

Respuesta hidrológica de la cuenca del río Coro ante rotura de la presa "El Isiro"

INTRODUCCIÓN

La gestión del riesgo de inundación en zonas urbanizadas debe contar con información suficiente y de calidad, tal que se pueda tener certeza científica de la magnitud, distribución espacial y temporal de dicho riesgo. Esto debe pasar necesariamente por la cuantificación de la amenaza y vulnerabilidad a la inundación; la primera permite conocer, basados en análisis hidrológicos e hidráulicos, la probabilidad de que ocurra la inundación, y la segunda la propensión al daño de los elementos en riesgo. Este trabajo, que forma parte de la tesis doctoral en desarrollo de Perozo (2010), aborda lo inicial del primer aspecto, lo cual se refiere análisis hidrológico, cuyo caso de aplicación es la planicie de inundación del río Coro, la cual ha sido urbanizada de manera descontrolada durante los últimos 30 años.

Hasta la actualidad en los análisis hidrológicos realizados en la cuenca del río Coro hasta su desembocadura, no se han tomado en cuenta los posibles alivios y menos el propio colapso de la presa del embalse "El Isiro", la cual se encuentra en dicha cuenca y que sirve de fuente para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Coro, capital del Estado Falcón de la República Bolivariana de Venezuela. Más aún, aguas abajo de esta estructura hidráulica está ubicada la planicie urbanizada cerca de la desembocadura de la cuenca al Mar Caribe (ver figura 1), lo que significa que cuando el embalse alivia aporta caudales de importante magnitud a dicha planicie y sin duda la posibilidad de su rotura aumenta considerablemente el riesgo de inundación.

En este trabajo además de actualizarse el estudio hidrológico de toda la cuenca, se tomó en consideración el embalse "El Isiro" y la subcuenca que lo drena, así como la posibilidad de su rotura. Para ello, se usó como herramienta de apoyo el software HEC-HMS y HEC-GeoHMS, para modelar la relación lluvia escurrentía a nivel

Resumen / Abstract

Los estudios hidrológicos de la cuenca del río Coro han desestimado los alivios y el colapso de la presa "El Isiro" que sirve de fuente a la ciudad de Coro. Aguas abajo del embalse, en la planicie de inundación del río, existe una urbanización acelerada y crecen los daños posibles. Este trabajo actualizó el estudio hidrológico incorporando la subcuenca de "El Isiro" y considerando rotura de la presa y su impacto en la respuesta de la cuenca, que permite cuantificar la amenaza de inundación. Se usó como apoyo el software HEC-HMS v.3.3. Los resultados reflejan que los caudales máximos al final de la cuenca crecen 20-35% considerando los alivios. Cuando se incluye la rotura dichos caudales aumentan entre 5-17 veces. Por otro lado, los tiempos al pico se reducen considerablemente con la rotura. Este trabajo representa un valioso aporte para la gestión del riesgo de inundación.

Palabras Clave: gestión del riesgo de inundación, planicie de inundación, rotura de presa, urbanización, software HEC-HMS.

Hydrologic studies in Coro river basin have neither considered wasted water by spillway overflow nor the "El Isiro" dam break which supplies Coro city. An accelerated urbanization existing downstream of the reservoir in the river floodplain considerably increases possible damages. This paper updated the hydrologic study where "El Isiro" subbasin was included as well as the possibility of the dam break. The impact on the basin response was evaluated allowing the quantification of the flood threat and consequences. The study was supported on HEC-HMS v.3.3 software. Results show that maximum discharges at the end of the basin increase by some 20-35% including spillway discharges. When the dam break is included they are magnified 5-17 times. On the other hand, under the break event peak times are considerably reduced. This work represents a valuable contribution to the flood risk management in the zone.

Keywords: flood risk management, floodplain, dam break, urbanization, HEC-HMS software.

Miguel Ángel Perozo Ynestroza, CIDRHI, Univ. "Francisco de Miranda, Falcón, Venezuela

e-mail: maperozo40@gmail.com, miguelap@cih.cujae.edu.cu

Geraldtyh Soto, CIDRHI, Univ. "Francisco de Miranda, Falcón, Venezuela

Norberto V. Marrero de León, CIH, CUJAE, Habana e-mail: marrero@tesla.cujae.edu.cu

Isabel Cristina Linárez Rojas, Univ. Bolivariana de Venezuela, Punto Fijo, Falcón, Venezuela. e-mail: linarezrojas@hotmail.com

de eventos para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años, considerando la rotura de la presa tanto por tubificación o sifonamiento como por vertimiento o rebase.

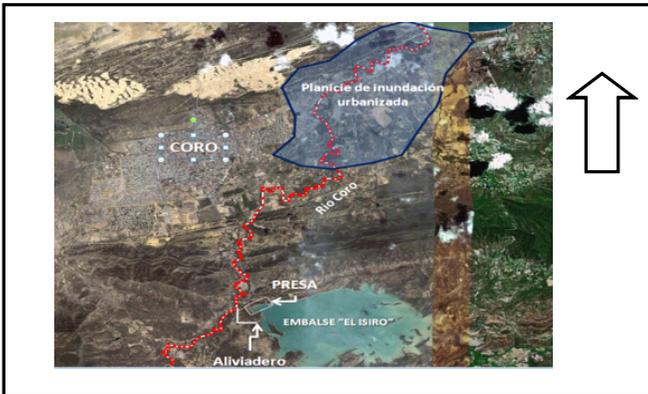


Figura 1. Zona de estudio
(fuente: Google earth. Imagen de satélite 2006)

METODOLOGÍA

Para la materialización de este trabajo se desarrollaron cinco (5) fases, en la fase 1 se recopiló la información básica para delimitar de forma automática la cuenca que drena al embalse "El Isiro"; para ello se usó la digitalización de la información topográfica de la región en estudio a escala 1:25000, a partir de esta información se procedió a construir el modelo de elevación digital de dicha región, apoyados en el uso del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcView V.3.3, ver figura 2.

