

## **PSEUDO-GENETIC OPTIMIZATION MODEL APPLIED TO URBAN STORM WATER REHABILITATION PROJECTS**

Navarro Planas, Vicente Rafael <sup>1</sup>; Iglesias-Rey, Pedro L. <sup>1</sup>; Martínez-Solano, F. Javier <sup>1</sup>; Saldarriaga Valderrama, Juan <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universitat Politècnica de València, <sup>2</sup> Universidad de Los Andes

One of the main problems in many cities is the need to rehabilitate or expand their drainage systems. Increasing rainfall intensities, growth and waterproofing of cities causes that original drainage networks became insufficient.

This paper presents an optimization methodology that allow obtaining solutions for drainage networks rehabilitation. This methodology uses EPASWMM as hydraulic modeling analysis of the behavior of the drainage network; and Pseudo-Genetic Algorithm (PGA) as optimization engine. This algorithm has been previously developed for other applications of optimization. This methodology allows to define the best solutions according to a set of cost functions previously defined. Potential solutions are defined by the ducts to be replaced or rehabilitated, and what places would be potentially interesting for the installation of a storm tank and its size.

Finally, the model is applied to solve the problems of one sector of the drainage networks in Bogotá (Colombia). It gets so clear, the ability of the developed methodology to find solutions to flooding problem in urban areas.

**Keywords:** Optimization; genetic algorithm; urban drainage

## **MODELO PSEUDO-GENÉTICO DE OPTIMIZACIÓN PARA PROYECTOS DE REHABILITACIÓN DE REDES DRENAJE PLUVIAL URBANO.**

Uno de los principales problemas de muchas ciudades es la necesidad de rehabilitar o ampliar sus redes de drenaje. El aumento de las intensidades de lluvia, el crecimiento e impermeabilización de las ciudades origina que los diseños originales de las redes de drenaje sean insuficientes.

Este trabajo presenta una metodología de optimización para obtener soluciones de rehabilitación de las redes de drenaje. Esta metodología utiliza EPASWMM como modelo de análisis hidráulico del comportamiento de la red de drenaje; y emplea como motor de optimización un Algoritmo Pseudo-Genético (APG) previamente desarrollado para otras aplicaciones de optimización. Esta metodología permite definir a partir de unas funciones de coste establecidas, cuál es la solución más adecuada. Las potenciales soluciones definen los conductos a sustituir o rehabilitar y en qué lugares sería potencialmente interesante la instalación de tanques de tormenta y de qué tamaño serían estos.

El modelo finalmente se aplica para la solución de los problemas de drenaje pluvial de uno de los sectores de la red de drenaje de la ciudad de Bogotá (Colombia). Queda así de manifiesto la capacidad de la metodología desarrollada para encontrar soluciones a los problemas de inundación en entorno urbano.

**Palabras clave:** Optimización; algoritmo genético; drenaje urbano

Correspondencia: Pedro L. Iglesias-Rey (piglesia@upv.es)

Agradecimientos: Los autores agradecen a Mexichem, Colombia por financiar la presente investigación a través del proyecto "Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro. Fase II", sin el cual no habría sido posible completar este estudio.

## 1. Introducción

Las redes de drenaje urbano cumplen una clara misión higienista, en tanto que conducen las escorrentías generadas durante las lluvias, y protegen hasta un determinado nivel frente a eventos de inundación urbana. Este nivel de protección de la red viene dado por su periodo de retorno. Indiscutiblemente, cuanto mayor sea el periodo de retorno de diseño de la red, menores daños tangibles (económicos) e intangibles (de cariz social, principalmente) acontecerán, pero también mayor resultará la inversión estructural.

La insuficiencia de las redes de drenaje pluvial tiene en multitud de países un origen claro: el cambio climático (Saldarriaga et al., 2014). Aunque los efectos del cambio climático en muchas zonas conducen a menores precipitaciones globales, al mismo tiempo ocurre que las intensidades de lluvia son significativamente superiores. Este hecho, unido a la impermeabilización creciente de nuestras ciudades hace que los problemas de inundación no paren de crecer.

En este marco de cambio climático existen diferentes tecnologías que pueden emplearse para solucionar o paliar las consecuencias de los excesos de lluvia sobre nuestras ciudades. El enfoque clásico de un problema de este tipo se abordaba mediante la renovación total o parcial de la red y el aumento de su capacidad de transporte. Ante este enfoque de carácter clásico se aborda otro en el que la renovación de conducciones se utiliza de forma combinada con las técnicas de drenaje urbano sostenible, también conocidas como SUDS (de sus siglas anglosajonas, *Sustainable Urban Drainage Systems*).

