

# Propuesta de un nuevo enfoque para evaluar la peligrosidad por inundaciones pluviales

• Luis Alejandro Sánchez\* •

*Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Venezuela*

\*Autor de correspondencia

• Yoel Martínez-González •

*Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba*

## Resumen

Sánchez, L. A., & Martínez-González, Y. (noviembre-diciembre, 2014). Propuesta de un nuevo enfoque para evaluar la peligrosidad por inundaciones pluviales. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 53-67.

Los criterios de riesgo por inundaciones pluviales, que consideran la acción conjunta de calados y velocidades, en su mayoría han sido desarrollados para cuencas rurales y son aplicados en casos de inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos. Sin embargo, con la aparición de los SIG y su potencialidad para la representación espacial, se han desarrollado diversas técnicas para el microanálisis de riesgo en cuencas urbanas basadas en análisis multicriterio y en la ponderación de factores combinatorios de distinta naturaleza. Este artículo busca realizar aportes al método de Zonensein, Miguez, De Magalhães, & Valentin, 2008, para calcular la peligrosidad o amenaza en zonas urbanas, específicamente en la escala de normalización del subíndice ( $I_{cot}$ ) o indicador de propiedades de inundación, que aun siendo viable en el medio urbano no considera la afectación que generan láminas de agua inferiores a la altura promedio de aceras o bordillo sobre el tránsito de vehículos y transeúntes. Se construyó el mapa de peligrosidad tomando como caso de estudio una subcuenca urbana ubicada en la zona centro norte de la ciudad de Coro, Venezuela. Se demostró que el método propuesto arroja resultados más apegados a la realidad que el método de ponderación mixta tradicional, cuando se analizan calles con profundidades de agua inferiores al nivel promedio de acera. Por otro lado, este nuevo enfoque presenta mejores correlaciones en el ajuste de las funciones de normalización respecto al enfoque tradicional.

**Palabras clave:** SIG, inundaciones urbanas, análisis multicriterio.

## Introducción

Las metodologías y los criterios utilizados para cuantificar la peligrosidad asociada con el flujo en calles es un tema en el cual no existe

## Abstract

Sánchez, L. A., & Martínez-González, Y. (November-December, 2014). Proposal for a New Approach to Assessing Urban Flood Hazard. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(6), 53-67.

Flood hazard criteria in urban areas that consider combined action depth and velocity, have been developed for rural basins and are applied in Fluvial Flooding. However, with the advent of GIS tools and the modules for spatial analysis, various techniques have been developed for micro-analysis of Flood risk in watershed based on multi-criteria decision analysis and combinatorial weighting factors. The aim of this paper is make contributions to the method of (Zonensein, Miguez, De Magalhães, & Valentin, 2008) to estimate multi-criteria index, named Flood Hazard Index representative of the flood properties, for a rainfall with a certain return period and critical duration, specifically in normalized scale of ( $I_{cot}$ ) sub-index, which still remain viable in urban areas, but does not consider the negative effects that generate depths below of curb on pedestrians and vehicles. Hazard maps were developed in a case study, then EPA\_SWMM Model was applied to simulate a 1 hour and 28.8 mm depth rainfall event. Finally, new criterion was proposed for standardization of this indicator by changing the normalized scale, from a qualitative sensitivity analysis and comparing hazard maps and based both criteria.

**Keywords:** GIS, urban floods.

---

Recibido: 21/11/11

Aceptado: 15/05/14

---

consenso, por esta razón es común encontrarse investigaciones donde se construyen mapas de peligrosidad y riesgo pluvial aplicando los mismos criterios que se utilizan en la gestión de inundaciones ocurridas en ambientes rurales.

A diferencia de la gestión de inundaciones de origen fluvial (por desbordamiento de ríos), la gestión del drenaje pluvial urbano requiere del conocimiento exhaustivo de evolución de caudales y profundidades de flujo en las calles y avenidas de la zona urbana (Hauger, 2006). La revisión de conceptos realizada para este trabajo se basa en gran parte en los documentos producidos por el proyecto Floodsite (Samuels, 2006). El objetivo principal de este trabajo es aplicar una metodología para estimar la peligrosidad pluvial a través de un índice cuantitativo distribuido espacialmente y calculado a partir de análisis multicriterio y de la ponderación de diversos factores que permitan una evaluación objetiva de la cuenca urbana mediante la comparación entre áreas críticas y la valoración de escenarios sobre la misma región. Para el estudio de caso se seleccionó una subcuenca ubicada en la zona centro norte de la ciudad de Coro, capital del estado Falcón, Venezuela, y se implementó un modelo de simulación integrado previamente calibrado, a fin de obtener las profundidades y velocidades máximas de inundación de la red de calles, para contrastar las funciones propuesta por Zonensein, Miguez, De Magalhães, & Valentin (2008) con las del autor.

## Materiales y métodos

Se levantó información de campo durante eventos de lluvia ocurridos en la zona, patrones de flujo superficial en calles y zonas críticas, a fin de validar la información obtenida en la simulación y además certificar los criterios de normalización para cada indicador.

### *Formulación del indicador de peligrosidad asociada con el flujo en calles*

Se recomienda que la formulación no resulte altamente compleja desde el punto de vista matemático, ya que debe permitir su uso sin restricciones por técnicos no expertos. De forma preliminar se realizó una revisión exhaustiva de los criterios reportados en la literatura especializada sobre el tema y, en función de

esto, se optó por implementar un método basado en la ponderación mixta (ecuación (1)) y fundamentada en las técnicas de análisis multicriterio propuestas por Zonensein *et al.* (2008):

$$PI = \sum_{i=1}^n I_i P_i \quad (1)$$

Donde  $I_i$  representa el indicador previamente normalizado, que compone el subíndice  $PI$ , y varía en un rango de 0 como extremo mínimo y 100 como extremo máximo. En este caso se consideraron tres subíndices:  $I_{cot}$  (subíndice de profundidad de inundación),  $I_{FV}$  (factor de velocidad) e  $I_{FP}$  (factor de permanencia);  $n$  es el número total de indicadores que componen el índice  $PI$ ; y  $P_i$  es el peso asociado con el subíndice  $PI$ , atribuido en función de la importancia relativa, y debe atender las siguientes restricciones:  $\sum_{i=1}^n P_i = 1$

