1:25000, obtenido por Tamayo (2011), donde se define el parteaguas de la cuenca y se efectúa el procesamiento de la cuenca, dando como resultado el Modelo Hidrológico Conceptual (MHC) que se exporta al HEC-HMS. En la figura 4 se muestra el MHC seleccionado para la modelación.

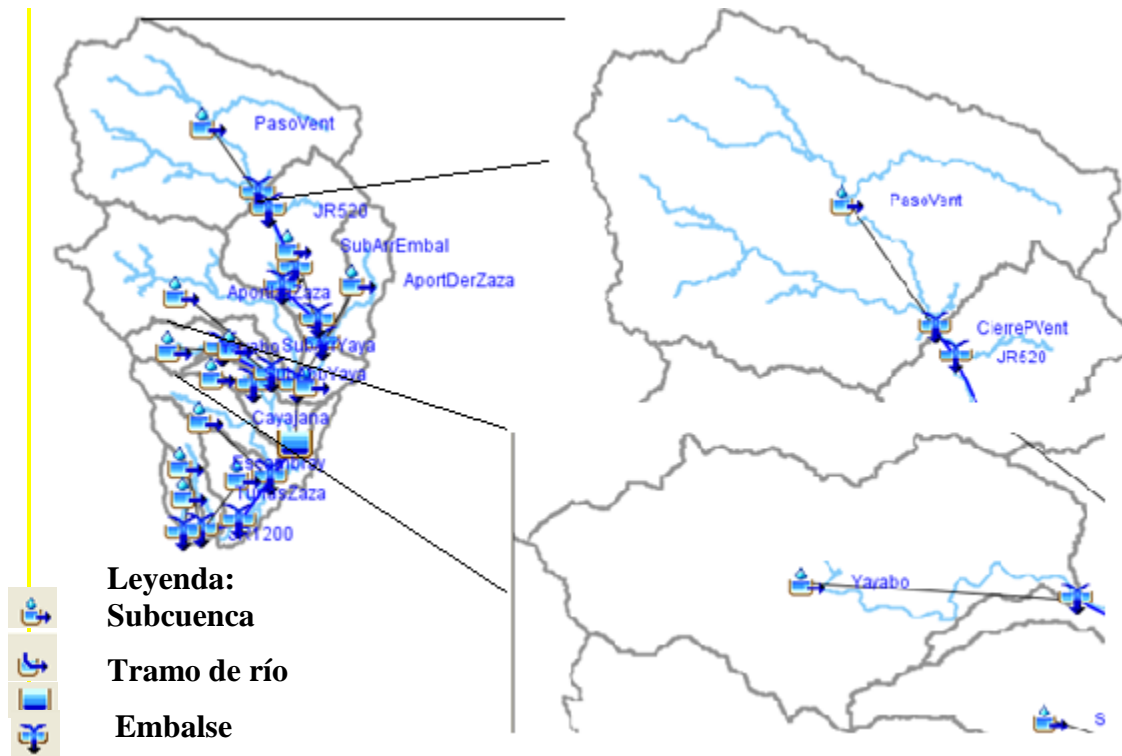


Figura 4. Modelo hidrológico conceptual para la escala 1:25000 de la cuenca Zaza, destacando las dos subcuencas analizadas: Paso Ventura y Yayabo

Selección de los métodos empleados en la simulación con HEC-HMS

Como se plantea en Babulal (2011), aplicando el procedimiento siguiente, se demuestra que se puede realizar la modelación con los métodos que se presentan en la tabla 2, para el caso de estudio (nótese que para el caso de la calibración de los parámetros, sólo se emplearán los métodos de pérdidas y de transformación de lluvia en escurrimiento, debido a que los cierres a calibrar sólo tienen el aporte de una simple subcuenca):

- 1) Seleccionar los métodos de pérdidas, de transformación de lluvia en escurrimiento, flujo base y tránsito de avenidas por los tramos de ríos, que estén dentro de la clasificación del modelo hidrológico conceptual de la cuenca (ejemplo: modelo semidistribuido, a escala de eventos, parámetros ajustados, entre otros).
- 2) Analizar los parámetros correspondientes a cada uno de los métodos seleccionados en el paso anterior, y seleccionar aquellos métodos cuyos parámetros son posibles de estimar con la información disponible.

