

Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del Río Las Ceibas (Neiva- Huila)

Erasmó Alfredo Rodríguez S.¹, Ricardo Alfonso González P.^{2,3}, Martha Patricia Medina N.³, Yuly Andrea Pardo C.³ & Ana Carolina Santos R.³

1. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH), Universidad Nacional de Colombia-Bogotá, earodriguezs@unal.edu.co

2. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Grupo GIREH, Universidad Nacional de Colombia-Bogotá, ricagonzalezp@unal.edu.co

3. Grupo GIREH, Universidad Nacional de Colombia-Bogotá, mpmedinan@unal.edu.co, yapardoc@unal.edu.co, acsantosr@unal.edu.co

Recibido para evaluación: 28 de Agosto de 2007 / Aceptación: 18 de Septiembre de 2007 / Versión Final: 10 de Octubre de 2007

Resumen

Una de las aplicaciones frecuentes en el manejo de recursos hídricos tiene que ver con la producción de mapas de inundaciones a partir de registros puntuales de precipitación. En este artículo se presenta la propuesta de una metodología para la generación de mapas de inundaciones y clasificación de zonas de amenaza, utilizando de forma acoplada las herramientas de modelación hidrológica HEC-GeoHMS y HEC-HMS, y las herramientas de modelación hidráulica HEC-GeoRAS y HEC-RAS, del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. Se presenta la aplicación de la metodología propuesta utilizando como caso de estudio la cuenca del río Las Ceibas, con un área de aproximadamente 297 km². Para la calibración del modelo hidrológico HEC-HMS se utilizan tormentas registradas, y tormentas sintéticas para la generación de eventos torrenciales, que son analizados hidráulicamente utilizando la aplicación de flujo no permanente del modelo HEC-RAS. Los resultados obtenidos permiten concluir que el uso adecuado, sistemático y responsable de herramientas de procesamiento de información geográfica, combinadas con la aplicación de modelos hidrológicos e hidráulicos, correctamente calibrados y validados, brinda a los tomadores de decisiones información valiosa y oportuna para la implementación de medidas que tiendan a reducir el impacto de eventos torrenciales y catastróficos sobre la población.

Palabras Clave: Mapas de Amenaza de Inundación. Modelación Acoplada Hidrología-Hidráulica-SIG. Río Las Ceibas

Abstract

One of the common problems that water planners have to deal with is the development of flood hazard maps from point precipitation data. This article presents the development of a methodology for the production of this type of maps, using a linked strategy between the HEC-GeoHMS-HEC-HMS hydrological modeling system and the HEC-GeoRAS-HEC-RAS river analysis system, all shareware applications developed by the United States Corps of Engineers. The proposed methodology is applied in Las Ceibas river basin, with an area of around 297 km². This basin experiences large floods, which impact the lower part of Las Ceibas river, close to its confluence with the Magdalena river. In the analysis, real storms are used for the calibration of the HEC-HMS model and synthetic storms are used for the generation of flood scenarios, which are analyzed using the unsteady flow condition in the HEC-RAS hydraulic model. Results show that the adequate, systematic and responsible use of geographic information system tools combined with the application of linked hydrological and hydraulic models, adequately calibrated and validated, gives decision-makers important and timely information for the implementation of structural and non-structural measurements which aim to mitigate the impact of flood events on the population.

Key Words: Flood Hazard Maps. Coupled Hydrological-Hydraulic- GIS Modeling. Las Ceibas River.

1. Introducción

En Colombia, debido a la limitada planeación e implementación de Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y a la problemática social y económica que enfrenta el país, es recurrente que en períodos de invierno se vean afectadas poblaciones enteras que habitan en las zonas de ronda o adyacentes a los cursos de los ríos. Por esto, se considera importante proponer criterios y metodologías que les permitan a las autoridades de planeación, realizar e implementar en los POT y los POMCA una adecuada clasificación de zonas vulnerables a inundaciones, e ir más allá intentando hacer pronóstico de niveles y áreas abarcadas por la inundación, como parte de un sistema espacial de toma de decisiones.

La propuesta metodológica presentada en este artículo para la obtención de mapas de inundación considera la limitada información hidrométrica existente en la mayoría de las cuencas colombianas: no todos los cauces se encuentran instrumentados, y los que lo están en algunos casos no tienen un período de registro suficientemente largo como para realizar un análisis de frecuencias de caudales extremos adecuado y confiable, por lo que se requiere, en un buen número de casos, hacer una modelación hidrológica para obtener condiciones de fontera.

En la obtención de mapas de inundación se requiere considerar aspectos no solo hidrológicos sino también topográficos, hidráulicos y algunas veces económicos. En la metodología aquí propuesta los fenómenos hidrológicos se representan utilizando el modelo hidrológico HEC-HMS (USACE, 2000), originalmente de tipo evento, pero que con los últimos desarrollos, también puede ser utilizado a nivel continuo (USACE, 2006). Los fenómenos hidráulicos se representan mediante la implementación del modelo hidráulico HEC-RAS (USACE, 2002). En la mayoría de las aplicaciones reportadas en la literatura, los dos tipos de modelación se realizan de forma separada, con lo cual se incrementan los errores debidos a manipulación y transferencia de la información, y se limita la capacidad del modelo acoplado para pronosticar niveles de inundación a partir de datos puntuales de precipitación en tiempo casi real.

De acuerdo con lo anterior, la generación objetiva de mapas de inundación y zonas de amenaza a partir de información de

precipitación, requiere la integración y el acople de modelos hidrológicos, hidráulicos y herramientas de información geográfica y análisis espacial, que aglutinen las características físicas de la cuenca y permitan realizar análisis confiables.

En la literatura se reportan esfuerzos de varios autores por integrar modelos hidrológicos e hidráulicos con Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Robayo, 2005, Maidment y Djokic, 2000, Yang y Tsai, 2000, Boyle et al., 1998); debido al carácter casi-estático de las estructuras de datos en un SIG, las implementaciones en la mayoría de los casos han estado limitadas al despliegue de información, y en el caso de los análisis de inundaciones a la delimitación de las áreas de inundación. Sin embargo, hoy en día los modelos digitales de terreno (DEM o DTM) y los mapas de características físicas de las cuencas en formato digital, brindan información que puede ser procesada en un SIG como Arc-View (ESRI, 1996) a través de la extensión Geo-HMS (USACE, 2003) para la obtención de la topología de la cuenca, valores iniciales de algunos parámetros del modelo hidrológico HEC-HMS, y características de las secciones transversales y del cauce para el caso de HEC-RAS, a través de la extensión Geo-RAS (USACE, 2002a). En este tipo de integración, que podría denominarse externa, entre el SIG y los modelos hidrológico e hidráulico para el intercambio de información, cada uno de los modelos opera de forma separada y utiliza como entradas los resultados del modelo previo.

Con los resultados de la modelación hidrológica e hidráulica acoplada y teniendo en cuenta las capacidades del SIG para el manejo de la información espacial de las características de la inundación, y como herramienta de pre y post procesamiento de la información para ambos modelos, es posible identificar y mapear zonas de inundación con amenaza alta, media o baja.