Luego, apoyados en la extensión HEC-GeoHMS en el mismo ambiente del SIG en cuestión, se delimitó automáticamente la cuenca y subcuencas que drenan al río Coro hasta su planicie de inundación.

En la fase 2, se construyó el modelo conceptual de la cuenca en el formato adecuado, el cual fue importado desde el software HEC-HMS. En la fase 3 se incorporó al modelo conceptual en el HEC-HMS el embalse "El Isiro", para el cual se introdujo la curva altura-área-capacidad, la cual fue obtenida de una batimetría reciente, las características geométricas e hidráulicas de la presa y del aliviadero. De igual forma, se activó el módulo para considerar la rotura de la presa, llamado DAM-BREAK, y esto implica el planteamiento de diversos escenarios basados en el tipo de falla (tubificación o vertimiento) y la suposición de la geometría de la misma, así como el nivel de aguas donde se produce la falla, para ello se deben seleccionar los métodos de activación y progresión de la falla.

En la fase 4 se determinaron las precipitaciones máximas de diseño para 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años de período de retorno en cada una de las subcuencas delimitadas en la fase anterior; para ello, se ubicaron las estaciones pluviográficas dentro y en las adyacencias de la cuenca y se recopiló sus datos de lluvia máxima para diversas duraciones; para cada estación se construyó la curva Profundidad-Duración-Frecuencia a partir de los respectivos análisis probabilísticos de los datos; luego se determinó la precipitación de diseño; posteriormente, aplicando el método de los polígonos de Thiessen, se estimó

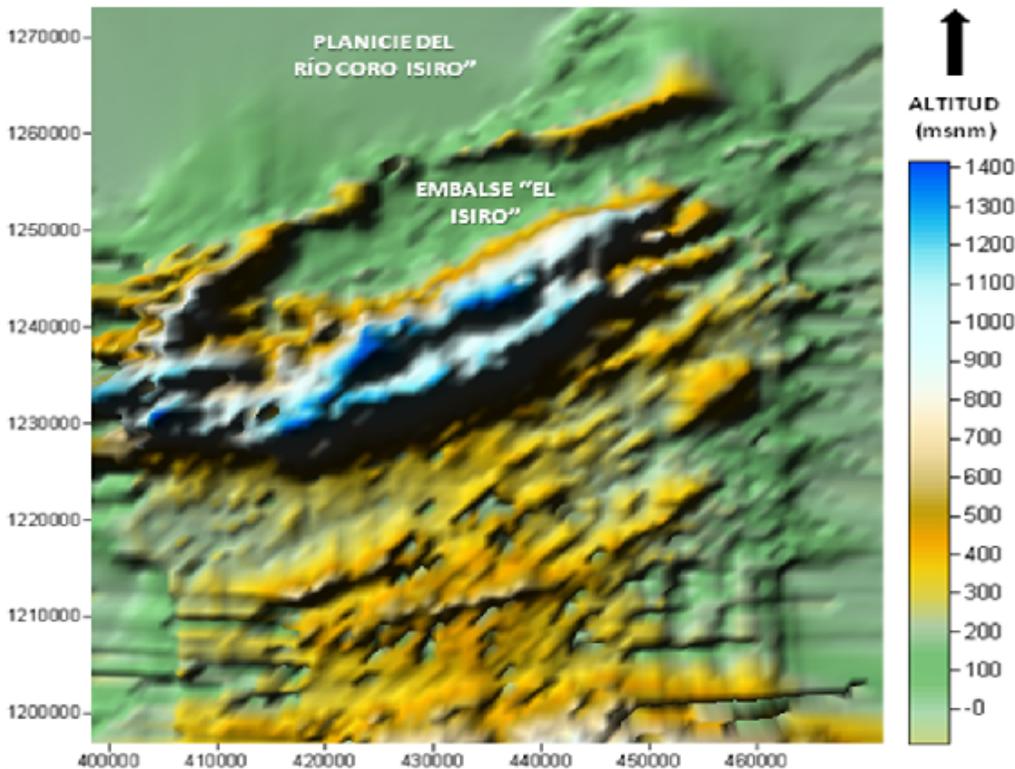


Figura 2. Modelo de elevación digital de la Sierra de Falcón.

la lluvia máxima promedio en cada subcuenca; esta información se incorporó al HEC-HMS. En la fase 5 se aplicó el método de la Curva Número (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos de Norteamérica (USA) para determinar la lluvia efectiva en cada subcuenca; para ello, se recopiló la información disponible de las características fisiográficas de la cuenca referidas a la cobertura vegetal, uso de la tierra y tipos de suelo; luego se obtuvo una CN para cada subcuenca.

En la fase 6 se aplicó el método del Hidrograma Unitario del SCS de USA para transformar la lluvia efectiva en caudal en cada subcuenca. Con esto se obtiene el hidrograma a la salida de cada subcuenca y de la cuenca en su globalidad, y con ello la respuesta hidrológica de la misma. En la fase 7 se seleccionan los métodos para el tránsito en cauces (método de Muskingum) y en el embalse (método de la piscina nivelada). En fase 8 se analizan los resultados obtenidos en la fase anterior

considerando los escenarios planteados en la fase 3, tomando en cuenta los caudales máximos, los tiempos en que ocurren los caudales máximos y los volúmenes de escorrentía.