- 3) Realizar simulaciones con los métodos seleccionados en el paso 2 y elegir definitivamente los que mejor representen el proceso lluvia-escorrentamiento para la cuenca en estudio.

Para cada uno de los métodos utilizados, se realizó la estimación inicial de sus parámetros. En el caso del número de la curva (NC) se trabajó con mapas de tipo y uso de los suelos. Estos valores fueron extraídos para cada una de las subcuencas y estimados los valores del CN para la condición máxima de humedad, los cuales se muestran en la tabla 3.

No se le dio valores a la abstracción inicial, debido a que el programa para este caso propone un valor implícito de 0,2 veces el potencial de retención S, lo cual a juicio de los autores era lo más aceptable, al no contar con información alguna para su estimación.

Tabla 2. Métodos empleados y parámetros necesarios por subcuencas

Componente del proceso de escurrimiento	Método	Parámetros por subcuencas
Modelo de pérdidas	Número de la curva (CN) del SCS	CN Pérdida Inicial
Transformación de la lluvia en escurrimiento	Hidrógrafo Unitario del SCS	Tiempo de Retardo, Lag
Tránsito de avenida en el río	Muskingum	Factor de tiempo de viaje, K(h) Factor adimensional de ponderación para el cálculo del volumen de almacenamiento en el tramo, X

El tiempo de concentración puede calcularse por muchas fórmulas empíricas (Kirpich, Izzard, California, entre otras), por nomogramas, por los datos de lluvias e hidrogramas y haciendo uso de un SIG. En este caso se empleó la fórmula de California debido a su amplio uso, apoyada por el SIG, que permite estimar las diferencias de nivel en cada subcuenca entre el punto más alejado y el cierre de la misma y la longitud del río, la cual se tomó como la del camino más largo.

$$t_c = 0,02 * \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (\text{fórmula de California}) \quad (1)$$

donde:

t_c – tiempo de concentración en minutos

L – longitud del río en metros

$S = Yr = \frac{\Delta H}{L}$, pendiente del río en tanto por uno o fracción

ΔH – desnivel del río principal en metros

El tiempo de retardo (Lag) fue adoptado como un 60 % del tiempo de concentración, tomando en consideración la recomendación que se hace en Feldman (2000) para cuencas no aforadas. Los resultados de este parámetro se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Valores iniciales de los parámetros para las subcuencas analizadas, estimados por los autores para los modelos de pérdidas y de transformación de lluvia en escurrimiento

Subcuencas	CN	Tlag (min)
Paso Ventura	79	500
Yayabo	54	101,79

Procesamiento de la información hidrométrica

La información de las cartas limnimétricas de las estaciones hidrométricas Paso Ventura y Yayabo fue la base para la construcción de hidrogramas empleando las curvas de aforo de estas estaciones y los registros de los limnógrafos. Para los eventos de los años 1988, 1990 y 1995 para la estación Paso Ventura se determinaron los hidrogramas por el método propuesto en Alexeev (1972).

Calibración del modelo lluvia – escurrimiento

De los diez eventos relacionados en la tabla 1, los de los años 1978, 1996, 1999 y 2002 son los escogidos para la calibración de los parámetros del modelo lluvia escurrimiento en las subcuencas Paso Ventura y Yayabo, debido a que son los que tienen información en las dos estaciones hidrométricas durante el mismo periodo de tiempo, el resto se empleó en la validación del modelo.