La metodología mencionada es implementada en la cuenca del río Las Ceibas, la cual por sus características de torrencialidad, fuente de agua potable para el acueducto de Neiva y características de instrumentación hidrometeorológica es un excelente escenario de análisis.

2. Metodología Propuesta

2.1. Esquema metodológico conceptual

La Figura 1 muestra el esquema conceptual de modelación

propuesto para la obtención del mapa de amenaza por inundación. Este esquema contempla un modelo cuasi-estático de datos (el cual puede ser modificado en caso de existir cambios en la

cobertura vegetal u obras mayores de adecuación del cauce), pero que en términos generales permanece estático a lo largo de la modelación.

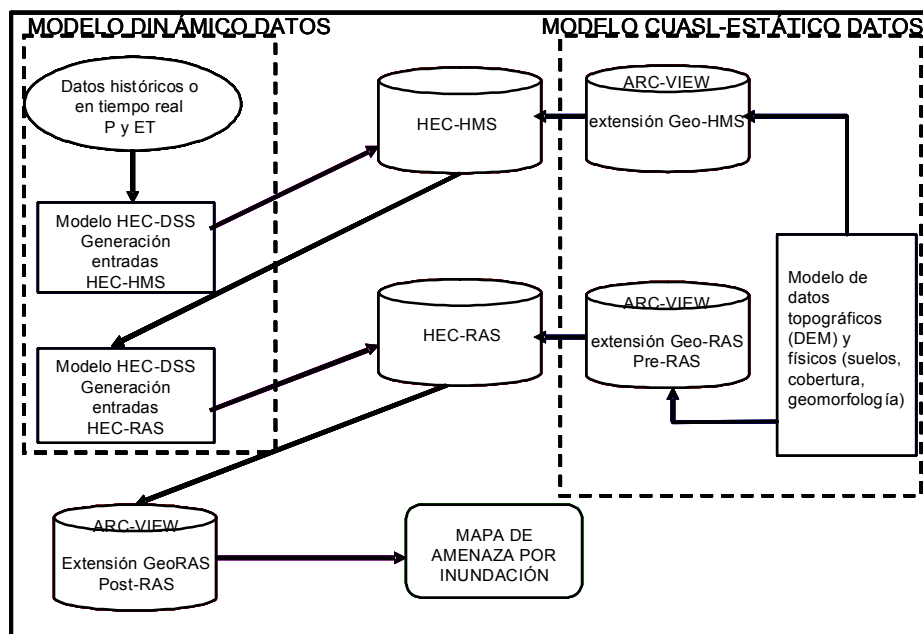


Figura 1. Esquema conceptual de modelación propuesto utilizando la familia HEC de modelos (HEC-HMS, HEC-RAS y HEC-DSS) y el SIG Arc-View para la obtención de mapas de inundación.

De acuerdo con la Figura 1, utilizando el modelo digital de terreno (DEM) es posible generar el mapa topológico de la cuenca en formato HMS, utilizando la extensión de Arc-View denominada GeoHMS. A partir del modelo topológico de cuenca y los mapas de suelos y cobertura vegetal es posible estimar los valores iniciales de la mayoría de los parámetros del modelo hidrológico. Igualmente, a partir del DEM, complementado con topografía de detalle, y utilizando la extensión GeoRAS (Pre-RAS) es posible obtener el alineamiento del cauce principal y las características de las bancas y secciones transversales, como insumo para el modelo HEC-RAS, información que permite realizar el análisis hidráulico del tramo en cuestión a partir de condiciones de frontera y de la calibración de los parámetros del modelo, fundamentalmente el coeficiente de rugosidad de Manning, utilizando datos registrados de niveles en varias secciones transversales.

Por otra parte, y siguiendo el esquema de la Figura 1, existe un modelo dinámico de datos en el cual se incluyen las características

de la precipitación para eventos reales o sintéticos de tormenta. Con la topología de la cuenca, las características de la precipitación puntual registrada en varias estaciones y los datos de hidrógrafas observadas para los mismos eventos de tormenta, es posible calibrar manual y/o automáticamente los parámetros del modelo hidrológico, el cual después de esta fase se encontrará listo para simular y proveer las características de la hidrógrafa aguas arriba del tramo analizado hidráulicamente. Los datos de nuevas tormentas (ya sean sintéticas, históricas o registradas en tiempo real) se introducen al modelo HEC-HMS de forma semi-automática utilizando el archivo de datos de intercambio DSS de la familia HEC de modelos (USACE, 2005). A continuación se corre el modelo HEC-HMS y la hidrógrafa de salida es procesada nuevamente a través del modelo DSS para brindar las entradas al modelo hidráulico HEC-RAS. Con los modelos hidrológico e hidráulico calibrados y validados, es posible generar a partir de una hidrógrafa de creciente estimada con el modelo HEC-HMS, niveles dinámicos de inundación en secciones transversales, los

cuales pueden ser directamente delineados en planta utilizando la extensión GeoRAS (Post-RAS).

A continuación se presenta una breve descripción de los modelos utilizados en este estudio. Para mayor información el lector interesado es remitido a las referencias originales de los mismos.

2.2. Modelos hidrológico e hidráulico

HEC-HMS es un modelo de uso libre y ampliamente evaluado a nivel nacional e internacional (Cunderlink y Simonovic, 2004, Knebl et al., 2005, McColl y Aggett, 2006, Moges et al., 2006), el cual puede clasificarse como un modelo hidrológico determinístico, de tipo evento y/o continuo, distribuido y/o agregado y de propósito general. En HEC-HMS la cuenca se describe a través de una serie de elementos interconectados (subcuencas, canales de tránsito, nodos, fuentes y sumideros). Entre los múltiples procedimientos hidrológicos disponibles en HEC-HMS para transformar la precipitación en escorrentía, en este estudio, por su parsimonia y buen desempeño en análisis anteriores, se han seleccionado los métodos del número de curva para la estimación de la precipitación efectiva, el hidrograma triangular del Servicio de Conservación de Suelos para la transformación de precipitación de excesos en escorrentía directa y el método de tránsito de Muskingum para el tránsito hidrológico de la creciente entre tramos. Simulaciones a nivel de evento y en modo agregado requieren la estimación de cinco parámetros por subcuenca (pérdidas iniciales I_a , número de curva CN, tiempo de retardo t_{lag} , coeficientes K y x de Muskingum). Lo ideal es calibrar cada uno de estos parámetros, sin embargo, para el caso de estudio, reportado más adelante, y por disponibilidad de información, únicamente los tres primeros han sido calibrados; los otros dos parámetros K y x han sido estimados siguiendo recomendaciones de la literatura (USDA, 1986). HEC-HMS permite calibrar estos parámetros mediante la combinación de estrategias de calibración manual y algoritmos de búsqueda local, i.e. Método Simplex (Nelder y Mead, 1965) y Gradiente Univariado (Snyman, 2005).