De las diferentes técnicas, este trabajo se va a centrar en aquellas medidas estructurales que controlan los caudales una vez estos han ingresado en la red (construcción de depósitos de retención y rehabilitación de las conducciones de la red). Concretamente el trabajo se centra en desarrollar una metodología integral de rehabilitación de una red de drenaje pluvial en base a la renovación parcial de la red y la instalación de tanques de retención. Otras técnicas SUDS tales como la construcción de pavimentos porosos, cubiertas verdes en edificios o pequeños jardines en azoteas y terrazas no se han considerado. Si bien pueden reducir parcialmente las escorrentías es necesario una instalación masiva de los mismos para obtener resultados que permitan mitigar las escorrentías de forma significativa.

Uno de los primeros trabajos que relaciona la utilización de tanques de tormenta y las variaciones de lluvia originadas por el cambio climático es la realizada por Andrés et al. (2012). Su modelo probabilístico permite evaluar la eficiencia en la reducción de inundaciones en función de diferentes parámetros como el tamaño de los tanques, los parámetros climáticos y las características de la cuenca.

El problema que se plantea en este caso es ligeramente diferente al incluir el uso combinado de tanques y renovación de conducciones. En este sentido los modelos matemáticos del drenaje urbano desempeñan un rol fundamental, puesto que permiten simular y comprobar la eficiencia de las medidas para reducir caudales pico y, por ende, laminar los hidrogramas de avenida. En esta línea Butler y Schütze (2005) desarrollan un modelo que incluye la eficiencia de los tanques en base a una cierta modelación hidráulica del comportamiento de la red en su conjunto. No obstante, su planteamiento está más bien orientado a la calidad del vertido que al control de las inundaciones. Posteriormente este trabajo ha sido ampliado por Fu et al. (2008) considerando la optimización de las aguas residuales urbanas como un problema multiobjetivo. Para ello utiliza el modelo genético multiobjetivo NSGA II (Deb et al., 2002) que permite obtener la frontera de Pareto de las diferentes soluciones óptimas.

En este contexto, la optimización técnico–económica cumple una tarea fundamental para lograr disminuir el presupuesto final del proyecto de obra civil a realizar. Así el trabajo se centra en presentar una metodología de rehabilitación que combina el análisis hidráulico con un modelo de optimización.

## 2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología que a través del uso combinado de la optimización matemática y el análisis hidráulico de las redes de drenaje pluvial, permite encontrar las soluciones más adecuadas en proyectos de rehabilitación de redes de drenaje.

De forma general para el desarrollo de la metodología prevista se admiten los siguientes puntos o premisas de partida:

- Se emplearán diferentes escenarios de lluvia que corresponderán a las diferentes predicciones realizadas y basadas en los estudios de cambio climático. De esta forma, los escenarios a considerar son aquéllos considerados como los potencialmente peligrosos dentro de un margen de fiabilidad.
- Se deberá disponer de un estudio previo de la transformación lluvia-escorrentía, de forma que el modelo hidráulico considere que los caudales se aportan directamente en los nudos de entrada del modelo. En otras palabras, el estudio de transformación lluvia-escorrentía se realizará de forma independiente al modelo hidráulico.
- Se deberá tomar como partida un modelo matemático calibrado de la red de drenaje, ya que el análisis de cada uno de los escenarios de operación debe ser lo más preciso posible. Como herramienta de análisis se va a emplear el modelo SWMM5 (Rossman, 2010) junto con la adaptación del Toolkit de cálculo de dicho modelo realizada por Martínez-Solano et al (2014).
- El modelo matemático empleado debe ser lo más sencillo y simplificado posible, a fin de que la velocidad del proceso de optimización sea razonable. Por ello a partir de la red original se realiza una simplificación de la misma.
- El problema de optimización se abordará en términos de unidades monetarias. De esta forma, en una primera formulación del problema de optimización, el primer paso será hallar las funciones que traduzcan el valor de variables hidráulicas en unidades monetarias.
- De entre todas las técnicas matemáticas descritas, parece que las técnicas heurísticas son las que pueden ofrecer unas mayores prestaciones. Por ello, basándose en la experiencia previa, se desarrollará un modelo inicial con APG (Mora et al., 2013).