Se procedió entonces a obtener los valores de los parámetros para cada método en las subcuencas con información hidrométrica (Paso Ventura y Yayabo), empleando para ello el proceso de calibración automática y la función objetivo error porcentual en el caudal máximo con el algoritmo de ajuste: método del gradiente. La decisión de emplear estos métodos y no otros se debe a que de 108 calibraciones realizadas evaluando seis funciones objetivos, exceptuándose la del por ciento de error en volumen que no brinda resultados satisfactorios y en la versión del software HEC-HMS v.3.2 no funciona esta función, el error porcentual en el caudal máximo fue la que mejores resultados arrojó en la estimación de las variables. En la figura 5 se muestran los resultados de la calibración para el evento del año 1999, por ser este un evento que se presentaba en las dos estaciones en los cierres de las subcuencas Paso Ventura y Yayabo.

Haciendo un análisis de la figura 5, se puede concluir que para el evento del año 1999 en la estación Paso Ventura, el modelo lluvia – escurrimiento, logra reproducir bastante bien el gasto máximo, la forma del hidrograma simulado es bastante cercana al observado y el tiempo al pico se logra representar con exactitud.

En la subcuenca montañosa del río Yayabo se registran hidrogramas con varios picos cercanos, lo cual se debe a las características del aguacero que provoca esta avenida y que se evidencia en la figura 5. Los resultados que se muestran en esta ilustración manifiestan que de los picos registrados en el hidrograma observado, sólo se representan algunos en el simulado, ya que, entre otros factores, no se contó con la distribución temporal real de la tormenta, pero el valor del gasto máximo y del tiempo al pico si se logran reproducir con precisión con el modelo lluvia – escurrimiento.

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros en las calibraciones, para los cuatro eventos seleccionados para la calibración.

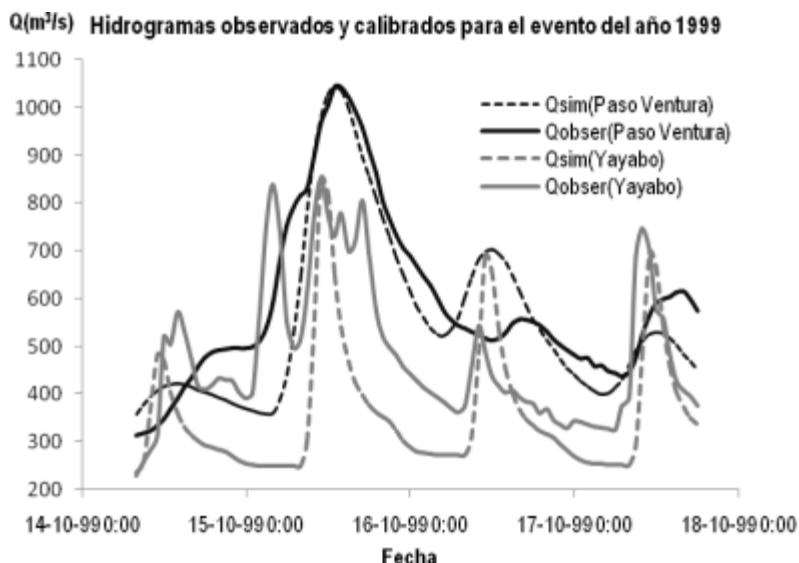


Figura 5. Hidrogramas observados e hidrogramas obtenido en la calibración para el evento del año 1999 en los cierres de las subcuencas Paso Ventura y Yayabo

Tabla 4. Valores de los parámetros del modelo lluvia – escurrimiento obtenido en las calibraciones para las subcuencas Paso Ventura y Yayabo

	Paso Ventura					Yayabo			
	E-1978	E-1996	E-1999	E-2002		E-1978	E-1996	E-1999	E-2002
Q (m³/s)	989,8	1060	1043	3858	Q (m³/s)	866,9	900,7	851	465
CN	80,89	71,31	71,11	55,86	CN	54,44	59,05	68,24	42,17
P.I. (mm)	12	20,44	20,64	40,14	P.I. (mm)	42,51	35,23	23,64	69,67
Lag (min)	420,1	420,1	420,1	420,1	Lag (min)	107	107	107	107
Leyenda:	Q: gasto máximo observado, CN: Número de la curva,				P.I.: Pérdidas iniciales, Lag: tiempo de retardo, E: Evento.				