El modelo hidráulico HEC-RAS, al hacer parte de la familia de modelos HEC, es también un modelo de uso libre, ampliamente utilizado en nuestro país (CDMB, 2005; Universidad del Norte, 2003; Martínez, 2000) para realizar la modelación hidráulica de canales naturales y artificiales bajo condiciones de flujo permanente

y no permanente, y regímenes de flujo subcrítico, crítico, supercrítico y mixto. Para el caso de flujo permanente la solución se realiza a través del método del paso estándar, mientras que para flujo no permanente el modelo incluye la solución completa de la ecuación unidimensional de Saint Venant (onda dinámica). En la ecuación unidimensional de Saint Venant, dependiendo de la escogencia e inclusión en la solución de algunos o todos los términos, se pueden obtener soluciones simplificadas (caso de la onda cinemática y de la onda de difusión) en comparación con la solución completa (onda dinámica). No en todos los casos de tránsito hidráulico es necesario recurrir a la solución completa a través del método de la onda dinámica, sino que a partir de criterios discutidos por Ponce (1994), y basados en las características de la hidrógrafa a transitar, pendiente, velocidad y profundidad promedio en el tramo, la solución por métodos simplificados puede ser satisfactoria.

Al ser HEC-RAS un modelo 1D no contempla interacción de la masa de agua con zonas de almacenamiento lateral, y en este sentido su aplicación resulta limitada para casos en los que existan grandes llanuras de inundación. Adicionalmente, el modelo restringe lateralmente el flujo a partir de la información topográfica disponible (puntos extremos de cada sección transversal), y en este sentido los perfiles de flujo obtenidos con el modelo, resultan normalmente sobreestimados con respecto a valores observados.

El principal parámetro del modelo es el coeficiente de rugosidad n de Manning, para el cual no existen estrategias automáticas de calibración en el modelo, y por ende debe ser calibrado manualmente a partir de la comparación de niveles de agua registrados y simulados. Otros parámetros del modelo incluyen los coeficientes de pérdidas por expansiones y contracciones.

2.3. Zonificación de áreas de inundación

Como una primera aproximación para la zonificación de áreas de inundación, y considerando las limitaciones de cantidad y calidad de información hidrometeorológica disponible en la mayoría de las cuencas colombianas, se propone clasificar las zonas vulnerables a problemas de inundación, basándose en el análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca ante la ocurrencia de tormentas sintéticas con diferentes períodos de retorno, las características hidráulicas de los cauces y el análisis espacial de

las zonas inundadas. Este procedimiento tiene varias limitaciones, y un análisis más riguroso de la respuesta hidrológica de la cuenca debería considerar, explícitamente, escenarios de condiciones probables de humedad y relaciones estadísticas basadas en el comportamiento temporal de las tormentas (Laurenson et al., 2006), que podrían incorporarse en la metodología en la medida en que mayor información se encuentre disponible.

3. Área de Estudio

Por ser una cuenca con graves problemas de inundación y por la disponibilidad de información hidrometeorológica y física, suministrada por el Departamento de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, se ha seleccionado como área de estudio la cuenca del río Las Ceibas. Esta cuenca se encuentra ubicada al suroccidente colombiano (ver Figura 2), sobre la cordillera oriental de los Andes, en el Departamento del Huila. La cuenca tiene un área total de 297 km² y desemboca en el río Magdalena, a la altura de Neiva, aguas abajo del Embalse de

Betania. La topografía de la cuenca es quebrada y presenta cambios de elevación entre 345 y 3198 msnm. La temperatura media en la parte baja de la cuenca es del orden de 26°C y en la parte alta disminuye a valores promedio de 10°C. Las precipitaciones medias multianuales, con régimen bimodal (típico de la zona Andina) en las partes media y baja de la cuenca, y monomodal (típico de la Orinoquía) en la parte alta, alcanzan en promedio los 1,800 mm (Universidad Nacional, 2007).

En cuanto al uso del suelo en la cuenca aproximadamente el 50% corresponde a pastos, el 22% a cultivos de cereales, el 10% a rastrojos, el 5% a bosques secundarios, el 4% a cultivos de pancoger y el restante 9% a vegetación riparia, cultivos de frutales y zonas urbanas (Universidad Nacional, 2007). En la parte alta de la cuenca predominan los bosques y pastos, en la zona media los pastizales y cultivos de cereales, y en la parte baja los cultivos de pancoger y el área urbana de Neiva.

Nueve subcuencas principales que incluyen Ceibas Alto, Motilón, La Plata, Pueblo Nuevo, Santa Helena, San Bartolo, Guayabo, Los Micos y Ceibas Bajo, con áreas entre 16 y 55 km² conforman la cuenca del río Las Ceibas (ver Figura 2).

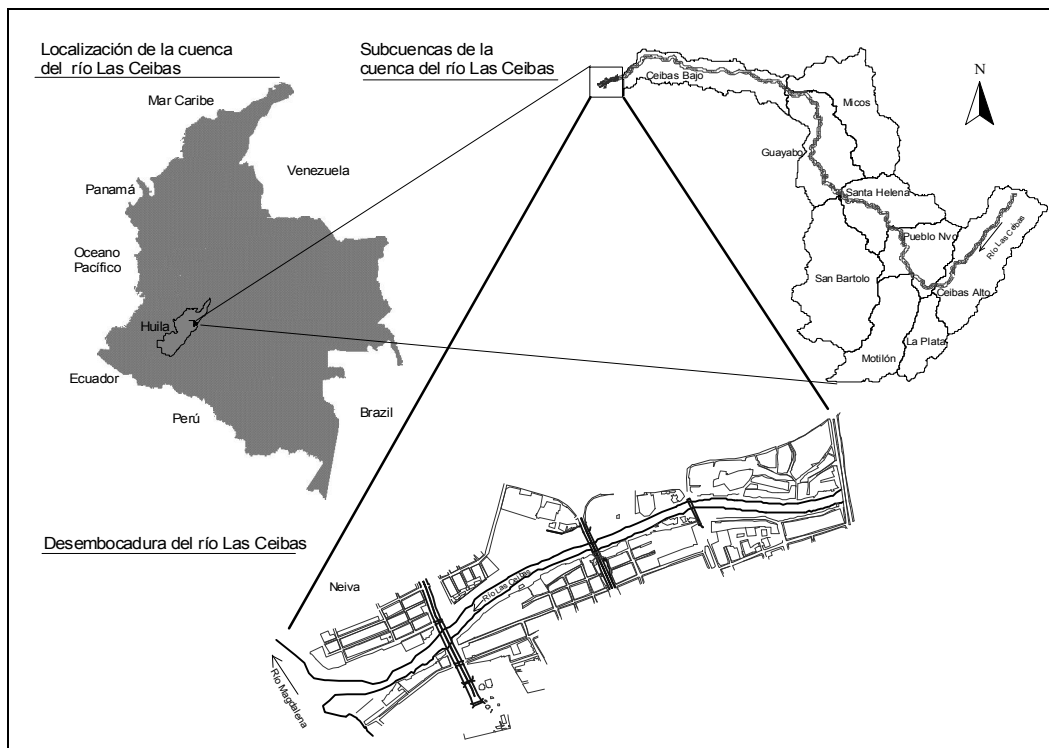


Figura 2. Localización de la cuenca del río Las Ceibas.