Atendiendo a razones prácticas, se variaron algunas de las nomenclaturas utilizadas por (Zonensein *et al.*, 2008). Sin embargo, el aporte significativo del presente artículo radica en los criterios de normalización para cuantificar el subíndice de profundidad, ya que el enfoque expuesto por el mencionado autor calcula la peligrosidad en la cuenca urbana, asumiendo un nivel fijo promedio para alturas de acera o bordillos, lo cual dista mucho de la realidad y además para láminas menores de 10 cm en un tramo de calle, asume que el efecto sobre el tránsito de vehículos y personas es nulo, lo cual no es totalmente cierto, entre otras razones porque para una velocidad directriz de un vehículo cercana a los 70 km/h y con alturas de lámina de agua de unos 5 mm, se puede presentar el fenómeno de Hidroplaning (FHWA, 2009). Además, se busca optimizar los ajustes planteados por (Zonensein *et al.*, 2008) sobre las curvas de normalización para el cálculo del factor adimensional de permanencia ( $I_{FP}$ ).

El método propuesto para la distribución de los pesos de cada subíndice fue el proceso

de análisis jerárquico (AHP) (Saaty, 1977), basado en el contexto del análisis multicriterio. El uso de este método permitió no sólo la determinación de los pesos para cada uno de los indicadores sino también realizar la prueba de consistencia, que mide la coherencia lógica en el juicio y que a su vez reduce altamente el grado de objetividad propio de este tipo de procesos. La peligrosidad pluvial depende de tres factores: la profundidad del flujo o lámina de agua en la calle, la velocidad y la duración de la inundación por encima de cierto calado. Esta hipótesis fue probada analizando tres escenarios y asignándole pesos diferentes a los indicadores correspondientes. La ecuación (2), formulada por Zonensein *et al.* (2008) para el cálculo de la peligrosidad es la siguiente:

$$PI = I_{Cot} \cdot P_{Cot} + I_{FV} \cdot P_{FV} + I_{FP} \cdot P_{FP} \quad (2)$$

#### Estimación del indicador de profundidad ( $I_{cot}$ )

El criterio más utilizado para definir si en una determinada calle existe peligrosidad asociada con el flujo de aguas pluviales para una probabilidad de ocurrencia dada es el siguiente: tirantes en calles < altura de la acera (Dawson, Speight, Hall, Djordjevic, & Savic, 2008). La normalización de este indicador expresada en la ecuación (3) se fundamenta en criterio de expertos y observaciones de campo, simplificada por franjas sobre la base de un análisis detallado de daños posibles (absoluta y relativa) solamente en el intervalo  $y < 1$  m:

$$I_{cot}(y) = \begin{cases} 0 & \text{si } y \leq 10 \text{ cm} \\ 2.5y - 25 & \text{si } 10 < y \leq 50 \text{ cm} \\ 100 & \text{si } y > 50 \text{ cm} \end{cases} \quad (3)$$

El límite superior de la primera función está definida por la altura de la acera, luego la siguiente función cubre la franja que va desde 10 hasta 50 cm; en este nivel, ya la inundación en la calle es total, y el flujo es capaz de afectar patios de fachada y estacionamientos; además, en este nivel se comienza a interrumpir el tráfico regular de vehículos y sobre todo de personas. Se asume que de allí en adelante

cualquier lámina de agua superior a 50 cm invade completamente las viviendas y edificaciones con los respectivos daños que esto conlleva. En definitiva, se calculó este indicador comparando la función mostrada en la ecuación (3) con la curva normalizada propuesta por Zonensein *et al.* (2008).

#### Estimación del indicador de velocidad o número del producto ( $I_{FV}$ )

Los criterios de peligrosidad basados en la consideración conjunta de calados están ampliamente reportados en FEMA (1979) y Gómez *et al.* (2009). Desde el punto de vista experimental destacan los estudios experimentales publicados por ARMC (2000), Belleudy (2004) y el de Russo, Gómez y Macchione (2011). Sin embargo, el primero que utilizó el término “número del producto” fue Abt (1989), para incluir el efecto combinado de las fuerzas hidrodinámicas ejercidas por el vector velocidad y la profundidad  $V \cdot Y$  sobre la estabilidad en los individuos. Con base en estos estudios y la normalización de este indicador propuesta por Zonensein *et al.* (2008) se elaboró la función de normalización (ecuación (4)) por franjas con interpolación lineal para este indicador:

$$I_{FV}(y) = \begin{cases} 0 & \text{si } vy \leq 0.10 \text{ m}^2/\text{s} \\ 266.67vy - 26.67 & \text{si } 0.10 \text{ m}^2/\text{s} < vy \leq 0.25 \text{ m}^2/\text{s} \\ 44.4vy + 28.29 & \text{si } 0.25 \text{ m}^2/\text{s} < vy \leq 0.70 \text{ m}^2/\text{s} \\ 25vy + 42.5 & \text{si } 0.70 \text{ m}^2/\text{s} < vy \leq 1.50 \text{ m}^2/\text{s} \\ 15vy + 57.5 & \text{si } 1.50 \text{ m}^2/\text{s} < vy \leq 2.50 \text{ m}^2/\text{s} \\ 1.1vy + 92.2 & \text{si } 2.50 \text{ m}^2/\text{s} < vy \leq 7 \text{ m}^2/\text{s} \\ 100 & \text{si } vy < 7 \text{ m}^2/\text{s} \end{cases} \quad (4)$$

#### Estimación del indicador de duración de inundación ( $I_{FP}$ )

Considera los minutos/horas/días que una calle permanece inundada al menos ciertos cm de profundidad, considerando tres elementos en riesgo: los peatones, que son los primeros en verse afectados, ya que las zonas inundadas con pequeñas láminas de agua son suficientes

para dificultar o impedir su tránsito regular por las aceras; en segundo lugar, los vehículos, que al circular por zonas de encharcamiento causan trancas en el tráfico e incrementan el peligro de que se presente el fenómeno de “aquaplaning”, y por último, las viviendas o edificaciones expuestas frontalmente a la calle. Para obtener el valor de este indicador se definen los tiempos indicativos de efectos potenciales sobre peatones ( $t_{10}$ ), el tráfico ( $t_{30}$ ) y las viviendas ( $t_{50}$ ). Éstos se refieren al tiempo durante el cual un área permanece inundada con lámina mayor de 10, 30 y 50 cm, respectivamente. La normalización formulada por Zonensein *et al.* (2008), en este caso fue por franjas de tipo logarítmicas (figura 1); sin embargo, el autor considera que para este tipo de ajustes, la correlación entre los datos puede mejorarse empleando otro modelo matemático. En tal sentido, se probaron distintos modelos orientados a perfeccionar los niveles de confiabilidad, el coeficiente de correlación y reducir el error cuadrático medio.