Si se analizan los resultados mostrados en la tabla 4, se observa que para los tres primeros eventos el parámetro número de la curva (CN) en el caso de la subcuenca Paso Ventura se encuentra en el intervalo 71,11 - 80,89, valores muy cercanos, mientras que para el evento 2002, el valor de este parámetro se aleja de los anteriores. Lo mismo ocurre con la pérdida inicial en esta subcuenca y para estos dos parámetros sucede lo mismo en la subcuenca Yayabo.

Este resultado parece deberse a que en el caso de los tres primeros eventos, estos se producen al final del periodo húmedo, o sea, cuando la cuenca ha estado sometida a las precipitaciones de este periodo durante varios meses por lo que es de esperar alto contenido de humedad en los suelos y bajas pérdidas iniciales por infiltración. Además se puede apreciar que el valor de gasto máximo registrado para los tres primeros eventos varía poco (está restringido en el intervalo 989.8 – 1060), por lo cual se puede inferir también que los eventos lluviosos que provocan las crecidas son similares, mientras que para el evento del año 2002, el gasto máximo registrado es mucho mayor, ocurriendo al inicio del periodo húmedo, sin influencia de una precipitación antecedente importante y lógicamente provocado por una tormenta mucho más severa que en los tres casos anteriores.

En el caso de la subcuenca Yayabo los valores de CN fueron obtenidos en el proceso de calibración; el criterio inicial seguido fue admitir la condición de humedad III pero evidentemente para este evento del 2002 este criterio no se ajusta y por ello arrojó este valor relativamente bajo de 42,17 para CN, lo que tiene lógica porque el evento se produjo al inicio del periodo húmedo, cuando la humedad del suelo es mínima y los valores de CN no son altos.

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en la tabla 4 se decidió tomar como valores de los parámetros, el promedio de los obtenidos para los tres primeros eventos modelados.

Validación del modelo obtenido

Aquí, y en todo el artículo, se utiliza el concepto de validación dado por Jorge (2001). Más recientemente otros autores como Castro (2014) denominan este proceso aplicado a los datos restantes de las mismas subcuencas calibradas como verificación).

Los resultados de esta etapa de validación se resumen en los aspectos siguientes:

1. Se corroboró que la función objetivo que mejor representa el comportamiento del caudal máximo y el tiempo al pico, es el error porcentual en el caudal máximo, obteniéndose errores menores al 16% en el peor de los casos.
2. Se obtiene un modelo lluvia – escurrimiento calibrado, para la subcuenca Paso Ventura (figura 6), que logra reproducir bastante bien el gasto máximo, y el tiempo al pico se alcanza con precisión.
3. Se obtiene un modelo lluvia – escurrimiento para la subcuenca del río Yayabo, que logra reproducir el gasto máximo y el tiempo al pico con exactitud, pero que no representa la forma del hidrograma observado en su totalidad, ya que este tiene varios picos cercanos (figura 6, derecha).
4. El volumen de escurrimiento que se obtiene con la aplicación del software HEC-HMS, está condicionado, entre otros aspectos, por la diferencia entre los momentos de inicio de la modelación y de inicio de los hidrogramas registrados.
5. Se obtienen los valores de los parámetros que son el resultado de las calibraciones, para las dos subcuencas.