En la cuenca y su área de influencia se encuentran ubicadas 14 estaciones con registros continuos de precipitación (ver Figura 3) durante el período homogéneo y consistente de análisis seleccionado en este estudio, que abarca el período 1980-2000. Igualmente, se encuentran ubicadas cinco estaciones hidrométricas (ver Figura 3), entre las cuales la estación limnigráfica El Guayabo

(con un área de drenaje de 225 km²) es la más importante, pues cuenta con registros horarios y es utilizada en este estudio, conjuntamente con las registros de precipitación de las estaciones pluviográficas Hacienda La Gironda, Juncal, Aeropuerto Benito Salas y Palacio Vegalarga en la modelación hidrológica tipo evento con HEC-HMS.

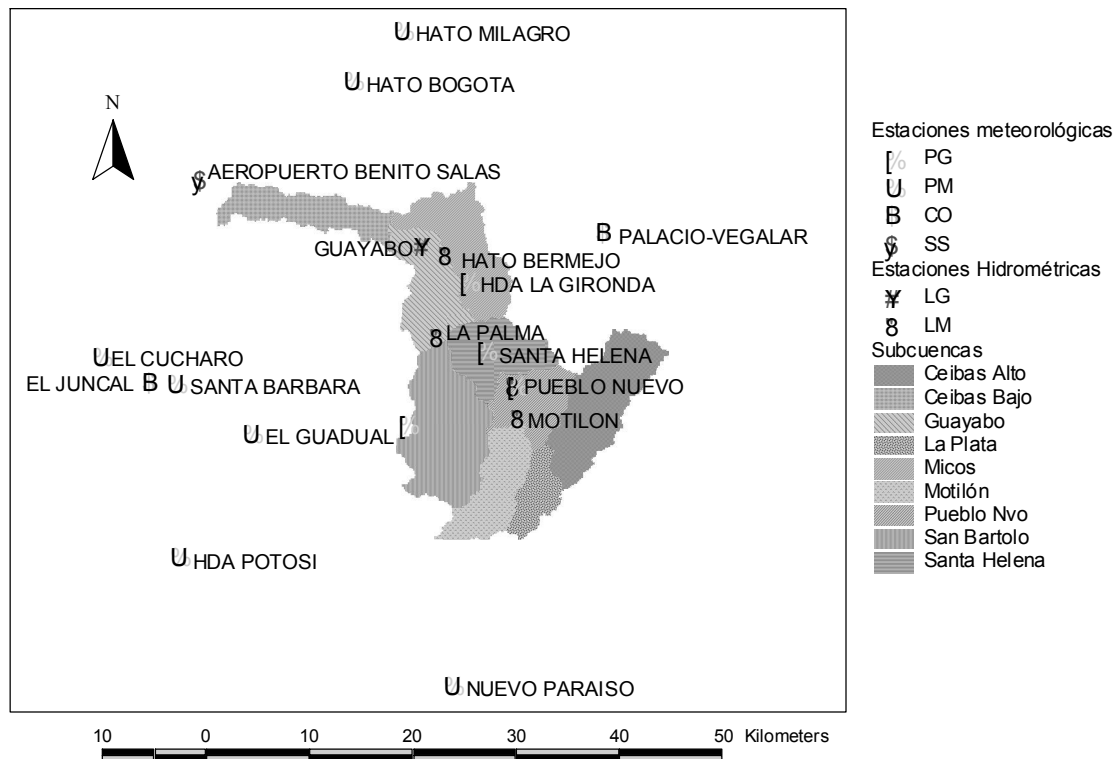


Figura 3. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas e hidrométricas y esquema de subcuencas utilizado en la modelación.

Con respecto a la caracterización hidrológica de la cuenca, en la Figura 4 se muestran los histogramas de caudales medios y máximos mensuales en la estación hidrométrica El Guayabo, los cuales indican la importante variabilidad mensual, típica de una cuenca de tipo torrencial, con un régimen aproximadamente trimodal para los registros medios, debido a los diferentes regímenes de precipitación existentes en la cuenca, y un régimen bimodal para los caudales máximos mensuales, que indica que los mismos son mayormente producidos por escorrentía de las partes media y baja de la cuenca sujetas a un régimen de precipitación de tipo bimodal.

En relación con la información topográfica, para efectos de este estudio se ha contado con el DEM de la cuenca con resolución de 30 m, facilitado por el IGAC al Departamento de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia- Sede Bogotá para los estudios del convenio con la CAM, y con levantamientos topográficos detallados y definición de secciones transversales cada 50 metros, realizados en la parte baja del río Las Ceibas (1.7 kilómetros de longitud) por la Alcaldía de Neiva.

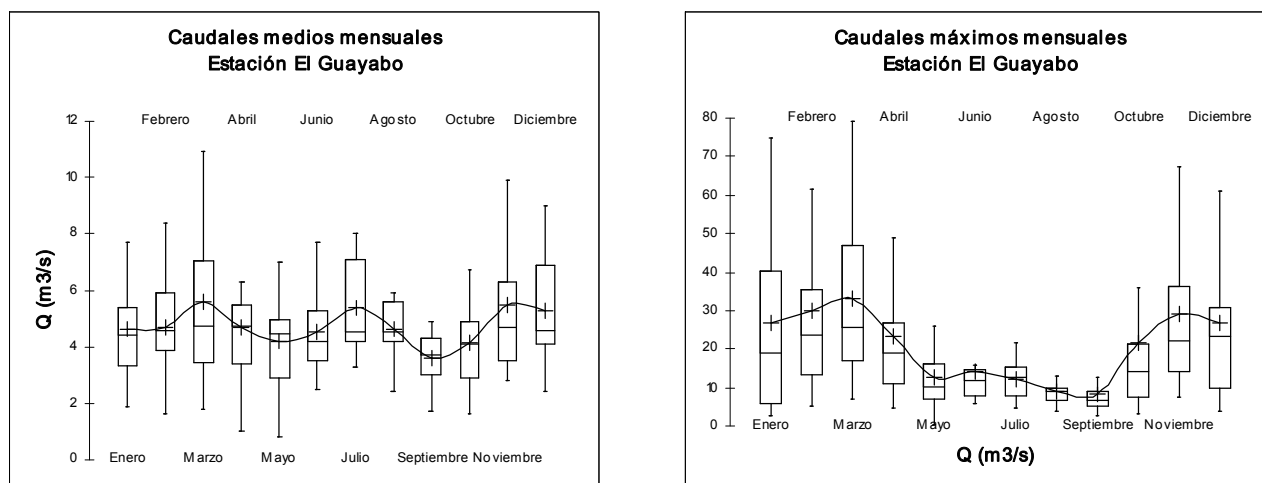


Figura 4. Histogramas de caudales medios y máximos mensuales en la estación El Guayabo.

En la mayoría de las aplicaciones (el caso de estudio es una excepción) se tiene información topográfica limitada, y aunque HEC-RAS incluye herramientas de interpolación automática de secciones transversales, es siempre conveniente reducir al máximo la interpolación, garantizando la estabilidad numérica de la solución a través de la escogencia de un valor adecuado para la resolución espacial del modelo (distancia máxima entre secciones transversales). Adicionalmente, es necesario definir la resolución temporal del esquema de solución numérica para que la solución sea estable, garantizando el criterio de Courant.