Los parámetros de la ecuación (5) sugeridos por Zonensein *et al.* (2008) para cada función ajustada se muestran en la figura 1:

$$I_{FP} = \alpha_1(a_1 \ln(t_{10}) - b_1) + \alpha_2(a_2 \ln(t_{30}) - b_2) + \alpha_3(a_3 \ln(t_{50}) - b_3) \quad (5)$$

*Caso de aplicación en una subcuenca urbana de la ciudad de Coro*

La región seleccionada para este estudio fue la ciudad de Coro, capital del estado Falcón, ubicada en la costa norte de Venezuela. El sistema de drenaje de la ciudad está constituido por 30 canales tanto artificiales como naturales, y más de 5 kilómetros de colectores enterrados que atraviesan la ciudad en varias direcciones y que conducen las aguas pluviales a los sitios de vertido final. La topografía urbana de la ciudad hace que aproximadamente el 70% de la escorrentía de origen pluvial drene a través de calles y colectores enterrados hacia el noreste y el resto fluya en dirección oeste, en donde predominan los canales artificiales y naturales. La cuenca seleccionada pertenece al sistema centro norte de la ciudad, tiene un área de aporte aproximada de 108.99 hectáreas y está delimitada por la Avenida Tirso Salavarría,

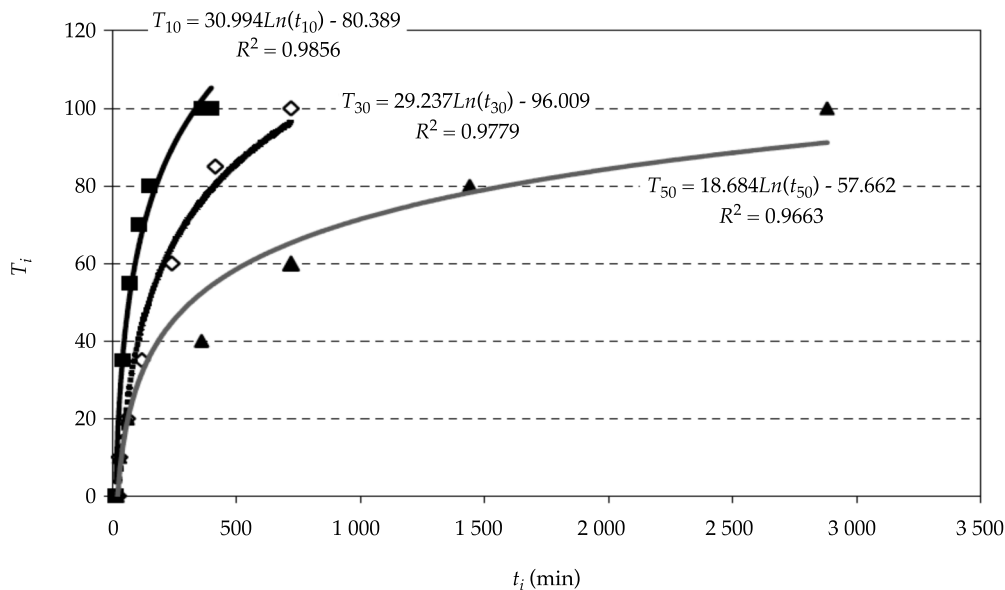


Figura 1. Función de normalización para  $T_{10}$ ,  $T_{30}$  y  $T_{50}$  (Zonensein *et al.*, 2008).

Calle Garcés-Avenida Independencia y el sector Los Orumos.

Se construyó el modelo digital de elevaciones MDE de la subcuenca seleccionada, (Sánchez & Méndez, 2009). Se confeccionó el modelo

conceptual del sistema real y se discretizó la cuenca en un total de 122 subcuenas (figura 2), con fracciones impermeables que varían entre 40 y 65%, y valores del parámetro hidrológico Curva Número (SCS) (CN), variando entre 75 y

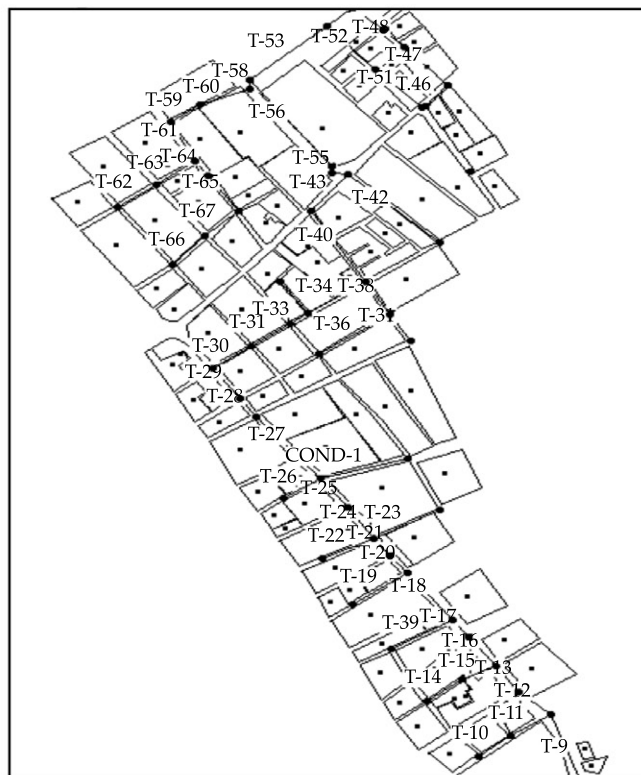


Figura 2. Conceptualización de la subcuenca centro norte de la ciudad de Coro, Venezuela.