Analizando el momento de ocurrencia (inicio del período húmedo) de los cuatro primeros eventos seleccionados para la validación, era recomendable considerar como valores de los parámetros calibrados de los modelos lluvia – escurrimiento (para las dos subcuencas), los obtenidos con el evento del año 2002, pero asumiendo este criterio los resultados no eran satisfactorios. Debido a esto se evaluaron los seis eventos escogidos para la validación, con los valores de los parámetros obtenidos, teniendo en cuenta un gasto superficial inicial (debido a una tormenta anterior) y el corrimiento necesario de la lluvia registrada, obteniendo los resultados siguientes:

1. Un modelo lluvia – escurrimiento calibrado y validado para la subcuenca Paso Ventura que logra reproducir los gastos máximos, que se encuentran en el intervalo de 750 y 1800 m³/s, y el tiempo al pico con errores menores que el 10% (tabla 5). En la figura 6 se muestra el resultado del hidrograma obtenido en el proceso de validación para esta subcuenca.
2. Un modelo lluvia – escurrimiento calibrado y validado para la subcuenca Yayabo que logra reproducir el tiempo al pico y los gastos máximos, que se encuentran en el intervalo de 182 a 1016 m³/s, con errores menores que el 16% (tabla 5), en la figura 6 se muestra un ejemplo del resultado del proceso de validación para esta subcuenca). Los autores consideran que para

esta subcuenca deben modelarse más eventos que se encuentren en un intervalo de gastos máximos más estrecho, debido a que los mayores errores se cometen para los gastos registrados más pequeños (182 y 329,3 m³/s) y el intervalo de gastos máximos para esta subcuenca abarca cerca de los 1200 m³/s; no obstante los resultados alcanzados en la validación del modelo de esta subcuenca se consideran aceptables, para el fenómeno que se evalúa.

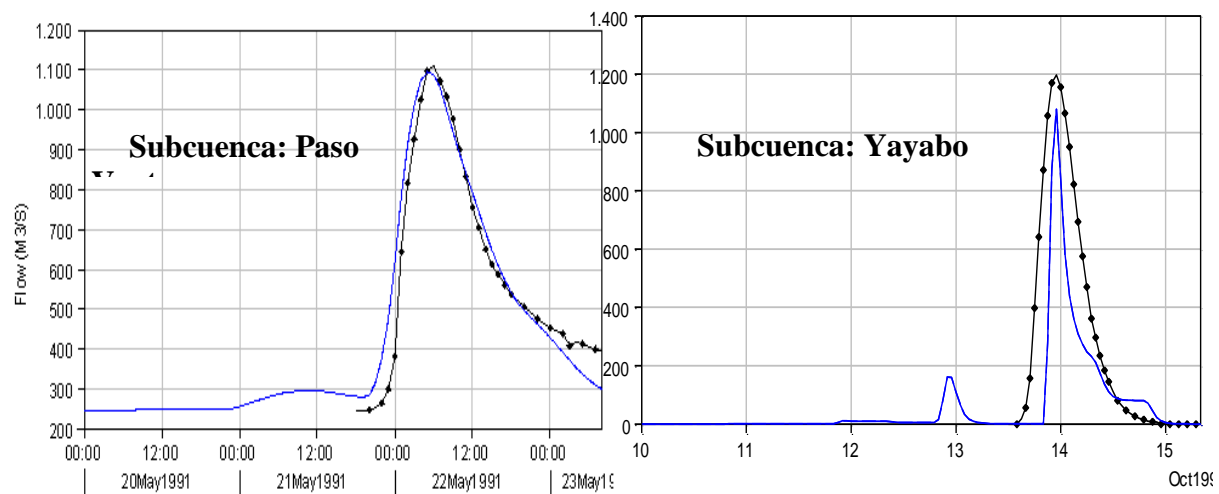


Figura 6. Resultados de simulación para evento año 1991 en cierre subcuenca Paso Ventura (gráfico izquierda) y resultados de simulación para evento año 1995 en cierre subcuenca Yayabo (gráfico derecha). La línea azul continua representa el hidrograma simulado y la negra punteada el observado