4. Resultados

A continuación se describen, en orden metodológico siguiendo el esquema de la Figura 1, los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología propuesta y de cada uno de los modelos y herramientas de análisis espacial utilizados en este estudio, considerando la información disponible descrita en el numeral anterior.

4.1. Herramienta HEC-GeoHMS

A partir del DEM disponible para la cuenca del río Las Ceibas se ha realizado el pre-procesamiento de la información altitudinal obteniéndose el modelo topológico en formato HEC-HMS mostrado en la Figura 5. Como punto de mayor interés se ha

seleccionado el sitio de ubicación de la estación limnigráfica El Guayabo.

4.2. Modelo hidrológico HEC-HMS

A partir del modelo topológico de la cuenca, y del cruce entre los mapas de uso del suelo y de geomorfología (Universidad Nacional, 2007), se han establecido para cada subcuenca los valores iniciales de los cinco parámetros de los métodos hidrológicos seleccionados en este estudio, que incluyen la , CN , $tlag$, K y x para cada subcuenca y tramo de tránsito. Con el fin de calibrar y posteriormente validar los parámetros del modelo, se han seleccionado dos eventos de calibración (C1 y C2) y un evento de validación (V1) (ver Tabla 1), para los cuales se tienen las cartas pluviográficas en por lo menos dos estaciones y datos del limnógrafo ubicado en El Guayabo, con registros horarios de nivel.

Debe aquí mencionarse que en los registros de niveles del IDEAM existen blancos en las series en El Guayabo, que han sido interpretados como lapsos de tiempo con nivel aproximadamente constante, y que son la causa por la cual una de las hidrógrafas seleccionadas luce a primera vista un poco extraña. Las características de los eventos de calibración y validación seleccionados se presentan en la Tabla 1, y los resultados de las fases de calibración y validación se presentan en la Tabla 2 y en la Figura 6.

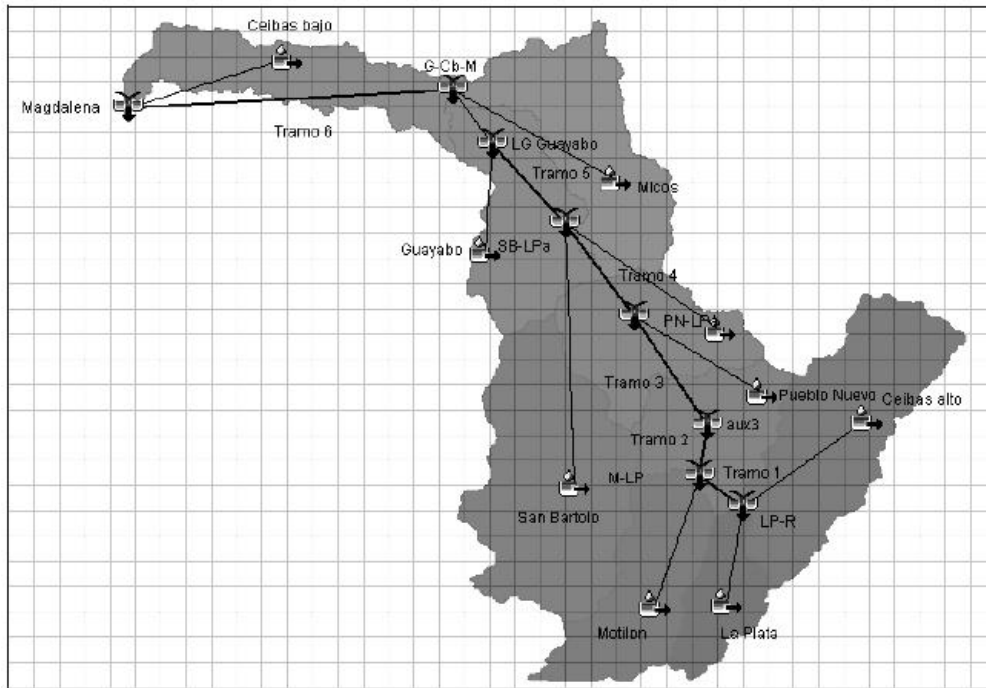


Figura 5. Modelo topológico obtenido en HEC-GeoHMS para la modelación hidrológica de tipo evento.

Tabla I. Características de los eventos seleccionados para calibración y validación del modelo HEC-HMS.

Evento	Fecha	Precipitación (mm)				Qpico (m ³ /s)	Condiciones antecedentes de humedad
		Aeropuerto Benito Salas	Gironda	Juncal	Palacio Vegalarga		
C1	15-Mar-96	45.5	-	-	40.0	31.1	Húmedo
C2	02-May-98	48.9	-	65.3	-	2.3	Seco
V1	14-Oct-96	6.2	53.6	-	54.1	29.3	Húmedo

Los eventos de calibración y validación mostrados en la Tabla I han sido seleccionados como aquellos con información concurrente disponible en el mayor número de estaciones pluviográficas y registros en El Guayabo. Para calibración fueron seleccionados un evento húmedo (C1) y uno seco (C2) intentando resaltar la necesidad de tener dos conjuntos de parámetros diferentes para obtener simulaciones satisfactorias. La validación con condiciones antecedentes húmedas (caso más crítico para análisis de inundaciones) para el evento V1, se ha obtenido al utilizar los parámetros calibrados del evento C1 directamente, ajustando ligeramente las pérdidas iniciales (I_a), que necesariamente debe ser ajustadas en el caso de una modelación

de tipo evento (ver Tabla 2). Debe anotarse que los parámetros K y x de Muskingum no fueron calibrados debido a que para los datos de niveles y caudales disponibles en las cuatro estaciones limimétricas adicionales a El Guayabo, solo se cuenta con registros diarios. Por tanto, los valores de estos dos parámetros fueron estimados siguiendo metodologías convencionales (USDA, 1986). Las hidrógrafas de caudales simulados y observados para los tres eventos seleccionados (con valores de caudal pico con períodos de retorno entre 5 y 10 años para los eventos húmedos e inferior a 2 años para el evento seco) se comparan razonablemente bien, con coeficientes de eficiencia siempre mayores de 0.60.