85. Para obtener la distribución espacial de la peligrosidad en calles, se elaboraron los mapas temáticos respectivos para cada indicador. Para este nivel de análisis y en correspondencia con la escala espacial de decisión adoptada, se estimaron valores medios en los polígonos que representan cada calle o tramo de calle; por lo tanto, al definir el dominio del índice por calles, se trata de un proceso agregado, ya que la simulación hidráulica se basa en el análisis de tramos rectos de calles funcionamiento hidráulicamente como canales. Para obtener los calados o láminas en calles se calibró el modelo EPA-SWMM y se simuló la respuesta del sistema de drenaje ante una tormenta de duración e intensidad similar a la del evento utilizado para calibrar.

*Calibración del modelo y simulación del evento ocurrido 01-02-2009 en la cuenca centro-norte de Coro*

Previo al análisis de peligrosidad, se implementó y calibró el modelo SWMM, a partir del hietograma de tormenta para un evento en específico registrado el 01-02-2009 y del hidrograma de salida conocido en el nodo de

descarga del sistema. Esta cuenca se caracteriza por tener una topografía plana, con pendientes del orden del dos por mil, con un área de aporte cerrada que facilita la correcta cuantificación del escurrimiento urbano. El nodo de vertido se localiza en la Avenida Alí Primera, en específico detrás del Estadio Municipal J. M Ugarte, a las cercanías del Instituto Universitario de Tecnología Alonso Gamero (IUTAG). Con el levantamiento topográfico se constató que el sitio de descarga posee la cota altitud más baja de toda la cuenca seleccionada, esto hace suponer que toda la escorrentía que circula por calles tiene posibilidad de ingresar al colector a través de las obras de captación (sumideros). Por otro lado, la cantidad de agua que queda almacenada o retenida en calles, avenidas, y depresiones naturales o artificiales, sumada a la porción de agua que infiltra en las pocas áreas permeables, representa volúmenes importantes que no llegan a ingresar al sistema de manera superficial.

El caudal máximo observado en el nodo de descarga fue de 552 lps, con un tiempo al pico aproximado  $T_p = 1$  hora y 15 minutos. Los datos de lluvia fueron registrados por la estación pluviométrica Coro-Aeropuerto y se muestran en la figura 3.

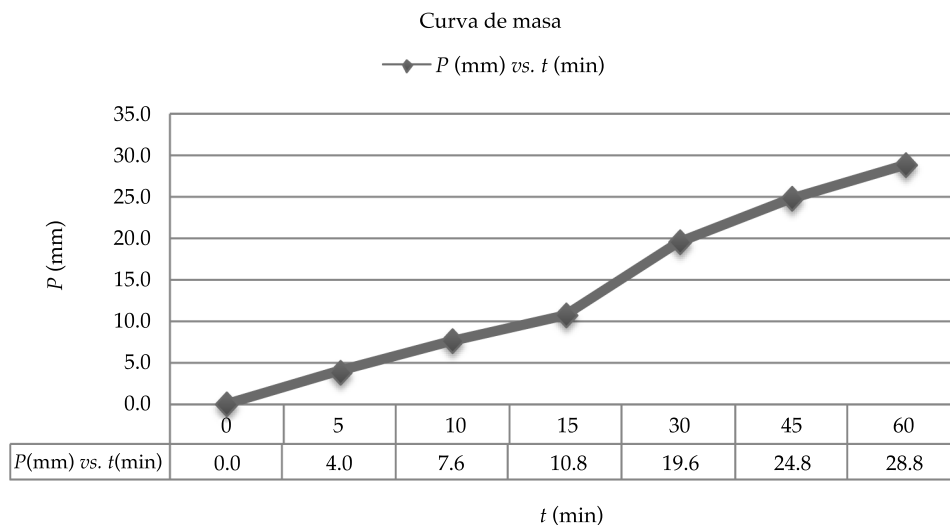


Figura 3. Curva de masa. Tormenta registrada en la estación Coro-Aeropuerto de fecha 01-02-09.

*Definición de la estrategia de calibración*

La cuenca se desagregó para una escala computacional de detalle conformada por 122 subcuencas; sin embargo, para realizar la prueba de sensibilidad y obtener una combinación de valores promedio para los parámetros, se construyó un modelo conceptual simplificado o idealizado, representado por subcuencas o segmentos dispuestos como dos planos asimétricos que aportan de manera concentrada un canal de drenaje. Para ello, se implementó un esquema de solución apoyado en las ecuaciones que rigen el módulo de cálculo hidrológico Runoff del SWMM para

flujo uniforme. Considerando que el SWMM no cuenta con un algoritmo para la calibración automática, se optó por diseñar una estrategia con base en seis etapas principales, combinando la respuesta hidrológica de los dos modelos conceptuales (figura 4).

La primera consiste en ingresar los datos de entrada al modelo conceptual idealizado (condiciones de frontera, parámetros, geometría y estructura del sistema). Luego, se procede a efectuar el análisis de sensibilidad para seleccionar los parámetros a ser calibrados; en este tipo de estrategia pueden identificarse y escogerse parámetros de naturaleza hidrológica o hidráulica, según la respuesta del modelo.