3. El tiempo al pico para todos los casos (todos los eventos) produce errores de solo una hora en algunos de los eventos, en el resto esta variable se logra representar muy bien. Debe decirse que este parámetro depende en un alto grado de la posición del pico del hidrograma y del tiempo de retardo, el cual se mantuvo constante, debido a que depende de las características morfométricas de la cuenca y del sistema fluvial que se asumen como invariables.
4. Los errores en la simulación para el caso del volumen se encuentran en el intervalo de 12,67 a 137,25 mm (12,48 a 215,98%), para la subcuenca Paso Ventura, mientras que para la subcuenca Yayabo el intervalo se establece de 53,74 a 406,45 mm (8,06 a 26,48%). Este es el parámetro que peores resultados da en la simulación. Los autores consideran que las razones de este problema son:

- El periodo de simulación no coincide exactamente con el periodo en que se registran los hidrogramas (los autores consideraron este desfase debido a que en muchos eventos se registraba una lluvia antecedente que era evidente también en el hidrograma obtenido, entonces para que en la simulación se tuviera esto en cuenta, era necesario iniciarla antes que el momento de inicio del hidrograma observado), lo cual tuvo como consecuencia mejores resultados en la simulación del gasto máximo aunque no en el volumen.
- En tres de los eventos para la estación Paso Ventura el hidrograma fue obtenido mediante el método empírico de Alexeev, lo cual es una aproximación a la forma real del mismo.

Tabla 5. Resultados de las simulaciones de los seis eventos restantes para las subcuencas Paso Ventura y Yayabo

	Subcuencas	Variable	Observado	Simulado	Dif	Dif(%)
Ev. 1969	Paso Ventura	Volumen (mm)	60,77	192,02	131,25	215,98
		Gasto Pico (m ³ /s)	909,1	978,7	69,6	7,66
		Tiempo al Pico	06/06/1969 12:00	06/06/1969 11:00	1:00	
Evento 1977	Paso Ventura	Volumen (mm)	119,44	205,6	86,16	72,14
		Gasto Pico (m ³ /s)	910	842,1	67,9	7,46
		Tiempo al Pico	08/06/1977 19:00	09/06/1977 19:00		
	Yayabo	Volumen (mm)				
		Gasto Pico (m ³ /s)	329,3	374	44,7	13,57
		Tiempo al Pico				
Evento 1988	Paso Ventura	Volumen (mm)	112,84	204,4	91,56	81,14
		Gasto Pico (m ³ /s)	1700,1	1630	70,1	4,12
		Tiempo al Pico	01/06/1988 0:00	01/06/1988 0:00	0:00	
	Yayabo	Volumen (mm)	1730,64	1870,14	139,5	8,06
		Gasto Pico (m ³ /s)	863,5	887,3	23,8	2,76
		Tiempo al Pico	01/06/1988 22:00	01/06/1988 21:00	1:00	
Evento 1990	Paso Ventura	Volumen (mm)	101,5	114,17	12,67	12,48
		Gasto Pico (m ³ /s)	758	776,4	18,4	2,43
		Tiempo al Pico	25/05/1990 16:00	25/05/1990 15:00	1:00	
	Yayabo	Volumen (mm)	1534,81	1128,36	406,45	26,48
		Gasto Pico (m ³ /s)	910,65	954,3	43,65	4,79
		Tiempo al Pico	27/05/1990 12:00	27/05/1990 10:00		
Evento 1991	Paso Ventura	Volumen (mm)	97,99	147,54	49,55	50,57
		Gasto Pico (m ³ /s)	1111	1095	16	1,44
		Tiempo al Pico	22/05/1991 6:00	22/05/1991 5:00	1:00	
	Yayabo	Volumen (mm)				
		Gasto Pico (m ³ /s)	182	153,2	28,8	15,82
		Tiempo al Pico				
Evento 1995	Paso Ventura	Volumen (mm)	90,68	197,18	106,5	117,45
		Gasto Pico (m ³ /s)	815,35	784,9	30,45	3,73
		Tiempo al Pico	14/10/1995 11:00	14/10/1995 10:00	1:00	
	Yayabo	Volumen (mm)	643,61	697,35	53,74	8,35
		Gasto Pico (m ³ /s)	1197,1	1091	106,1	8,86
		Tiempo al Pico	13/10/1995 23:00	13/10/1995 22:00	1:00	