DELIMITACIÓN DE LA CUENCA Y SUBCUENCAS DEL RÍO CORO

Apoyados en el SIG ArcView se obtiene el MED de la zona en estudio, la cual pertenece a la Sierra de San Luis del Estado Falcón, ver figura 3. Este MED se obtuvo gracias a la integración de la información recogida de Perozo (2010), Linárez (2010), Arcila y Guanipa (2003) y González y Ortega (2004).

Con este MED y apoyados en la aplicación HEC-GeoHMS, se ubica el punto de cierre de la cuenca (planicie), obteniéndose la red de drenaje y luego la delimitación automática de la cuenca y subcuencas del río Coro hasta su planicie, ver figura 4.

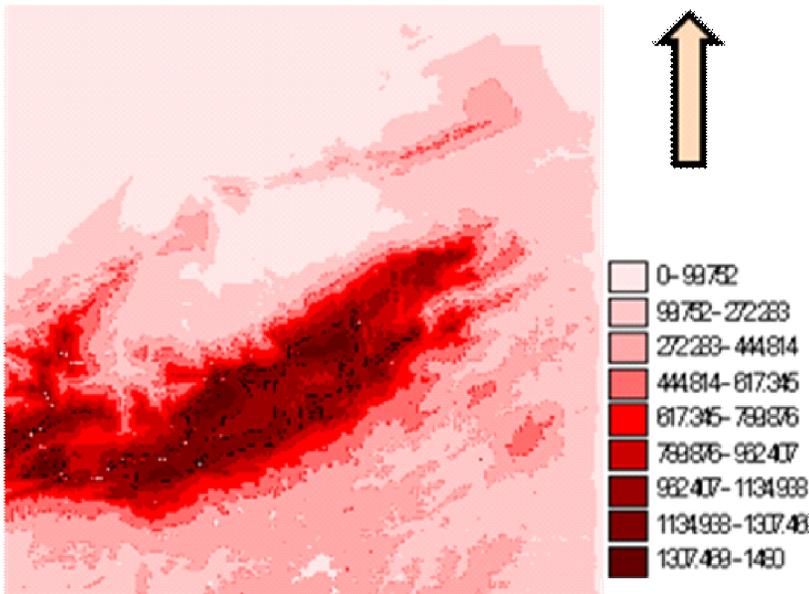


Figura 3. Modelo de elevación digital de la zona en estudio.

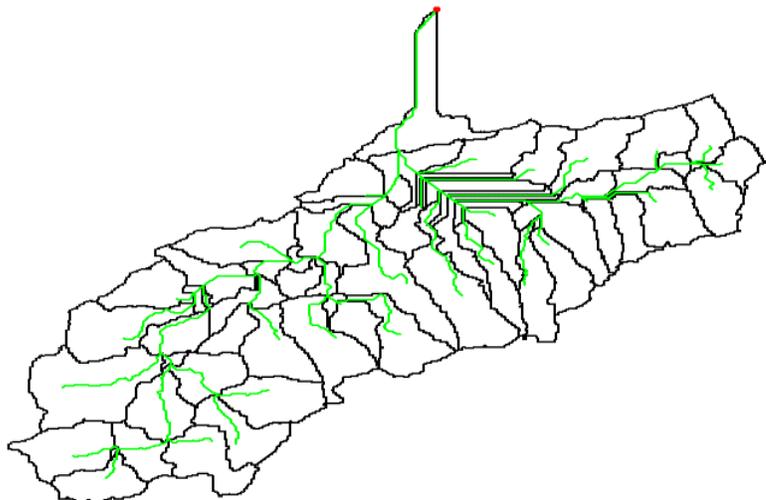


Figura 4. Delimitación automática de la cuenca y subcuencas del Río Coro hasta su planicie de inundación.

El resultado de la subdivisión de cuencas en subcuencas arrojó un total de 63 subcuencas que en conjunto abarcan un área de drenaje aproximadamente igual a 610 km². El tiempo de concentración estimado para toda la cuenca fue de aproximadamente 9 horas.

Posteriormente se obtiene su modelo conceptual en el formato adecuado para ser importado desde el software HEC-HMS, ver figura 5. Además se obtienen para cada subcuenca parámetro tales como longitud del cauce, pendientes, entre otros.

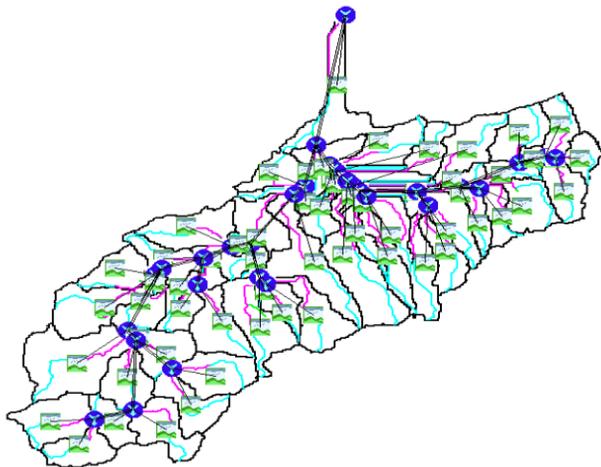


Figura 5. Modelo Conceptual de la cuenca y subcuencas en el formato para ser importado desde HEC-HMS.

Modelo conceptual de la cuenca y subcuencas del río Coro

A continuación se presenta el modelo conceptual de la cuenca y subcuencas del río Coro hasta su planicie de inundación incluyendo al embalse "El Isiro", ver figura 6.