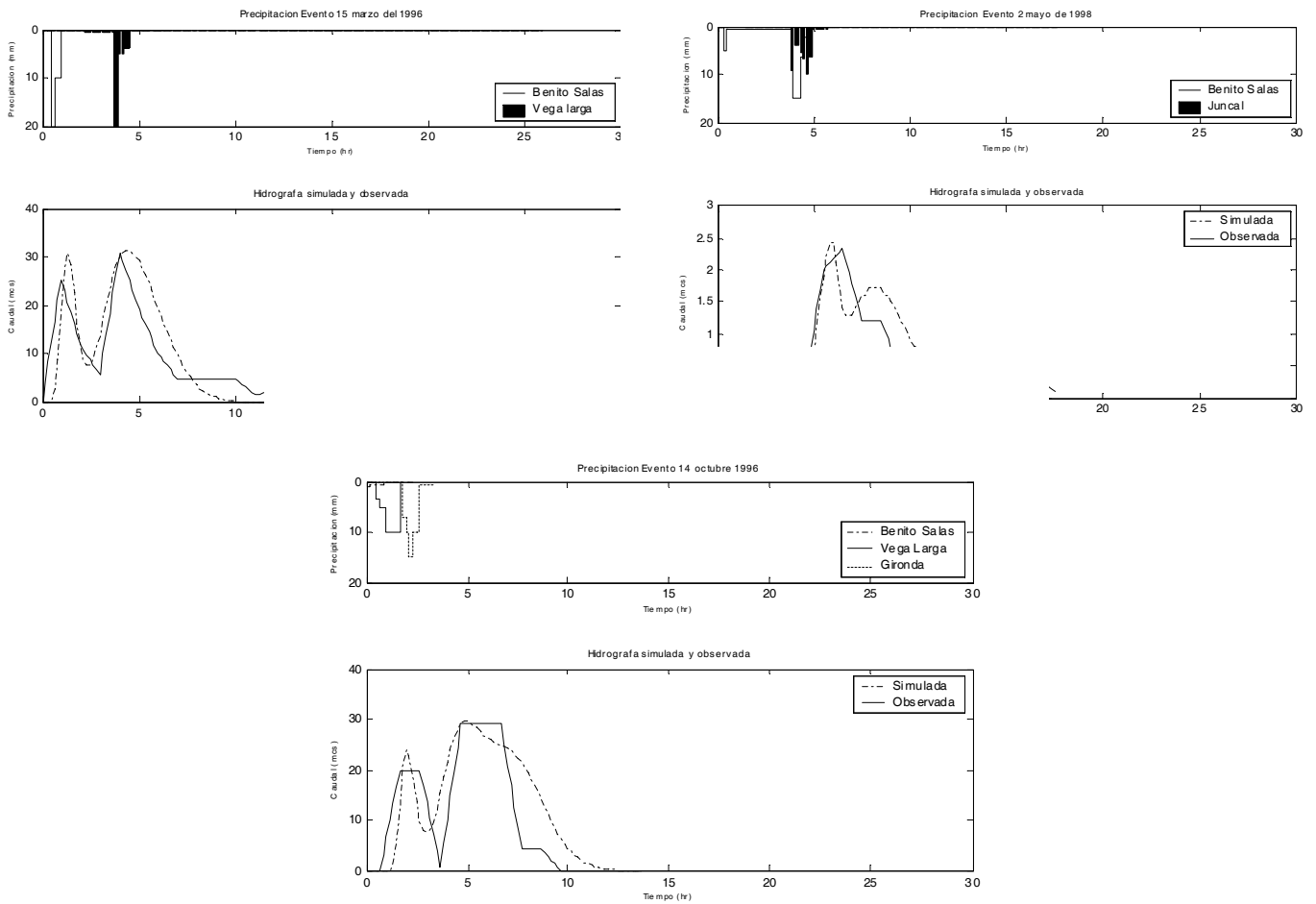


Figura 6. Resultados calibración y validación de la modelación con HEC-HMS.

4.3. Herramienta HEC-GeoRAS (PreRAS)

Con la información topográfica disponible (DEM y topografía de detalle) se ha generado una red irregular triangulada (TIN), a partir de la cual y con la herramienta Pre-RAS de GeoRAS se han definido las características geométricas del tramo del río Las Ceibas (de aproximadamente 1,7 km de longitud) objeto del análisis hidráulico.

4.4. Modelo hidráulico HEC-RAS

El archivo de geometría generado en HEC-GeoRAS etapa PreRAS, el cual incluye el alineamiento del canal principal, las bancas y secciones transversales, es importado directamente al modelo

HEC-RAS, al cual se le ingresan adicionalmente las condiciones de frontera y el valor del coeficiente de rugosidad n de Manning para el canal principal y la planicie de inundación. En la metodología expuesta, y por lo general, se asume que el coeficiente de rugosidad es constante en la vertical y solo varía transversalmente. Aunque en HEC-RAS existen opciones para introducir la variabilidad vertical del coeficiente de rugosidad, en la práctica es difícil hacerlo por limitaciones de información, y por ende, para el caso de análisis de crecientes, por lo general, se obtienen niveles de agua ligeramente por debajo de los observados.

Con el fin de determinar las condiciones de frontera aguas arriba del tramo analizado, con el modelo hidrológico calibrado y validado para condiciones antecedentes húmedas, se han generado, siguiendo metodologías estándar (curvas de masa

Tabla 2. Valores de los parámetros por subcuenca para los eventos de calibración seleccionados.

Evento	Subcuenca	Precip. Total subcuenca (mm)	Ia (mm)	CN	tlag (min)	Tramos tránsito	K (hr)	x
C1	Ceibas Alto	40	26	48	50	Tramo 1	0.41	0.2
	El Guayabo	40	11	61	40	Tramo 2	0.34	0.2
	La Plata	40	11	55	33	Tramo 3	0.32	0.2
	Motilón	40	28	47	48	Tramo 4	0.41	0.2
	Pueblo Nuevo	40	11	61	43	Tramo 5	0.41	0.2
	San Bartolo	40	20	61	80	Tramo 6	0.39	0.2
	Santa Helena	40	23	69	60	Eficiencia-Coef. De Nash		
	Ceibas Bajo	40	20	47	125	0.661		
	Los Micos	40	11	61	62			
C2	Ceibas Alto	51	47	58	30	Tramo 1	0.41	0.2
	El Guayabo	40	33	66	30	Tramo 2	0.34	0.2
	La Plata	51	54	70	23	Tramo 3	0.32	0.2
	Motilón	59	56	59	33	Tramo 4	0.41	0.2
	Pueblo Nuevo	57	49	53	30	Tramo 5	0.41	0.2
	San Bartolo	59	55	74	60	Tramo 6	0.39	0.2
	Santa Helena	46	44	53	50	Eficiencia-Coef. De Nash		
	Ceibas Bajo	45	20	47	125	0.614		
	Los Micos	40	11	61	62			
V1	Ceibas Alto	58	27	48	50	Tramo 1	0.41	0.2
	El Guayabo	54	29	61	40	Tramo 2	0.34	0.2
	La Plata	54	28	55	33	Tramo 3	0.32	0.2
	Motilón	54	31	47	48	Tramo 4	0.41	0.2
	Pueblo Nuevo	54	33	61	43	Tramo 5	0.41	0.2
	San Bartolo	54	34	61	80	Tramo 6	0.39	0.2
	Santa Helena	54	33	69	60	Eficiencia-Coef. De Nash		
	Ceibas Bajo	6	20	47	125	0.607		
	Los Micos	54	11	61	62			

adimensionales, curvas sintéticas i-d-f y factores de reducción de la precipitación puntual por área), tormentas sintéticas con períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años, que aplicadas sobre toda la cuenca han permitido estimar las hidrógrafas aguas arriba del tramo analizado hidráulicamente, para aproximadamente los mismos períodos de retorno.