- Fue necesario, en la mayoría de los eventos, considerar un gasto base debido a una tormenta anterior, que fue asumido que ocurría de forma lineal a lo largo del evento. Esta consideración provoca que se registre un volumen que en el hidrograma observado no se registra (debido a que como se planteó en el primer aspecto los tiempos de inicio de la simulación y de inicio del hidrograma observado no coinciden).

CONCLUSIONES

- Es importante analizar, de forma conjunta, la información de la lluvia y del hidrograma, con el objetivo de detectar errores en el día donde se registraron las lluvias y realizar el corrimiento de la misma, según corresponda.
- Se logró obtener un modelo lluvia – escurrimiento para la subcuenca Paso Ventura que permite reproducir los gastos máximos y su tiempo al pico para eventos cuyo caudal pico se encuentre en el intervalo de 750 a 1800 m³/s con un error menor del 10%.
- No fue posible lograr buenos resultados en la estimación de los volúmenes de las avenidas, por lo que se debe investigar más sobre las condiciones de estos eventos (gasto superficial debido a una tormenta anterior y humedad antecedente).
- Para la subcuenca Yayabo es necesario recopilar eventos con características similares para obtener mejores resultados, aunque con los valores de los errores obtenidos (menores del 16 % en la estimación del caudal máximo), puede concluirse que se cuenta con un modelo lluvia – escurrimiento de esta subcuenca calibrado y validado para la estimación de los gastos máximos comprendidos en el intervalo de 182 a 1016 m³/s.
- Con este estudio se evidencia la necesidad de contar con información pluviográfica para representar el comportamiento temporal de la lluvia, con el propósito de obtener resultados más certeros en los procesos de calibración-validación de los parámetros de las cuencas, por ser esta una característica que influye significativamente en el proceso lluvia-escurrimiento.

REFERENCIAS

- Alexeev G. A.** (1972). "Cálculo del escurrimiento máximo basado en la intensidad extrema del escurrimiento. Orientaciones." Grupo Hidráulico Nacional, Dirección de Investigaciones Sistemáticas, Departamento de Hidrología. La Habana.
- Babulal A.** (2011). "Simulación hidrológica de dos subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Zaza con el Software HEC-HMS." Tesis para optar por el título de Ingeniero Hidráulico, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.
- Estrada V.** (2011). "Integral hydro-meteorological scheme for HEC-HMS", Ponencia aceptada, Water Resources Management Conference, California, USA.

Feldman A. D. E. (2000). "Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual", U.S. Army Corps of Engineers, St. Davis, California, USA.

Pacheco R. M. (2011). "Recomendaciones para la modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba." Tesis para Optar por el Título de Máster en Ing. Hidráulica, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

Rodríguez Y. (2011). "Modelación hidrológica de avenidas. Caso de estudio: cuenca del río Zaza". Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

Sifuma C. (2011). "Análisis de eventos extremos de precipitación y su efecto en cuencas hidrográficas. Caso de estudio: la cuenca del río zaza." Tesis para optar por el título de Ingeniero Hidráulico, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

Tamayo A. A. (2010). "Grupo de Estudios Regionales de Occidente". Unión de Construcciones Militares, Agencia de Teledetección UCT-GEOCUBA IC MINFAR, Ministerio de las Fuerzas Armadas, Cuba.

Trusov I. I. (1986). "Máximas intensidades de precipitaciones en regiones naturales de Cuba", Academia de Ciencias de Cuba, Ciudad Habana, Cuba.

USWB (1958). "Rainfall-intensity-frequency regime, part 2 - Southeastern United States", Paper No. 29, U.S. Weather Bureau, USA.