A partir de estas hipótesis, el objetivo de trabajo se resume en la función objetivo del problema de optimización planteado. Dicha función objetivo, expresada en términos de unidades monetarias, pretende considerar de forma conjunta tanto las inversiones en depósitos de retención y renovación de conductos como las penalizaciones bien por inundación bien por el nivel excesivo de agua en los conductos drenaje. Matemáticamente, dicha función puede expresarse como

$$F.O. = \lambda_1 \sum_{i=1}^N C(V_i(i)) + \lambda_2 \sum_{i=1}^{N_D} C(V_{DR}(i)) + \lambda_3 \sum_{i=1}^M C(D_N(i)) \cdot L_i + \lambda_4 \sum_{i=1}^M C(V_{max}(i)) \quad (1)$$

En la ecuación (1), el primer término recoge el sumatorio del coste correspondiente al volumen de inundación  $V_i(i)$  en cada uno de los  $N$  nudos del sistema; teniendo en cuenta que dicho número total de nudos  $N$  es la suma del número de pozos  $N_N$  y del número de depósitos  $N_D$ . El segundo término es el coste de inversión vinculado a la

inversión en la construcción o ampliación del volumen  $V_{DR}(i)$  de cada uno de los depósitos que finalmente se han instalado en el sistema; bien sean depósitos que actualmente existen o bien sean nudos de la red en los que se van a instalar nuevos depósitos de retención. El tercer término agrupa el presupuesto destinado a la restitución de las  $M$  conducciones consideradas en la rehabilitación. El cuarto término es la suma de los volúmenes máximos de agua en el interior de cada una de las  $M$  conducciones del modelo. Esta última opción se añade para incluir en la función objetivo la posibilidad de incluir el nivel de llenado de la red como parte del objetivo a considerar.

En la función objetivo, cada uno de los términos definidos lleva delante un multiplicador de Lagrange  $\lambda_i$ . Estos multiplicadores permiten decidir qué sumandos de la función objetivo se consideran en cada proyectos de rehabilitación.

### 3. Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo de la rehabilitación de las redes de pluviales mediante el uso conjunto de tanques de retención y renovación de conducciones se basa en las siguientes fases o etapas:

- Confección del modelo matemático completo de la red de distribución (Iglesias-Rey et al., 2014) para poder analizar el comportamiento de la red de drenaje pluvial. Para ello será necesario incluir en dicho modelo la lluvia de proyecto seleccionada, el modelo de la red calibrado y el estudio hidrológico de la misma que permita transformar la lluvia en caudales de escorrentía que finalmente acaban entrando en la red.
- Definir las potenciales variables de decisión del problema. Esto es, definir los potenciales puntos en los que podría instalarse un tanque de retención y definir los posibles conductos a ser rehabilitados y sustituidos por un conducto nuevo de dimensiones diferentes a las iniciales.
- Definir las funciones de coste de cada uno de los elementos que forman parte de la función objetivo del proyecto (costes de inversión en conductos y tanques, costes de inundación, etc.).
- Realizar la optimización mediante el modelo heurístico desarrollado (Mora et al., 2013). Dicha optimización ofrece como resultado final la solución de diseño de la red.

De los sumandos de la función objetivo (1) el segundo y el tercero son los que suponen el núcleo central del trabajo desarrollado en este trabajo. Por ello, a continuación se detallan los aspectos relacionados con las variables de decisión y la definición de los costes de la función objetivo.

### 4. Variables de decisión

Las variables de decisión que pueden contemplarse en el problema de optimización planteado son las siguientes:

- *Variables relacionadas con los nudos.* Los nudos del modelo en SWMM presentan una cierta capacidad de almacenamiento relacionada con la sección transversal de los mismos. El modelo de optimización permitirá seleccionar varios de los nudos del modelo para estudiar en los mismos la posibilidad de instalar un depósito de retención. Así, con cada uno de estos nudos, se asocia una variable de decisión que corresponde a la sección equivalente adicional que presentaría un tanque en caso de ser instalado en dicho nudo. Dicho valor de la sección equivalente adicional varía entre 0 y un valor máximo, que se determina previamente al estudio

del proceso de optimización, teniendo en cuenta las restricciones de espacio en el trazado urbano en cada uno de los puntos. En el caso de que como resultado de la optimización el área adicional sea 0, esto indicaría que no es adecuada la instalación de un tanque de tormenta en dicho nudo, manteniendo en ese caso la capacidad de almacenamiento inicial que tenía el pozo.