ESCENARIOS PARA CONSIDERAR LA ROTURA DE LA PRESA DEL EMBALSE "EL ISIRO"

Criterios supuestos

Como ya se indicó en la metodología, el modelo HEC-HMS ofrece un módulo llamado DAM-BREAK, que permite modelar la rotura de la presa de un embalse. Se seleccionaron los dos tipos de fallas (tubificación y vertimiento), su geometría, el nivel de activación, así como los métodos para modelar la activación y progresión de la misma. Se supone que la morfología de la falla es trapezoidal, como se muestra en la figura 7, donde B es el ancho superior de la brecha, b es el ancho de plantilla de la brecha, d es la profundidad de la brecha, y H es la altura del dique. Rivas y Berezowsky (2000), plantean que en general se conservan las relaciones $B/b \sim 1.3$, $B/d \sim 3$ y el talud $k \sim 3$. La relación B/b es inversamente proporcional a H.

De acuerdo con estos criterios se supuso que el valor del ancho de la brecha es aproximadamente igual al 25% de la longitud total de la presa principal del embalse "El Isiro", el cual tiene una longitud de 230 metros, por lo

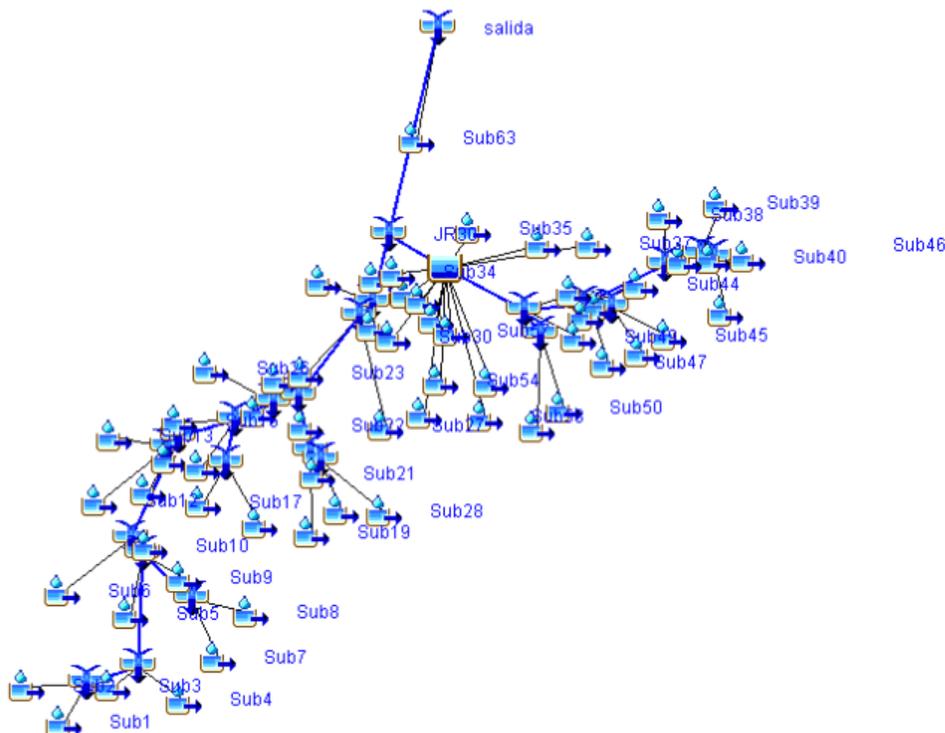


Figura 6. Modelo Conceptual de la cuenca y subcuencas en HEC-HMS considerando el embalse "El Isiro".

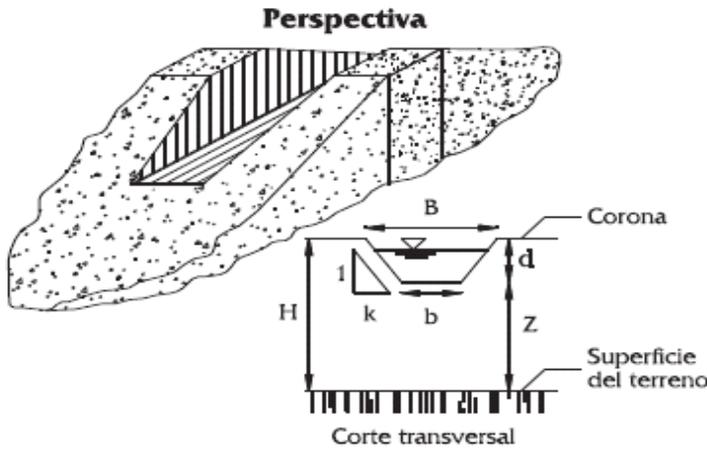


Figura 7. Forma y dimensiones de la brecha más comúnmente adoptadas. (fuente: Rivas y Berezowsky 2000)

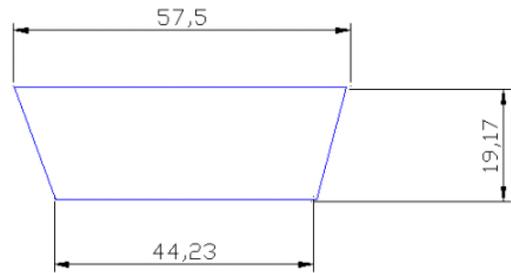


Figura 8. Dimensiones de la brecha supuesta en la presa del embalse "El Isiro".

tanto, las dimensiones de la brecha supuesta se muestran en la figura 8. Esto es válido para los dos tipos de brecha supuestas.