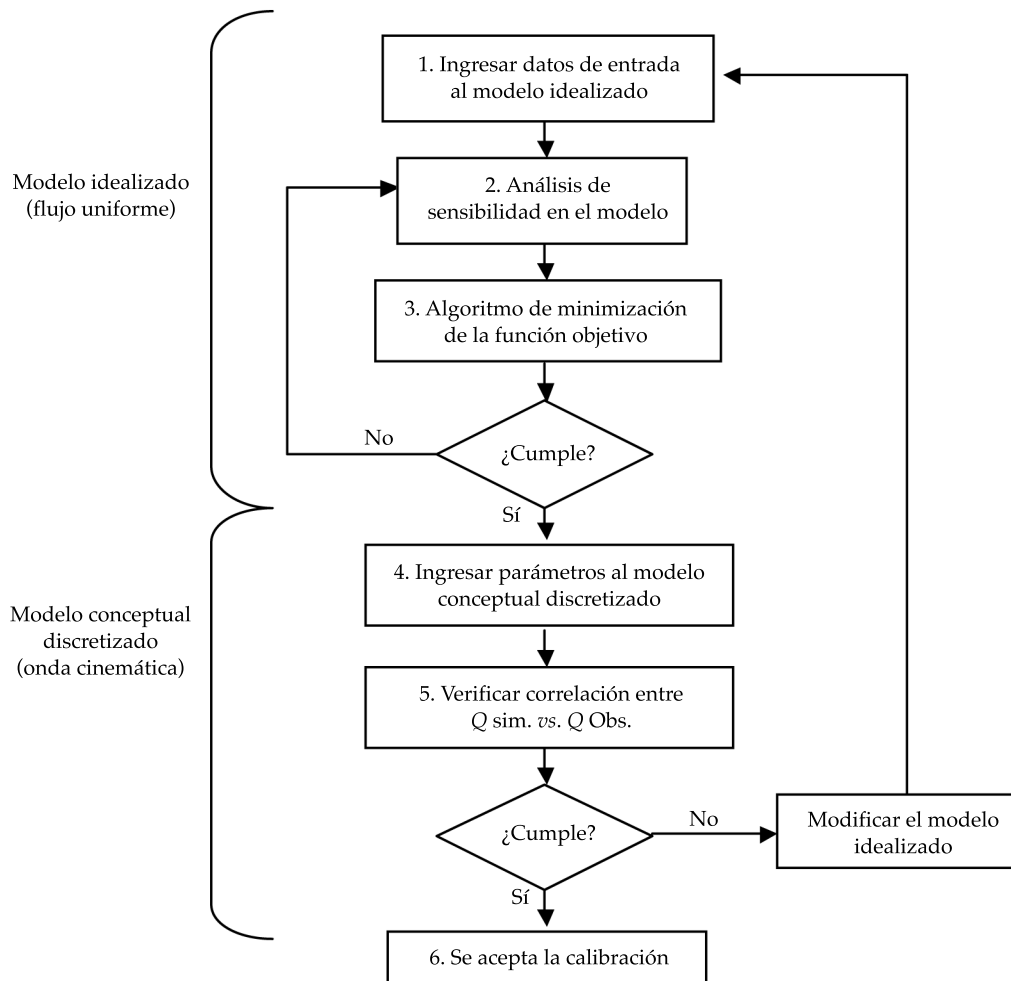


Figura 4. Estrategia para la calibración.

Conviene resaltar que los parámetros que se introducen en el modelo pueden servir para ajustar la respuesta del mismo, por ejemplo el ancho  $W$  corresponde a la anchura del depósito que está representando a una determinada subcuenca y que debe estimarse a partir de la forma geométrica real de la misma, que no será ni uniforme ni simétrica. Asumiendo una cuenca rectangular y para una misma superficie, un mayor ancho producirá hidrogramas de salida de la subcuenca de menor duración y mayor gasto máximo, mientras que un ancho menor retrasará la punta del hidrograma, produciendo un efecto de laminación. Sin embargo, si se conocen realmente los valores de estos parámetros geométricos y se asume que dependen exclusivamente de la representación que se haga del sistema físico real, conviene usar otras variables para el ajuste, como por ejemplo el coeficiente de rugosidad de Manning o los parámetros que influyen en las pérdidas por infiltración.

En este caso, se calibró la rugosidad para las áreas permeables e impermeables de la cuenca, y el parámetro curva número ( $CN$ ). Con los parámetros seleccionados, se busca una función objetivo orientada a reducir la discrepancia entre los gastos modelados y medidos, para finalmente implementar algún algoritmo de calibración que minimice la diferencia entre éstos. Los valores obtenidos en el análisis sobre el modelo simplificado son introducidos en el modelo conceptual discretizado (sistema real) y se ejecuta la simulación del evento para verificar la calidad de la calibración con base en el nivel de correlación entre los valores simulados y observados.

La función objetivo (ecuación (6)) seleccionada le indica al algoritmo de optimización qué tan cerca está de llegar a los parámetros

óptimos; en este caso se utilizó el criterio de los mínimos cuadrados como función objetivo y un proceso iterativo basado en ensayo y error, o aproximaciones sucesivas para su minimización:

$$\min F(n) = \sum_{i=1}^m (Q_s^i - Q_o^i)^2 \quad (6)$$

### Escenarios analizados para el cálculo de la peligrosidad

Para una profundidad de lluvia de 28.8 mm y una duración de 60 min, se analizaron tres grupos de pesos representando diferentes criterios sobre la importancia relativa de los indicadores de peligrosidad. Aplicando el método de análisis jerárquico (AHE) se establecieron estos tres grupos. En el primer escenario se asume que  $I_{cot}$  es extremadamente más importante que  $I_{FP}$  pero un poco menos importante que  $I_{FV}$ , que a su vez se considera más importante que  $I_{FP}$ . Para el segundo escenario, se acepta que  $I_{cot}$  es un poco más importante que  $I_{FP}$  y un poco menos importante que  $I_{FV}$ , que a su vez se considera más importante que  $I_{FP}$ . Finalmente, para el tercer escenario se adjudica igual importancia a los tres indicadores. El cuadro 1 explica con detalle cada uno de estos escenarios.

### Análisis y discusión de resultados

El parámetro  $CN$  incluido en el modelo de pérdidas fue calibrado a partir de la lámina de escorrentía directa  $LED = 3.362$  mm, obtenida con el volumen total observado  $Vol = 3\ 662.46$  m<sup>3</sup> durante el evento, dando como valor promedio para toda la cuenca un valor de  $CN = 88.1$ . La prueba de sensibilidad sobre el modelo

Cuadro 1. Escenarios analizados para la construcción de los mapas de peligrosidad.

| Valor del índice/pesos de los coeficientes |          |          |             |          |          |             |          |          |
|--|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| Escenario 1                                |          |          | Escenario 2 |          |          | Escenario 3 |          |          |
| $I_{cot}$                                  | $I_{FV}$ | $I_{FP}$ | $I_{cot}$   | $I_{FV}$ | $I_{FP}$ | $I_{cot}$   | $I_{FV}$ | $I_{FP}$ |
| 0.69                                       | 0.23     | 0.08     | 0.26        | 0.63     | 0.11     | 0.33        | 0.33     | 0.33     |



idealizado para “ $n$  permeable e impermeable” y la evaluación de la función objetivo en las gráficas correspondientes (figura 5).