- *Variables relacionadas con los conductos.* El modelo de optimización permitirá seleccionar las conducciones del modelo en SWMM para analizar la posibilidad de cambiar el diámetro de cuantas se hayan escogido. Existirá una variable de decisión asociada al diámetro de los tubos, que tendrá un funcionamiento análogo al de la sección transversal en los tanques de tormenta. Este valor del diámetro variará entre 0 y un valor máximo (fijado anticipadamente al estudio del proceso de optimización). En el caso de que como resultado de la optimización el diámetro sea 0, esto señalaría que la línea que une dos nudos del modelo se mantendría con el diámetro anterior al proceso de optimización. Por tanto, no resultaría viable la restitución de dicho conducto.
- *Variables relacionadas con los depósitos.* En el caso de que el modelo inicial de SWMM contenga algún depósito, podrá optimizarse su sección transversal. Tanto en el caso de los nudos como en el caso de los depósitos, la sección transversal equivalente S del depósito se modelará de acuerdo a la expresión siguiente:

$$S = A \cdot z^B + C \quad (2)$$

donde A, B y C son coeficientes característicos que permiten ajustar la sección a diferentes expresiones; y z es el nivel de agua en depósito. En el caso del modelo de optimización desarrollado, se admite que todos los depósitos son de sección recta constante. En ese caso el parámetro A de la expresión (2) representa la sección transversal del depósito, mientras que los parámetros B y C son nulos.

## 5. Funciones de Coste de la Función objetivo

La función objetivo definida en (1) contiene cuatro términos que representan en forma de funciones de coste el valor que adopta cada una de las variables de decisión, así como las penalizaciones asociadas al incumplimiento de alguna de las restricciones del proyecto de rehabilitación. Los costes asociados con las variables de decisión son los costes de los tanques y de los conductos, mientras que los costes asociados a las penalizaciones son los costes de inundación y el costes de almacenamiento de agua en red.

### 5.1. Función de Coste de los Tanques

El problema que se plantea en este caso es obtener una curva de costes que represente el presupuesto de inversión del proyecto de construcción de un depósitos de retención. Indudablemente un estudio minucioso de los costes de excavación de un determinado tanque depende de multitud de factores. Algunos de los factores que más pueden afectar a estos costes son entre otros:

- La sección transversal del tanque.
- La profundidad de excavación necesaria para la construcción del tanque.
- La tipología de construcción del tanque: bien construido de hormigón o bien construido a partir de estructuras modulares como los Aquacells.
- Las cargas que deberá soportar la parte superior del tanque.
- Los elementos auxiliares para las conexiones de entrada y salida del tanque necesarios para el adecuado funcionamiento del mismo.

- Los elementos necesarios para la limpieza y mantenimiento del tanque.

Sin duda, todos los factores anteriores y alguno más condicionan el coste final del tanque. No obstante, para la optimización de los tanques en una red de drenaje se ha optado en el apartado anterior por representar la variación de los costes únicamente en función del volumen del tanque. Matemáticamente esta relación se representa como:

$$C(V_{DR}) = A + B \cdot V_{DR}^C \quad (3)$$

donde  $C(V_{DR})$  es el coste asociado a la construcción de un tanque de retención de volumen  $V_{DR}$ ; siendo A, B y C coeficientes de ajuste.

Para poder desarrollar la metodología propuesta se ha realizado un profundo estudio de costes utilizando bases de datos de precios de dos países diferentes: España y Colombia. Los resultados del estudio de costes y sus ajustes son los que recoge la Tabla 1.

**Tabla 1. Resultados de ajuste de la curva de costes de los tanques.**

Origen datos	A	B	C
Colombia	16 923	318.4	0.5
España	20 000	9 000	0.65

## 5.2. Funciones de Coste de los Conductos

Otra opción de rehabilitación de las redes de drenaje además de la instalación de tanques de retención es la posibilidad de considerar la sustitución de alguna de las conducciones por una de dimensiones diferentes.

A fin de poder valorar económicamente los costes derivados de la instalación de nuevas conducciones, se ha elaborado una función que represente estos costes en función del diámetro de las conducciones. Al igual que ocurrió en el caso de la curva de costes de tanques de retención, se ha dispuesto de fuentes de información diferentes. En este caso, costes de construcción en España y Colombia.

A fin de expresar matemáticamente la función de coste de los conductos se propone una expresión del tipo:

$$C(D_N) = A \cdot D_N + B \cdot D_N^2 \quad (4)$$

En la expresión anterior A y B son los coeficientes característicos de ajuste de la función que se ha ajustado tanto para los costes en España como para los costes en Colombia. Los resultados de estos ajustes son los que se recogen en la Tabla 2.