En relación con las condiciones aguas abajo del tramo analizado, se tienen los datos de niveles en la estación Puente Santander, sobre el río Magdalena, aproximadamente 1,200 m aguas abajo de la confluencia con el río Las Ceibas. A partir del análisis estadístico de estos niveles se han estimado los mismos para diferentes períodos de retorno (Universidad Nacional, 2006), y se han transferido al sitio de confluencia utilizando resultados de trabajos de campo en los cuales se ha determinado que la pendiente hidráulica promedio es del orden de 1.85 m/km (Universidad Nacional, 2006). Considerando la importante regulación que el

Embalse de Betania realiza sobre los niveles y caudales en este tramo del río del Magdalena, se ha considerado como condición única y crítica de modelación hidráulica para el tramo del río Las Ceibas analizado, el nivel con período de retorno de 50 años en la confluencia con el Magdalena y que corresponde aproximadamente a 428.97 msnm. Con respecto a las condiciones de frontera aguas abajo, para ríos de montaña es válido suponer que la curva de calibración es única, mientras que para el caso de ríos de planicie, se debe considerar el comportamiento histerético de la curva, lo que lógicamente afecta la calidad de las simulaciones. En este tipo de casos es importante analizar el impacto de estas condiciones de frontera, analizando los resultados obtenidos al variar dichas condiciones, manteniendo sin cambio las características de la hidrógrafa a transitar.

En cuanto al coeficiente de rugosidad, este se ha determinado preliminarmente a partir de información fotográfica (Chow, 1959)

y análisis granulométricos convencionales de material de fondo y se ha estimado constante en todas las secciones transversales (incluyendo cauce principal y planicie de inundación) e igual a 0.045. Con toda la información antes descrita se ha corrido el modelo HEC-RAS, y los resultados de perfiles de flujo para el nivel más alto se han contrastado cualitativamente con los resultados de trabajos de campo (marcas de niveles altos y entrevistas), informaciones de periódicos y resultados hidráulicos de análisis anteriores (Universidad Nacional, 2007), mostrando resultados bastante coherentes. Desafortunadamente en el tramo en cuestión, como en la mayoría de los cauces colombianos, no existe un sistema de miras perfectamente nivelado, amarrado y leído frecuentemente, que permita ajustar los valores del coeficiente de rugosidad a la luz de estos registros, ni tampoco datos de crecientes contenidas en las bancas que permitan calibrar el *n* de Manning.

Como resultado de la modelación hidráulica en HEC-RAS, se

obtienen los perfiles de la superficie del agua, las velocidades medias del flujo, las áreas de flujo, el ancho superficial, el número de Froude, la profundidad crítica, entre otras características hidráulicas, para cada uno de los cinco escenarios de modelación (5, 10, 25, 50 y 100 años).

4.5. Herramienta HEC-GeoRAS. PostRAS

Una vez realizados los cálculos hidráulicos en HEC-RAS, los resultados son exportados a HEC-GeoRAS en donde mediante la herramienta PostRAS se procesa y combina la información geográfica e hidráulica para generar los mapas de elevación de la superficie del agua y clasificar las zonas susceptibles a inundación de acuerdo con la metodología propuesta.

La Figura 7 presenta el mapa de inundación generado para diferentes períodos de retorno y la clasificación de zonas con amenaza por inundación.

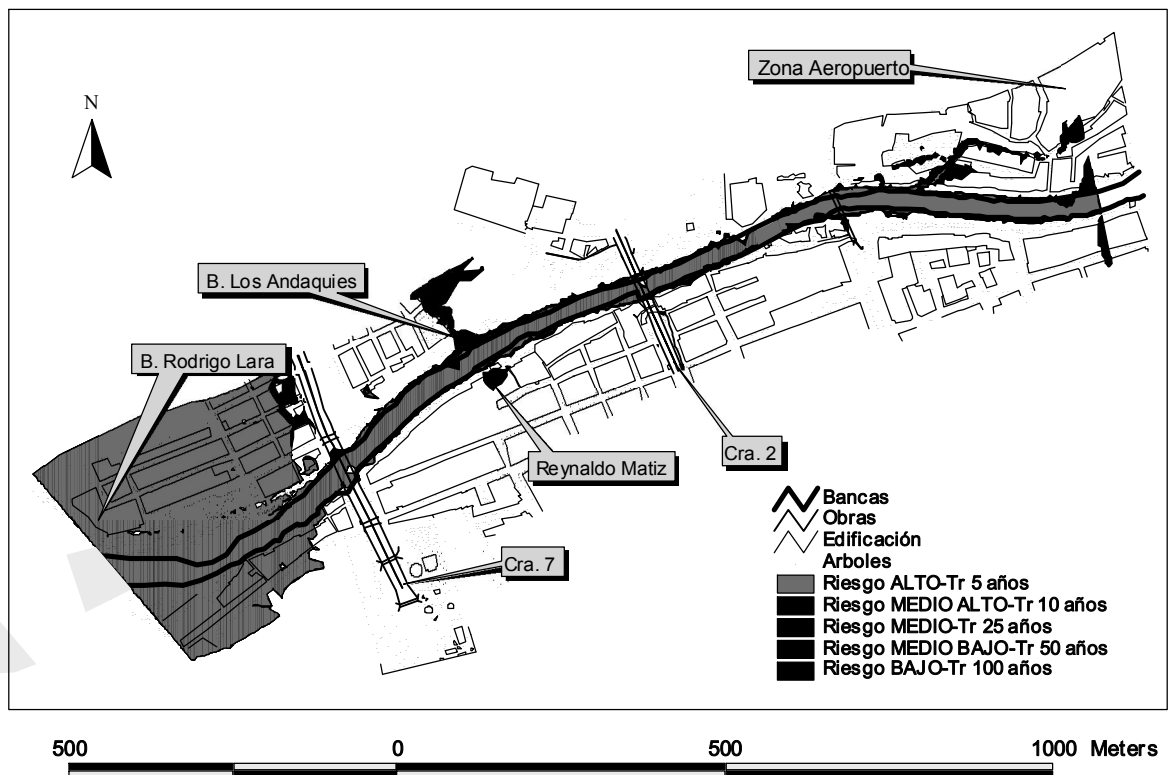


Figura 7. Clasificación de zonas de inundación para la parte baja del río Las Ceibas.

5. Conclusiones

En este artículo se ha propuesto y aplicado satisfactoriamente una metodología para la integración de un modelo hidrológico (HEC-HMS), un modelo hidráulico (HEC-RAS), un modelo de intercambio de datos (HEC-DSS) y un SIG (ArcView) para la producción semiautomática de mapas de amenaza por inundación a partir de registros puntuales (históricos, sintéticos o en tiempo real) de precipitación. Mediante la integración de los modelos y herramientas descritos, se han aprovechado las ventajas de modelos ampliamente utilizados y evaluados, limitando los errores de transferencia de información y facilitando actividades de automatización del proceso.

La metodología propuesta ha enfatizado en la necesidad de aplicar un riguroso protocolo de modelación en el que se utilicen de la mejor forma posible los datos existentes, con el fin de lograr una adecuada calibración y validación de los modelos empleados. Para el caso de la aplicación presentada, en la cuenca del río Las Ceibas (Huila), que bien podría considerarse como una cuenca muy bien instrumentada, se han identificado deficiencias en la información (carencia de estaciones en la parte más alta de la cuenca), y un aspecto bastante común en las cuencas colombianas en las cuales se carece de información de niveles amarrados a un mismo sistema altimétrico para propósitos de calibración de modelos hidráulicos.