Para el tipo de falla por tubificación se escogió el método de activación llamado "Trigger Elevation", el cual requiere la selección de un nivel de activación, que para el caso de estudio se escogió el nivel normal y medio del embalse. De igual forma para modelar la progresión de la falla se seleccionó el método lineal. Entonces se plantean tres (3) escenarios: el escenario 1: falla por tubificación y la activación de la falla ocurre cuando el embalse alcanza su nivel normal; el escenario 2: falla por tubificación y la activación de la falla ocurre cuando el embalse alcanza su nivel medio; y el escenario 3: falla por vertimiento.

DETERMINACIÓN DE LA LLUVIA DE DISEÑO EN CADA SUBCUENCA

Obtención de la relación Profundidad-Duración Frecuencia (P-D-F) y la lluvia de diseño en cada una de las estaciones pluviográficas que influyen en la cuenca del río Coro

Se efectuó un análisis probabilístico de los datos de lluvia máxima para diversas duraciones, apoyados en el software AJUSTE, el cual permite realizar una prueba de bondad del ajuste de dichos datos, considerando las distribuciones Normal, Log-Normal, Gumbel, Log-Gumbel, Pearson 3 y Log-Pearson 3; la prueba de ajuste usada fue la Smirnov-Kolmogorov. Los períodos de retorno seleccionados fueron: 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años.

Las estaciones seleccionadas fueron en total ocho (8): Curimagua-Siburúa, La Negrita, Coro, El Palmar, Las Polonias, El Mamón, Paso Florida y Macuquita; en las figuras 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16 se presenta la P-D-F de cada estación.

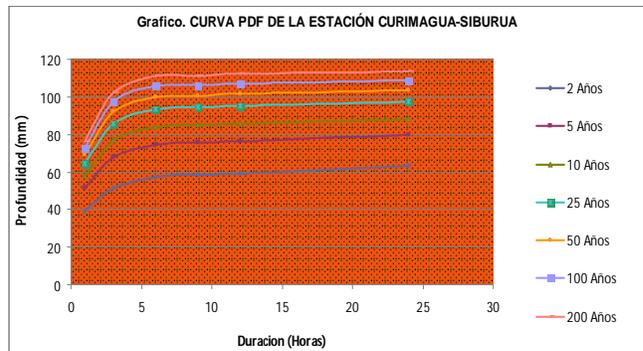


Figura 9. PDF de la estación Curimagua-Siburúa.

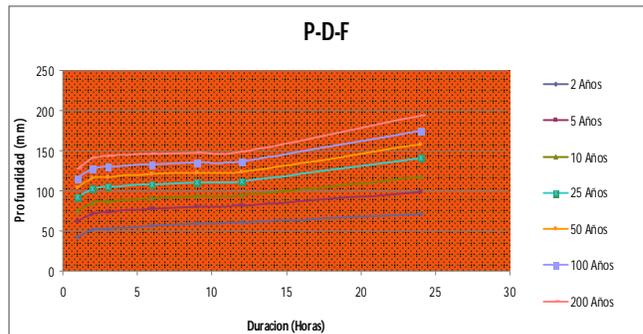


Figura 10. PDF de la estación La Negrita.

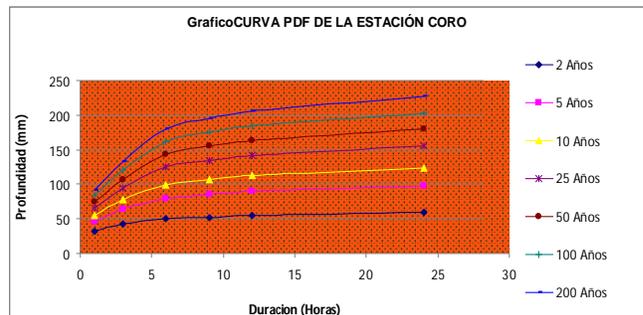


Figura 11. PDF de la estación Coro.

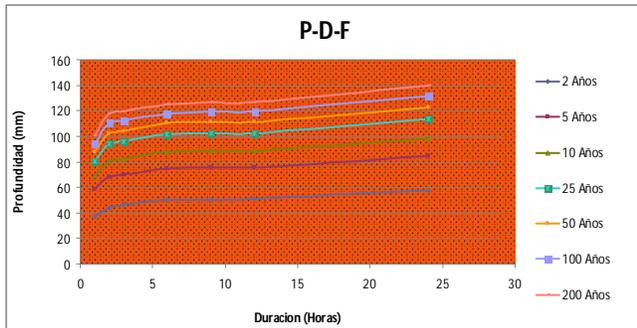


Figura 12. PDF de la estación El Palmar.

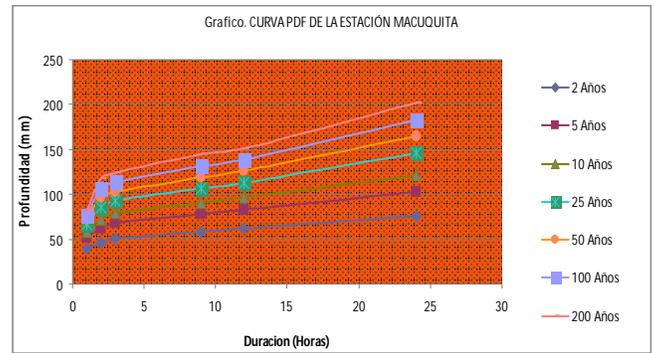


Figura 16. PDF de la estación Macuquita.