**Tabla 2. Valores de los coeficiente de la curva de costes de diámetros.**

Origen costes	A	B
España	137.15	40.685
Colombia	237.93	208.06

## 5.3. Funciones de Costes de Inundación

Dentro de la función objetivo deben incluirse también los costes asociados a las potenciales inundaciones que se produzcan en la instalación. Dentro de la metodología propuesta se han definidos dos formas diferentes de representar dicho

coste: bien proporcional al volumen de inundación en cada nudo o bien proporcional al nivel de inundación.

En el caso de los costes proporcionales al volumen de inundación se trata de un modelo más sencillo en el que se imputa un coste proporcional al volumen de agua que sale al exterior en cada uno de los nudos del modelo. Matemáticamente dicho coste de inundación se define como:

$$C_{\text{Inundación}} = \sum_{i=1}^N C(V_i(i)) = K_i \cdot \sum_{i=1}^N V_i(i) \quad (5)$$

Esta función permite calcular a partir de la constante  $K_i$  y del volumen de inundación  $V_i$  en cada nudo cuál es el coste total de inundación. Valores altos de la constante  $K_i$  conducen a soluciones en las que no existe inundación. Por el contrario, valores moderados de la constante  $K_i$  permiten soluciones en las que pueda existir algo de inundación en la red.

Por el contrario, en el caso de los costes relacionados con el nivel de inundación es necesario definir previamente en el modelo el área de inundación de cada uno de los nudos. A partir del nivel de inundación es necesario definir una función que relacione el coste de inundación con el nivel máximo que alcanza el agua en el exterior de la red de drenaje.

El estudio de costes de inundación toma como punto de partida un estudio previo (Universidad de Los Andes, 2006) en el que se define una curva de vulnerabilidad típica para estimar tanto los daños directos como los daños de los contenidos ante un cierto nivel de inundación. Dichas curvas de inundación se aplican considerando los precios del metro cuadrado de vivienda (Amezquita, 2015). A partir del uso conjunto de los precios del suelo y del nivel de afección en función del nivel de inundación se obtienen los costes de inundación (Figura 1) para diferentes estratos sociales.

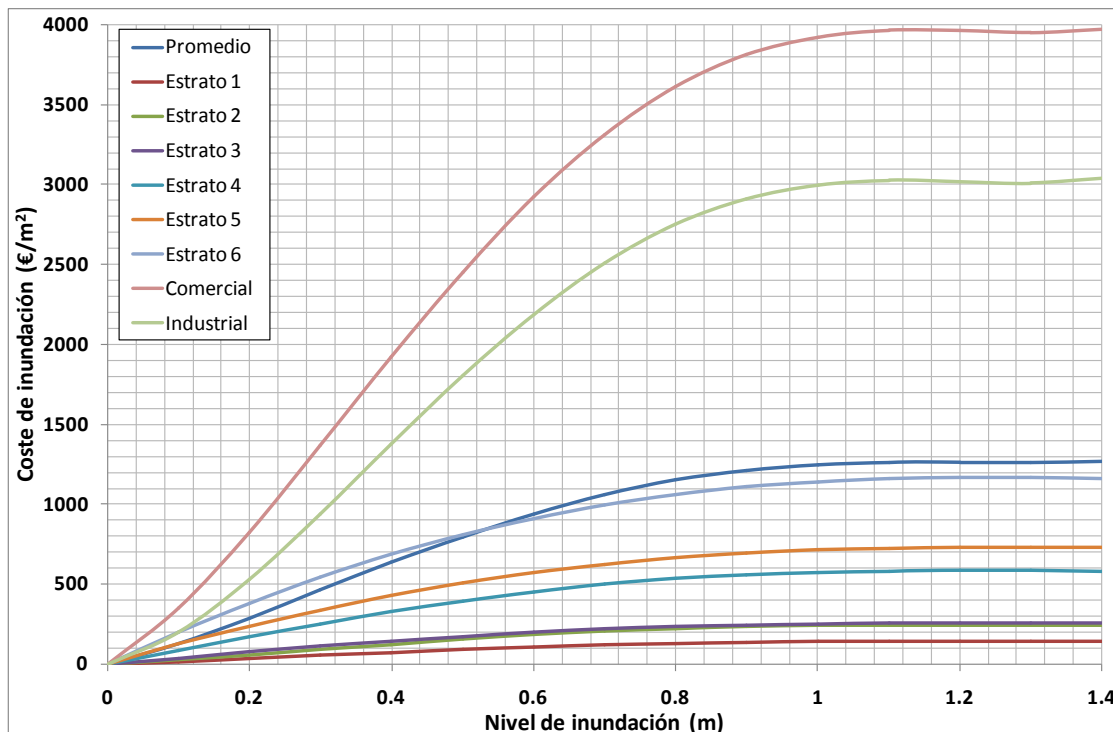


Figura 1. Costes de inundación (€/m<sup>2</sup>) para diferentes estratos y usos sociales.