Los resultados de la calibración y validación del modelo hidrológico HEC-HMS muestran que es necesario tener dos conjuntos de parámetros diferentes para simular satisfactoriamente condiciones antecedentes en el suelo secas y húmedas. En las hidrógrafas simuladas los limbos ascendente y descendente por lo general se encuentran ligeramente por debajo de los valores observados. Lo anterior conlleva a una subestimación del volumen total de la hidrógrafa que en ningún caso excede el 10%.

El modelo hidrológico ha sido calibrado y validado utilizando registros puntuales de precipitación, los cuales han sido distribuidos espacial y temporalmente en la cuenca. Es importante anotar que este patrón puede no corresponder exactamente con el patrón real de tormenta, y que el efecto de esta distribución influye en los valores de los parámetros calibrados.

El uso de sistemas de información geográfica (SIG) en el geoprocésamiento de la información disponible de la cuenca, permite definir con relativa facilidad las características geomorfológicas y los valores iniciales de varios de los parámetros incluidos en los principales modelos hidrológicos disponibles en HEC-HMS. Así mismo, utilizando modelos de elevación digital, se pueden determinar las condiciones geométricas que definen las características del flujo en canales naturales y/o artificiales y las zonas de inundación aledañas a estos.

La implementación del modelo hidráulico HEC-RAS tiene restricciones asociadas con la característica de unidimensionalidad del modelo, las cuales limitan su aplicación en el caso de existencia de cauces con importantes llanuras de inundación. La solución del modelo HEC-RAS para flujo no permanente es altamente sensible a las condiciones de frontera y a la topología del mismo (resoluciones espacial y temporal), y en este sentido estas se deben definir con gran cuidado.

Desde el punto de vista académico e investigativo, el estudio aquí reportado es un ejercicio completo de modelación hidrológica, hidráulica y geoespacial, que enfatiza sobre la importancia de seguir un protocolo de modelación apropiado y riguroso. Muy importante en la implementación de la metodología es evaluar las limitaciones de los modelos aquí propuestos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia, por suministrar la información topográfica e hidrometeorológica de la cuenca del río Las Ceibas, con fines estrictamente académicos, y a la CAM por su apoyo en la realización del Convenio con la Universidad Nacional. Ricardo A. González Pinzón agradece a la Vicerrectoría Académica de la Universidad Nacional de Colombia por la beca otorgada en el período 2006-2007. Igualmente se agradecen las observaciones de un lector anónimo y de los dos evaluadores, que permitieron mejorar importantemente la calidad de este artículo.

Referencias

Boyle, S.J., Tsanis, I.K. y Kanaroglou, P.S. 1998. Developing Geographic Information Systems for Landuse Impact Assessment in Flooding Conditions. *Journal of Water Resources Planning and*

- Management. Volumen 124. No. 2 pp 89-98.
- Chow, V. T. 1959. Open Channel Hydraulics, Mc Graw Hill Civil Engineering Series, New York.
- Corporación Defensa Meseta de Bucaramanga (CDMB), 2005. Diagnóstico Amenazas de Inundación y Erosión en el río de Oro. Geotecnología Ltda.
- Cunderlink, J.M. y Simonovic, S., 2004. Calibration, verification, and sensitivity analysis of the HEC-HMS Hydrologic Model. CFCAS project: Assessment of Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climatic Conditions.
- Environmental Systems Research Institute ESRI, 1996. ArcView GIS: Using ArcView GIS, Environmental Research Institute, Inc., Redlands, CA. Copyright© 1996 ArcView GIS and Spatial Analyst Extension by Environmental Research Institute System, Inc. All Rights Reserved.
- Knebl, M.R., Yang, Z.L., Hutchison, K. y Maidment, D.R., 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin-summer 2002 storm event, Journal of Environmental Management, Vol 75, pp 325-336.
- Laurenson, E.M., Mein, R.G. y Nathan, R.J., 2006. RORB version 5. Runoff routing program. User Manual, Monash University, Department of Civil Engineering.
- Maidment, D. y Djokic, D., 2000. Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems, ESRI Press.
- Martinez, O., 2000. Aplicación del modelo HEC-RAS. Trabajo no publicado de Especialización en Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia - Bogotá
- McColl, C. y Aggett, G., 2006. Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use support, Journal of Environmental Management, Vol 84, pp 494-512.
- Moges, S.A., Katambara, Z. y Bashar, K., 2003. Decision support system for estimation of potencial evapo-transpiration in Pangani Basin, Physics and Chemistry of the Earth, Vol 28, pp 927-934.
- Nelder, J.A., y R. Mead, 1965. Computer Journal, Vol. 7, pp 308-313.
- Ponce, V.M. 1994. Engineering Hydrology, Principles and Practices. Prentice Hall
- Robayo, O., 2005. Map to Map: Converting a NEXRAD Rainfall Map into a Flood Inundation Map. Tesis no publicada de Maestría. University of Texas at Austin. 234 P.
- Snyman, J.A., 2005. Practical mathematical optimization: An introduction to basic optimization theory and classical and new Gradient-Based algorithms. Springer Publishing.
- United States Army Corps of Engineers USACE, 2000. Hydrologic Modeling System (HEC-HMS): Technical Reference Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- United States Army Corps of Engineers USACE, 2002. HEC-RAS: River analysis system hydraulic reference manual, Hydrologic Engineering Center.
- United States Army Corps of Engineers USACE, 2002a. HEC-GeoRAS: An extension for support of HEC-RAS using ArcView GIS, Hydrologic Engineering Center.
- United States Army Corps of Engineers USACE, 2003. Geospatial hydrologic modeling extension HEC-GeoHMS User s Manual, Hydrologic Engineering Center, Washington D.C.
- United States Army Corps of Engineers USACE, 2005. HEC-DSSVue. Versión 1.2, Hydrologic Engineering Center.
- United States Army Corps of Engineers USACE, 2006. Hydrologic modeling system HEC-HMS v 3.1.0. User s Manual, Hydrologic Engineering Center, Washington D.C.
- United States Department of Agriculture, USDA, 1986. Hydrology for small watersheds, TR55, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.
- Universidad del Norte, Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales de la Universidad del Norte IDEHA, 2003. Caracterización Hidráulica y Sedimentológica del Canal del Dique Ideha E 063-019-03
- Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geografía, 2007. Informe Final Proyecto zonificación de la torrencialidad y diseño de un sistema de seguimiento y pronóstico para la cuenca del río Las Ceibas (Huila). Corporación del Alto Magdalena (CAM).
- Universidad Nacional de Colombia, Laboratorio de Ensayos Hidráulicos, 2006. Informe Final Proyecto Análisis de la Estabilidad de las Islas Ubicadas en el Río Magdalena Frente a Neiva. Gobernación del Huila.

Yang, C.R. y Tsai C.T. 2000. Development of a GIS-Based Flood Information System for Floodplain Modeling and Damage Calculation, Journal of the American Water Resources Association. Volumen 36, No. 3. pp 567-577.