En la gráfica (a) se observa claramente el solapamiento de las funciones para valores de  $n$  permeable en el intervalo (0.3 - 0.6), presentando un mínimo global para una abscisa de 0.02. Igualmente, se aprecia en la gráfica (b) que la función se asintotiza a partir de valores de rugosidad en la zona permeable  $n_{perm} = 0.3$ . En seguida se muestra la comparación entre hidrogramas simulados y observados para el modelo idealizado, asignando los parámetros óptimos para los cuales se hace mínima la función objetivo.

Esta prueba preliminar sirve como punto de partida para el ajuste del modelo conceptual discretizado, en el cual de ser necesario y en función de la correlación se debe ir ajustando

hasta alcanzar un ajuste aceptable. Los resultados de la simulación luego de asignar estos parámetros como valores medios en las subcuencas se muestran en la figura 6.

Al comparar las series de gastos en la salida del modelo se puede observar para la primera corrida un acercamiento evidente entre las dos funciones y un patrón análogo tanto en la rama ascendente del hidrograma como en la parte descendente, lo cual demuestra que el análisis de sensibilidad realizado en el modelo preliminar idealizado constituye una técnica viable para seleccionar el primer juego de parámetros. Para esta corrida, el coeficiente de correlación fue de 0.961.

Por otra parte, al analizar diversos modelos y de realizar el tratamiento estadístico de los datos, se aplicó una estrategia orientada a homologar el criterio de ajuste para las tres

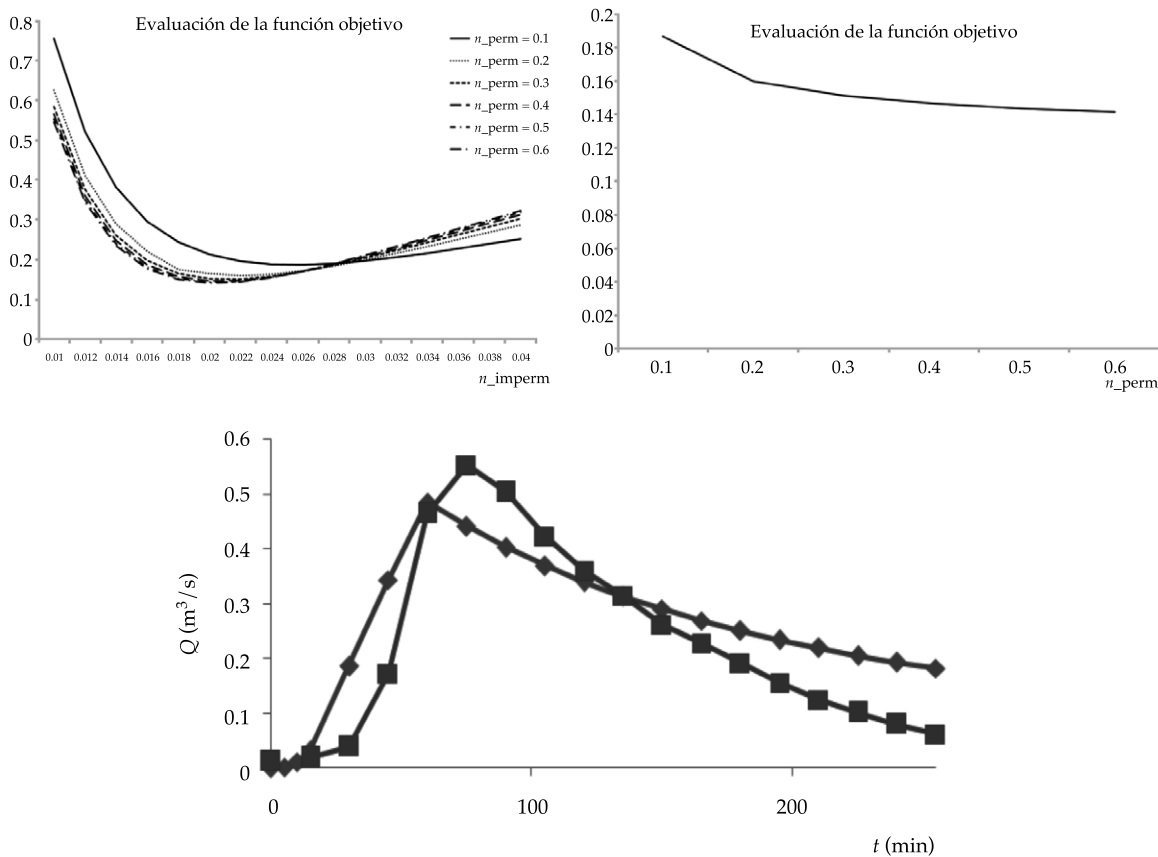


Figura 5. Análisis de sensibilidad y evaluación de la función objetivo.

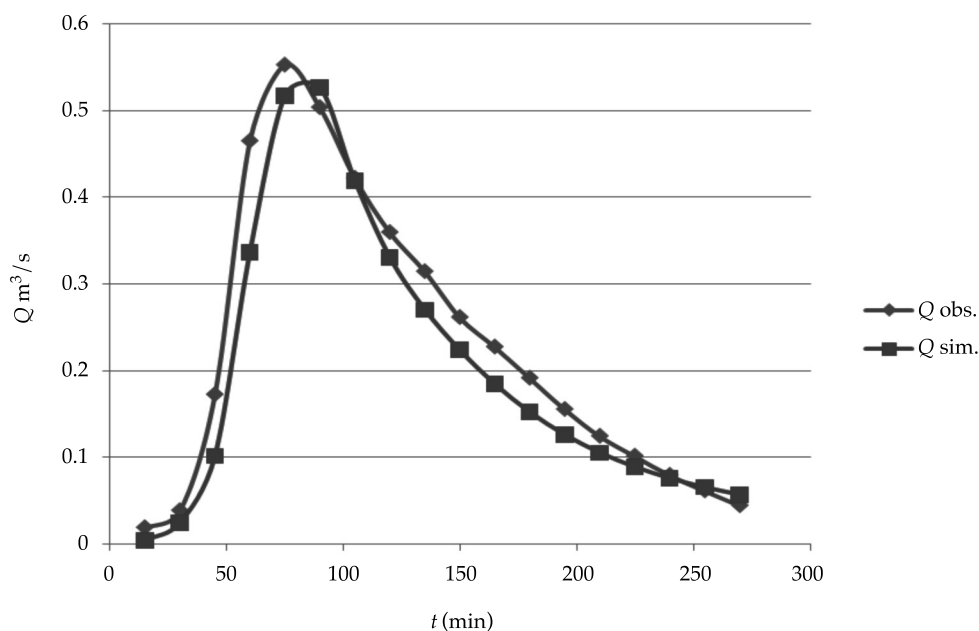


Figura 6. Resultado de la calibración en el modelo discretizado.