A fin de agrupar las funciones de coste definidas en la Figura 1 se define una expresión matemática de tipo potencial que permite definir de forma más eficaz los costes de inundación. Dicha formulación matemática es:

$$C(y) = C_{\max} \cdot \left( 1 - e^{-\lambda \frac{y}{y_{\max}}} \right)^b \quad (6)$$

En la ecuación anterior  $C_{\max}$  refleja el coste máximo al que tienden todas las curvas de coste de inundación cuando se alcanza un nivel de inundación  $y_{\max}$ ; y es el nivel de inundación;  $\lambda$ ,  $b$  son coeficientes de ajuste de la curva.

Para analizar el comportamiento de las curvas de coste definidas con anterioridad se ha realizado un ajuste para ver qué valores de  $\lambda$  y  $b$  ajustan mejor las funciones de coste. Tras ajustar estos coeficientes se encuentra que los coeficientes que mejor ajustan las funciones de la Figura 1 son  $\lambda=4.88$  y  $b=0.65$ . Estos coeficientes permiten ajustar de forma más o menos precisa el comportamiento de las diferentes curvas de inundación. De esta forma, dado que el nivel de inundación que genera al máximo de daño  $y_{\max}$  es igual a 1.4 para todos los casos estudiados, únicamente queda por definir el parámetro  $C_{\max}$ . Dicho parámetro representa (Tabla 3) el coste máximo por unidad de superficie en función del uso del suelo.

**Tabla 3. Valores del coeficiente  $C_{\max}$  para los diferentes usos.**

Uso del suelo		$C_{\max}$ (€/m <sup>2</sup> )	Uso del suelo	$C_{\max}$ (€/m <sup>2</sup> )
Estrato social	1	142.34	Comercial	3974.86
	2	245.44	Industrial	3040.53
	3	256.92	Promedio	1266.98
	4	584.49		
	5	732.31		
	6	1167.86		

En definitiva, para definir la función de costes de inundación tan solo es necesario definir el tipo de uso de cada uno de los suelos vinculados a las potenciales inundaciones en cada uno de los nudos. Estos usos se definen por la estimación de los daños económicos por metro cuadrado que corresponden al daño del 100% de los bienes considerados ( $C_{\max}$ ).

#### 5.4. Función de Coste de Almacenamiento en Red

Finalmente, se define una última función de coste que representa el nivel de llenado de la red. En determinadas circunstancias puede resultar interesante bien que la red de drenaje esté vacía (para disponer de mayos capacidad de almacenamiento) o llena (para evitar infiltraciones en la misma). Por ello, para contemplar estas ccircuntancias se define una función de coste proporcional al volumen máximo en cada uno de los conductos de la red.

$$\lambda_4 \sum_{i=1}^M C(V_{\max}(i)) = \lambda_4 \sum_{i=1}^M C_V \cdot V_{\max}(i) \quad (7)$$



En la ecuación (7) aparece el multiplicador de Lagrange y un coste unitario  $C_v$ . El primero adopta el valor 1 ó 0 en caso de querer considerar o no el almacenamiento en red dentro de la función objetivo. El término  $C_v$  es el coste unitario asociado a cada metro cúbico de agua presente en la red.