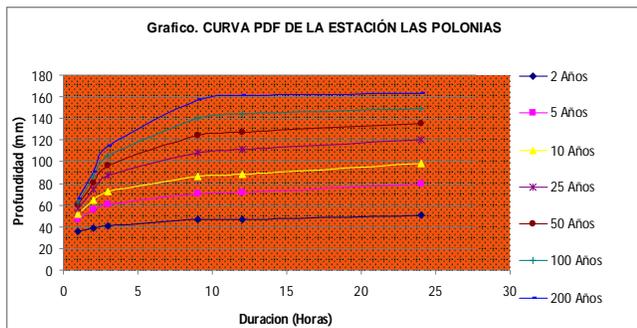


Figura 13. PDF de la estación Las Polonias.

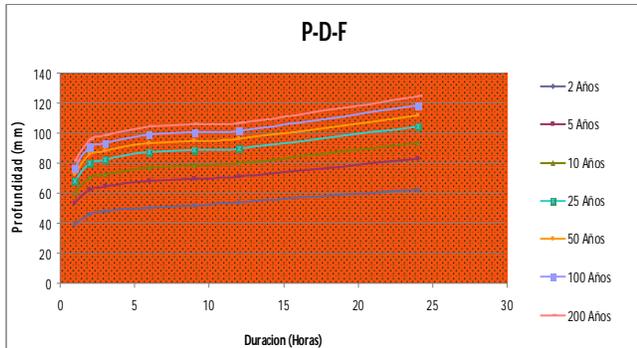


Figura 14. PDF de la estación El Mamón.

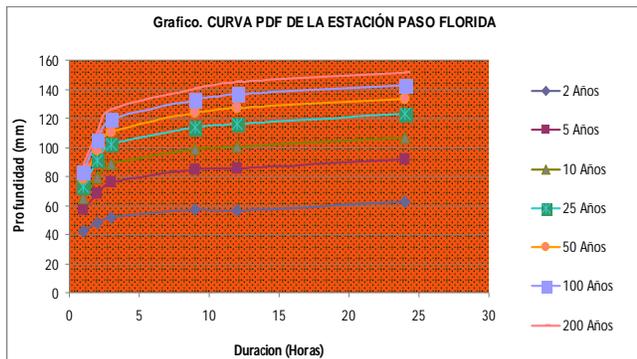


Figura 15. PDF de la estación Paso Florida.

Para la obtención de la lluvia de diseño se seleccionó su duración, la cual fue aceptada como el tiempo de concentración de la cuenca cuya magnitud fue de 9 horas; mientras que para la frecuencia de diseño, se trabajó para 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años de período de retorno.

Distribución espacial y temporal de la lluvia máxima

Aplicando el método de los polígonos de Thiessen, se determinó la influencia de cada una de las estaciones pluviográficas en las subcuencas obtenidas, ver figura 17.

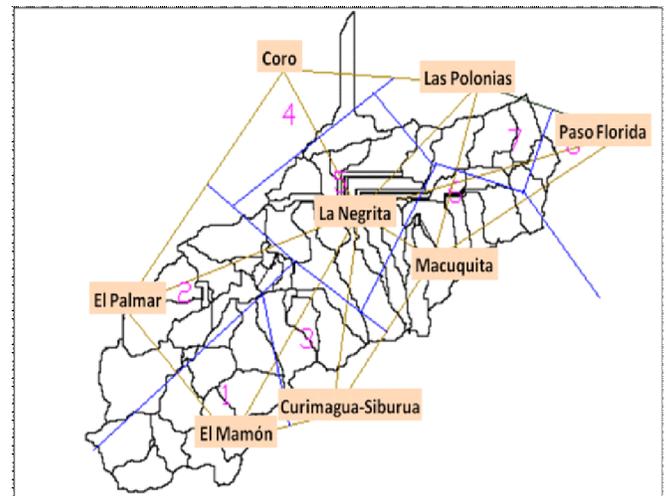


Figura 17. Distribución espacial de la lluvia máxima en la cuenca del Río Coro.

Luego para la distribución temporal de la lluvia, se utilizan las curvas adimensionales de tormenta que propone el SCS de USA, obteniéndose hietogramas de diseño para cada subcuenca, en la figura 18 se muestra un ejemplo de los hietogramas obtenidos.

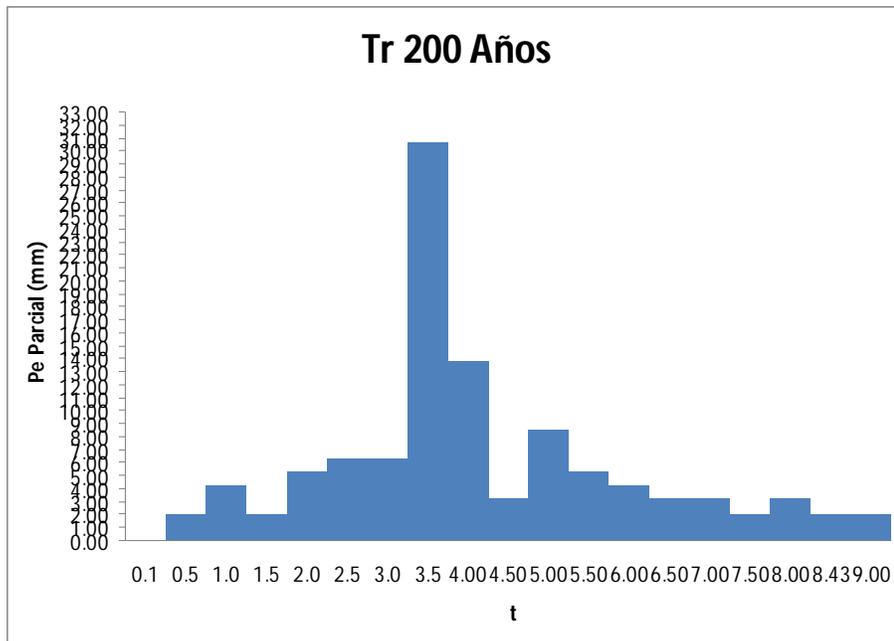


Figura 18. Hietograma Ponderado de las Subcuencas 1, 3, 4, 7 para un período de retorno de 200 años.

DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO CORO EN SU PLANICIE DE INUNDACIÓN

Obtención de la lluvia efectiva

González y Ortega (2004) y Bastos y Galicia (2007) usando los datos obtenidos del análisis de las características fisiográficas de las subcuencas del río Seco y la que drena al embalse "El Isiro", obtuvieron unos valores preliminares de CN de éstas. En este trabajo, se integraron y optimizaron estos datos y suponiendo como condición de humedad antecedente tipo III, la cual representa la condición más desfavorable, se obtuvo la CN definitiva para cada subcuenca; dichos valores variaron entre 67 y 87.

Obtención de los hidrogramas y volúmenes de escorrentía para los escenarios planteados

Aplicando el método del Hidrograma Unitario del SCS de USA en cada subcuenca, se obtuvieron los hidrogramas a la salida de cada una, así como en la entrada y salida del embalse "El Isiro", sin considerar y considerando la rotura de su presa principal de acuerdo con los 3 escenarios

planteados. En la tabla 1 se muestran los caudales máximos obtenidos en el estudio hidrológico más reciente que se realizó en dicha cuenca (González y Ortega, 2004), y en la tabla 2 se muestran los caudales máximos que se obtuvieron en este trabajo, sin considerar y considerando la rotura de la presa, para los tres escenarios planteados.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que los caudales máximos obtenidos en este trabajo se incrementan entre un 20 y 35% en comparación al estudio hidrológico más reciente; mientras que al comparar los caudales máximos de este trabajo con los obtenidos producto de la modelación de la rotura de la presa "El Isiro", estos se incrementan entre 5 y 17 veces, observándose un mayor impacto en el escenario 3, el cual considera que el tipo de falla es por vertimiento.

En cuanto a la variación de los tiempos en que se presentan los caudales máximos cuando se considera la rotura de la presa, se presentan los hidrogramas de las figuras 19 y 20.

Tabla 1. Caudales máximos del estudio hidrológico más reciente en la cuenca del Río Coro.

T (años)	2	5	10	25	50	100	200
Q _{máx} (m ³ /s)	169.2	315.6	403.1	505.3	577.2	645.8	712.3

Tabla 2. Caudales máximos obtenidos considerando escenarios de rotura de la presa "El Isiro"

	Sin rotura	Con rotura		
Tr (años)	Qmax (m ³ /S)	Qmax (m ³ /s)		
		ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
2	169.7	2700.2	2620.2	2972.3
5	315.6	2814.4	2699.3	3077.9
10	403.1	2897.8	2752.5	3161.3
25	505.3	2965.6	2827.0	3222.5
50	577.2	3041.1	2884.2	3298.2
100	645.8	3115.6	2941.0	3373.5
200	712.3	3194.3	3003.0	3448.6

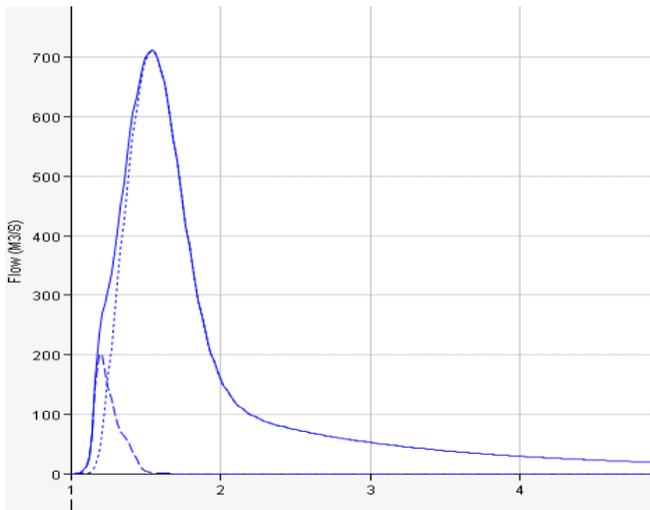


Figura 19. Hidrograma de salida de la cuenca del Río Coro para 200 años de período, sin considerar rotura de la presa "El Isiro".

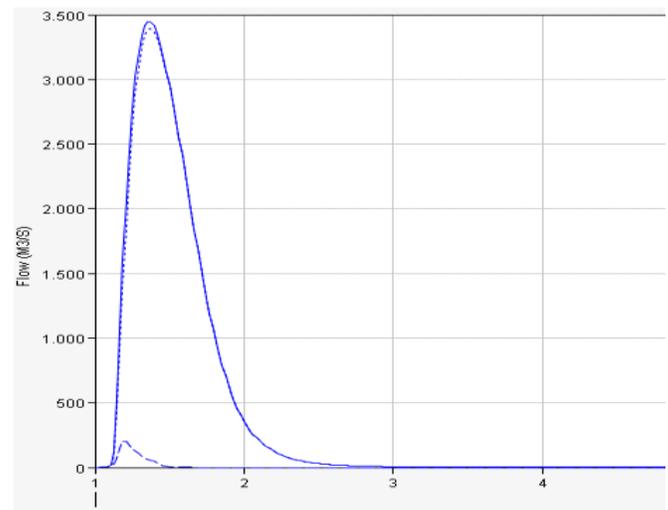


Figura 20. Hidrograma de salida de la cuenca del Río Coro para 200 años de período, considerando rotura de la presa "El Isiro" (escenario 3).