funciones bajo el mismo modelo matemático. Si se le asigna como variable dependiente normalizada  $T'$  a la nueva función expresada en la ecuación (7), la estructura de la ecuación con los parámetros (a, b, c, d, e, f) y sus respectivas curvas modificadas se resumen en la figura 7:

$$T'_i = a + b \ln(t_i) + c(\ln(t_i))^2 + d(\ln(t_i))^3 + e(\ln(t_i))^4 + f(\ln(t_i))^5 \quad (7)$$

La comparación entre los coeficientes de correlación (cuadro 2) es útil para evaluar la bondad del modelo de regresión obtenido por Zonensein *et al.* (2008) y los alcanzados por el autor para un 95% de confiabilidad, lo cual garantiza ajustes más útiles para la predicción de la variable dependiente en el dominio establecido.

Los resultados del modelo proporcionan información sobre la evolución temporal de profundidad de inundación y velocidad media en cada calle durante el periodo de simulación. Los mapas de la figura 8 muestran

las inundaciones localizadas en los puntos más críticos del periodo, considerando un tratamiento hidráulico para las calles de mayor importancia, en función del volumen vehicular y un tratamiento hidrológico para el resto de las calles. Se evidencia que la zona donde se presentan láminas de agua superiores a 15 cm es hacia el noreste de la cuenca (calle 40 y 56), alcanzando una profundidad máxima de 0.19 m. Se observan tramos con tirantes que no superan el nivel de acera en la mayoría de los tramos de calle analizadas, presentando velocidades bajas propias de zonas planas que van desde un mínimo de 0.10 m/s hasta 1 m/s (calle 54), con promedio total de la cuenca de 0.35 m/s. En la figura 9 se observan notables variaciones entre los dos casos analizados, al incluir dentro de las escalas de normalización el impacto de los tirantes que están en 15 y 30 cm (calles 40, 43, 56); queda en evidencia que los criterios de Zonensein *et al.* (2008) subestiman el efecto de láminas inferiores al nivel promedio de acera. Los resultados del indicador de permanencia de inundación, así como los del indicador de velocidad se

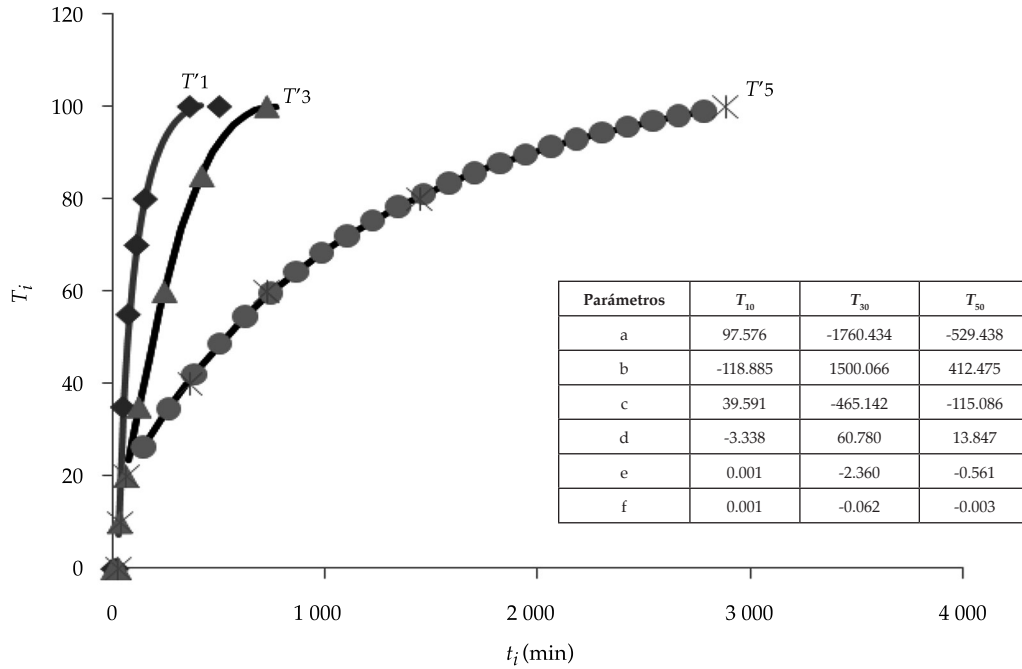


Figura 7. Funciones de normalización mejoradas.

Cuadro 2. Comparación de los ajustes obtenidos para las funciones normalizadas.

|          | Zonensein <i>et al.</i> (2008)<br>$R^2$ | Sánchez & Martínez-González 2011)<br>$R^2$ |
|----------|---|--|
| $T_{10}$ | 0.9856                                  | 0.9995                                     |
| $T_{30}$ | 0.9779                                  | 0.9993                                     |
| $T_{50}$ | 0.9663                                  | 0.9996                                     |

muestran en la figura 10, y su comportamiento espacial, aunque coincide con lo esperado, sobre todo en las zonas de baja pendiente y en las zonas de encharcamiento, no representa un problema relevante en los tramos de calle estudiados, ya que su magnitud no supera en ningún caso el valor de 0.5 para el evento de lluvia analizado. Se observa además que los pesos atribuidos según Zonensein *et al.* (2008) a los factores de ponderación en la formulación del indicador  $I_{FP}$  están enfocados sólo al daño sobre viviendas, subestimando el impacto que tiene sobre el tránsito de vehículos y personas.

Finalmente, los mapas de peligrosidad (figura 11), correspondientes a los escenarios 2 y 3, no muestran diferencias importantes; no obstante, el escenario 1 sí arrojó resultados contrapuestos, evidenciando la sensibilidad del índice a la asignación de los pesos. Por otro lado, se observa que para los tres escenarios existe coincidencia en la identificación de zonas con mayor peligrosidad, lo que permite a las autoridades municipales decidir cuáles son las vías durante eventos de lluvia con probabilidad de ocurrencia igual o superior a la evaluada.



Figura 8. Mapa de niveles y velocidades medias máximas en calles para el modelo conceptual de la cuenca experimental.



Figura 9. Comparación del indicador de profundidad. Criterio de Sánchez (izq.) y criterio de Zonensein (der.).



Figura 10. Distribución espacial del factor de velocidad  $I_{FP}$  y el factor de permanencia de la inundación  $I_{FV}$ .



Figura 11. Resultados para los tres escenarios analizados.



## Conclusiones

La metodología aplicada permitió conocer en la zona estudiada la distribución espacial del indicador de peligrosidad pluvial asociada con el flujo superficial en calles mediante una gama de colores, lo que constituye una herramienta valiosa para respaldar la toma de decisiones por parte de los gestores del sistema de drenaje pluvial urbano. El análisis realizado sobre el modelo conceptual de la subcuenca urbana evidenció la sensibilidad del parámetro de profundidad ( $I_{cot}$ ) en relación con la escala de normalización adoptada en el rango  $0 < \gamma < 15$  cm, en función de los tirantes simulados. En cuanto a la ponderación de los indicadores, se demostró el valor que tiene precisar claramente cuáles son los elementos en riesgo y la magnitud de la afectación potencial, ya que algunos resultados pueden llegar a subestimar los efectos perjudiciales sobre algunos actores importantes (tránsito de vehículos y personas). Las validaciones de campo indican que la metodología puede ser considerada como eficaz; no obstante, a pesar de que el método es adaptable a diferentes percepciones de los gerentes, las escalas de normalización en todos los casos deben responder a criterios objetivos, a fin de mitigar este aspecto frágil del índice; sin embargo, esta clase de formulaciones se hacen aún más sólidas cuando se dispone de información de campo que permita validarla. Se demostró que el método propuesto arroja resultados más apegados a la realidad que el método de ponderación mixta tradicional cuando se analizan calles con profundidades de agua inferiores al nivel promedio de acera. Por otro lado, este nuevo enfoque presenta mejores correlaciones en el ajuste de las funciones de normalización respecto al enfoque tradicional. Se propone la aplicación de este método en cuencas urbanas con pendientes mayores a las evaluadas en el caso de estudio. Finalmente, se demuestra que a partir de los mapas presentados, se viabiliza la toma de decisiones en relación con ejecución de medidas estructurales para rehabilitar el sistema de

drenaje en función de modificar el mapa de peligrosidad y se facilita la definición de rutas de emergencia que pueden ser utilizadas en casos de eventos de lluvia extremo.

## Referencias

- Abt, S. (August 14-18, 1989). Predicting Human Instability in Flood Flows. Hydraulic Engineering. Proceedings. National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE, New Orleans, Louisiana, United States.
- ARMC (2000). *Floodplain Management in Australia. Best Practice Principles and Guidelines* (105 pp.). Australia: SCARM Report 73, Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand.
- Belleudy, P. (2004). Risques Hydro-Météorologiques, Crues Et Inondations / Risque, Aléa Et Vulnérabilité. / DDS-TUE364/ 9.
- Dawson, R. J., Speight, L., Hall, J. W., Djordjevic, S., & Savic, D. (2008). Attribution of Flood Risk in Urban Areas. *Journal of Hydroinformatics*, ASCE, 10(4), 275-288.
- FEMA (1979). *The Floodway: a Guide for Community Permit Officials* (156 pp.). No. 4. US: Federal Insurance Administration, Community Assistance, Federal Emergency Management Agency.
- FHWA (2009). *Urban Drainage Design Manual* (478 pp.). US Department of Transportation. Publication No. FHWA-NHI-10-009, Federal Highway Administration.
- Floodsite (2008). *Review of Flood Hazard Mapping. Integrated Flood Risk Analysis and Management methodologies*. Report Number T03-07-01. España, UPC, Task Leader.
- Gómez, M., Macchione, F., & Russo, B. (julio-septiembre, 2009). Comportamiento hidráulico de las calles durante lluvias extremas en zonas urbanas. *Ingeniería Hidráulica en México*, 24(3), 51-61.
- Hauger, M. B. (2006). Indicators of Hazard, Vulnerability and Risk in Urban Drainage. *Water Science and Technology*, 54(6-7), 441-450.
- Rossmann, L. (2004). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*. EPA/600/R-05/040. National Risk Management Research Laboratory. U.S. Environmental Protection Agency.
- Russo, B., Gómez, M., & Macchione, F. (2011). Experimental Approach to Determine Flood Hazard Criteria in Urban Areas. 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.
- Saaty, T. L. (1977). A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(15), 234-281.
- Samuels, P. (2006). Flood Risk Analysis and Management – Achieving Benefits from Research, European Conference on Floods, GOCE-CT-2004-505420, Viena, Austria.

- Sánchez, L., & Méndez, L. (2009). *Modelo de elevación digital e informatización del sistema de drenaje mayor y menor de la zona oeste de la ciudad de Santa Ana de Coro, Falcón* (230 pp.). Trabajo de investigación. Coro, Venezuela: UNEFM.
- Zonensein, J., Miguez, M. G., De Magalhães, L. P. C., & Valentin, M. G. (2008). *Flood Risk Index as an Urban Management Tool*. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.

## Dirección Institucional de los autores

*Dr. Luis Alejandro Sánchez Román*

Profesor agregado  
Especialista en Gestión de Recursos hidráulicos  
Doctorante en el área de Ingeniería Hidráulica  
Centro de Investigaciones de Recursos Hídricos (CIDRHI)  
Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda  
Complejo Académico Los Perozo  
Coro, Estado Falcón, VENEZUELA  
Teléfono: +58 (0268) 2524 685  
luisanchezr@yahoo.com

*Dr. Yoel Martínez González*

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH)  
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría  
(ISPJAE)  
Calle 114, Marianao  
19390 Ciudad de La Habana, CUBA  
Teléfono: +53 (7) 2663 383  
ymarq@cih.cujae.edu.cu