Tabla 3. Volúmenes de escorrentía generados a la salida de la cuenca del río Coro, incluyendo los escenarios de la rotura de la presa

Tr (años)	Volumen escurrido (1000m ³)	Volumen escurrido (1000 m ³)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
2	4231.8	112349.0	112349.5	109094.4
5	7725.9	115844.9	115838.4	112579.6
10	10338.5	118453.7	118450.3	115192.5
25	13795.1	121913.6	121913.2	118642.2
50	16482.0	124593.7	124600.2	121337.0
100	19233.1	127354.6	127356.0	124091.9
200	22060.4	130177.6	130177.0	126931.9

Como se puede evidenciar, el caudal máximo del hidrograma en la salida de la cuenca, cuando no se rompe el embalse, se da a las 13 horas, mientras que cuando ocurre la rotura de la presa este se da a las 8.5 horas; se evidencia como era lógico de esperarse que el tiempo de ocurrencia de los caudales máximos se reduce cuando se considera la rotura; en este caso concreto, dicha reducción estuvo por el orden de las 4.5 horas. Finalmente, en cuanto a los volúmenes de escorrentía que se generan para uno u otro caso, se presenta la tabla 3.

Como se puede apreciar, al considerar el escenario más desfavorable los volúmenes escurridos a la salida de la cuenca del Río Coro en su planicie de inundación se incrementan entre 6 y 27 veces, evidenciándose claramente el gran efecto que tiene el colapso del embalse "El Isiro" en lo que respecta a esta variable.

CONCLUSIONES

- Este trabajo permitió actualizar y complementar el estudio hidrológico de la cuenca del Río Coro, e inclusive abordó aspectos relativos al colapso de la infraestructura hidráulica de envergadura en dicha cuenca, en este caso el embalse "El Isiro", el cual sirve como fuente de abastecimiento de la ciudad de Coro, capital del Estado Falcón, de la República Bolivariana de Venezuela. Este último aspecto, representa una contribución de gran valía para el análisis del riesgo de inundación en los urbanismos que están asentados en la planicie del Río Coro aguas abajo del embalse, así como lo que el propio colapso representa para el servicio de agua potable a los pobladores de Coro.

- Es evidente que los estudios hidrológicos anteriores a este, habían subestimado la respuesta hidrológica de la cuenca hasta en un 35% aproximadamente, además de no considerar la posibilidad de colapso del embalse, el cual es un aspecto indispensable en el análisis de riesgo de inundación aguas abajo de éste.

- De acuerdo con los resultados obtenidos en los diversos escenarios planteados que consideran la rotura de la presa "El Isiro", se constata que los caudales máximos y volúmenes de escorrentía que se esperan en la planicie del río, aumentan súbitamente. Además también se detectó que el tiempo en que se producen los caudales máximos se acorta de forma notable cuando se considera el colapso en cuestión.

- Este trabajo representa un insumo muy valioso para los gestores del riesgo de inundación en la planicie del río

Coro, y el mismo representa otro aporte más del Centro de Investigación en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Experimental "Francisco de Miranda" para la comunidad científica regional y nacional.

- En la actualidad, los autores están trabajando en el proceso de calibración del modelo hidrológico utilizado, el cual permitirá optimizar la estimación de los parámetros hidrológicos de la cuenca. Simultáneamente, se está ampliando el estudio para periodos de retorno de 500, 1000 y 10000 años. De igual forma, se está profundizando un poco más en las metodologías para realizar la distribución espacial y temporal de la lluvia y su respectiva regionalización.

REFERENCIAS

- Arcila, G. y Guanipa, M.** (2004). "Base de Datos Geográfica de la Hoya de Curimagua como Herramienta Básica para la Planificación de los Recursos Hídricos en la Región Centro-Norte del Estado Falcón". Tesis de Pregrado. Universidad Nacional Experimental "Francisco de Miranda", Coro, Venezuela.
- Bastos, Y. y Galicia, L.** (2007). "Evaluación hidráulica del aliviadero del embalse "El Isiro", Estado Falcón". Tesis de Pregrado. Universidad Nacional Experimental "Francisco de Miranda", Coro, Venezuela.
- González, M y Ortega, A.** (2004). "Estudio de factibilidad Técnica para Implementar Medidas Estructurales de Control y Aprovechamiento de las Crecientes del Río Coro, en su Cuenca Media y Alta". Tesis de Pregrado. Universidad Nacional Experimental "Francisco de Miranda", Coro, Venezuela.
- Linárez, I.** (2010). "Análisis de la Respuesta Hidrológica de la Cuenca del Río Coro apoyados en el uso de Sistemas de Información Geográfica". Tesis de Especialización en desarrollo. Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado", Barquisimeto, Venezuela.
- Perozo, M.** (2010). "Sistema integral de medidas para reducir el riesgo de inundación en la llanura del río Coro". Tesis doctoral en desarrollo. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Habana.
- Perozo, M.** (2010). "Estimación de la Amenaza de Inundación en la Llanura del Río Coro". Tesis de Especialización en desarrollo. Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado", Barquisimeto, Venezuela.
- Rivas, R. y Berezowsky, M.** (2000). "Brechas en Bordos de Arcilla Formadas por Desbordamiento". Revista Ingeniería del Agua. Coyacán, DF, México.

Recibido: enero del 2011
Aprobado: febrero del 2011