## 6. Caso de Estudio

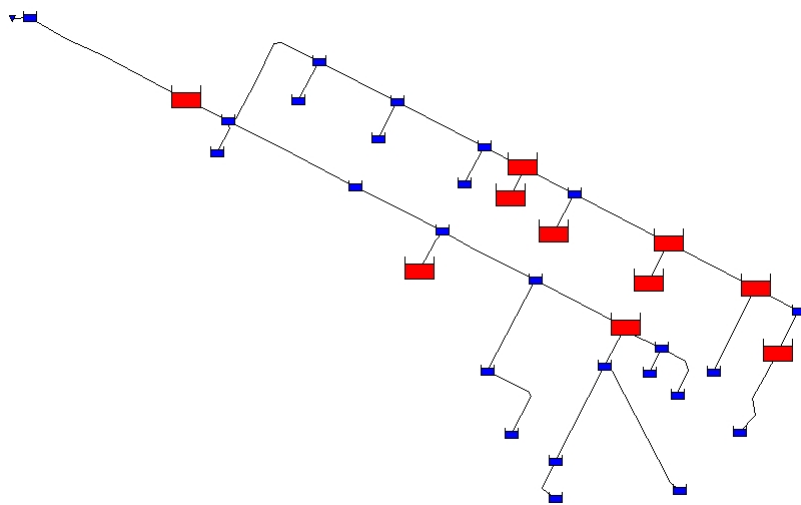
A fin de poner de manifiesto la metodología propuesta esta se va a aplicar sobre la rehabilitación de uno de los sectores de la red de drenaje pluvial de la ciudad de Bogotá. La red objeto de estudio se ha obtenido como una simplificación de la red inicial del sector de Chicó en la ciudad de Bogotá, red que denominaremos "E-Chicó".

Algunas de las características básicas de dicha red son las siguientes:

- Superficie total de drenaje: 51.74 ha.
- Número de subcuencas definidas: 35
- Longitud total de red considerada: 4993.28 m.
- Rango de diámetros: 300 – 1400 mm.
- Número total de nudos considerado: 36
- Rango de cotas: 2548.37 – 2587.65 (39.28 m de desnivel).
- Rango de profundidades de los pozos: 0.91 – 3.49 m.

La red funciona completamente por gravedad, ya que el perfil del terreno es favorable al drenaje de las aguas pluviales. No existe, por tanto, en la red ninguna estación de bombeo. En la Figura 2 se recoge el esquema de la red.

Antes de proceder a la optimización de la red "E-Chicó" se realiza un análisis preliminar para saber el estado en el que se encuentra la red y ver su respuesta a la lluvia de diseño seleccionada. Para ello, se realiza el análisis hidráulico de la red con el modelo SWMM, detectándose que en varios de los nudos de la red se produce inundación (nudos rojos de la Figura 2). Los resultados de la inundación en los diferentes nudos del sistema se recogen en la Tabla 4. En dicha tabla, se observa que la inundación total del sistema es alrededor de  $3,835 \text{ m}^3$ , lo que supone algo más del 16 % de la totalidad de la escorrentía generada ( $23,690 \text{ m}^3$ ) para la lluvia de proyecto.



**Figura 2. Representación en SWMM5 de los nudos en los que se produce inundación durante el evento de lluvia considerado.**

**Tabla 4. Resultados de inundación en los nudos.**

<b>Nudo</b>	<b>Q<sub>max</sub> (l/s)</b>	<b>T<sub>inundación</sub> (h)</b>	<b>Vol<sub>inundación</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
PMI92735	87.03	0.12	24
PMI92786	30.29	0.03	2
PMI92792	78.05	0.14	26
PMP92876	589.17	0.29	385
PMP92896	512.85	0.35	470
PMP92925	1,021.95	0.44	1182
PMP92933	369.01	0.17	133
PMP93000	662.66	0.34	502
PMP93107	350.41	0.16	124
PMP93198	1,170.87	0.33	950
PMP106155	80.09	0.19	37
<b>TOTAL</b>			<b>3,835</b>

En definitiva, el análisis preliminar de la red muestra que la misma es insuficiente para drenar la lluvia de proyecto seleccionada. Por ello, la red "E-Chicó" se ha considerado la adecuada para aplicar los algoritmos de optimización desarrollados. Los escenarios de análisis considerados para aplicar la metodología son:

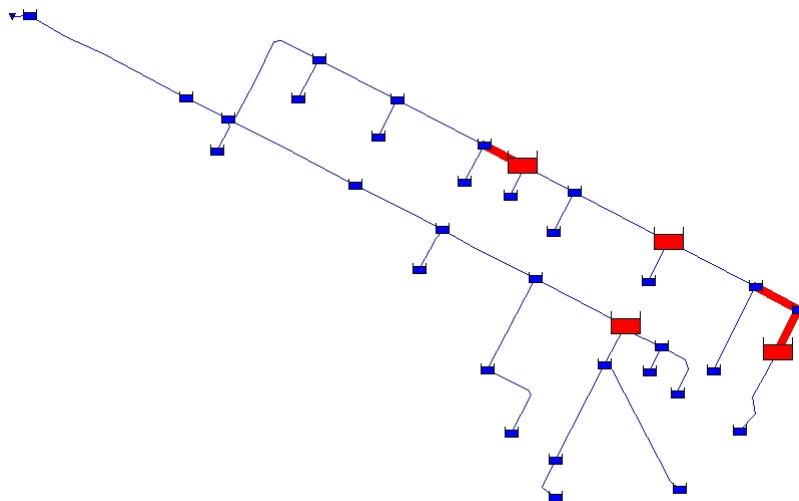
- **Escenario 1.** Rehabilitación de la red en base únicamente a modificar los conductos de la red y sustituirlos por unos de diámetro diferente. Este escenario tiene 35 variables de decisión: las 35 conducciones cuyos diámetros se dejan como incógnitas.
- **Escenario 2.** Rehabilitación de la red instalando únicamente tanques de retención. Este escenario también tiene 35 variables de decisión, correspondiente a los 35 potenciales nudos en los que se puede instalar tanques de retención.
- **Escenario 3.** Rehabilitación de la red combinando la instalación de conducciones y tanques de retención. El número de variables de decisión es 70.

Para cada uno de los tres escenarios definidos se aplica la metodología descrita en los apartados anteriores. Para ello se han considerado los cotes basados en los precios de Colombia. Los resultados se recogen tanto en la Tabla 5 como en la Figura 3. En la Tabla 5 se recoge el valor final que adopta la función objetivo. Como puede apreciarse, la mejor solución se obtiene cuando se combina la instalación de tanques y la renovación de conducciones, lo que muestra lo adecuado de la metodología de rehabilitación propuesta.

En la Figura 3 aparecen los tanques que es necesario instalar y los conductos que deben sustituirse en el caso del Escenario 3. En ese caso el número de conducciones a reemplazar es 3 y el número de tanques a instalar es 4. Estos tanques son de dimensiones variadas, desde 915 m<sup>3</sup> y una superficie de 500 m<sup>2</sup> hasta 4270 m<sup>3</sup> y una superficie de 1950 m<sup>2</sup>.

**Tabla 5. Resumen de costes (función objetivo, inundación, inversión en depósitos y en conductos) y número de tanques y depósitos de cada escenario analizado.**

Escenario	Función objetivo	Coste inundación	Coste Depósitos	Coste Conductos	Nº Depósitos	Nº Tuberías
1	763 164 €	7 622 €	-	755 542 €	6	0
2	273 459 €	5 392 €	268 067 €	-	0	16
3	254 046 €	8 363 €	237 457 €	8 226 €	4	3



**Figura 3. Resultados de la optimización (Escenario 3). Propuesta de inversión en tanques y sustitución de conducciones.**

## 7. Conclusiones

Tras describir la metodología de rehabilitación propuesta y analizar su aplicación a un caso concreto pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La metodología propuesta es sumamente adecuada para la rehabilitación de redes de drenaje pluvial que con el aumento de intensidades de lluvia tengan poca capacidad de transporte y presenten problemas de inundación.
- La metodología basada en la aplicación de funciones de coste es muy útil en el desarrollo de proyectos de este tipo. La definición de estas funciones es clave en la obtención de la solución final. En el caso del ejemplo desarrollado se ha aplicado con unos costes desarrollados en para la ciudad de Bogotá (Colombia). No obstante, en el caso de que se aplicase la misma metodología para costes en España los resultados obtenidos son diferentes. De ahí la importancia de definición de estos costes.
- El método de rehabilitación desarrollado no impide la aparición de inundación en la red. Todas las soluciones obtenidas contemplan una mínima aparición de inundación que en algunos nudos llega a unos pocos centímetros. En el caso de desear soluciones con inundación nula habría que aplicar de nuevo la metodología con costes mucho más elevados.

En definitiva, la utilización de metodologías que combinan la utilización de modelos de análisis hidráulicos con modelos de optimización heurísticos se muestran como una herramienta sumamente útil para el desarrollo de proyectos de rehabilitación de redes de evacuación de aguas pluviales. Sin duda la metodología desarrollada puede ser

aplicada a otros modelos de rehabilitación basados en modelos hidráulicos de análisis. Incluso el modelo presente puede ser ampliado considerando como alternativas de rehabilitación otras técnicas SUD.

## 8. Referencias Bibliográficas

- Amezquita, L.L. (2015). Determinantes del Precio de la Vivienda en Bogotá, 2012" De los Andes al litoral. Estudios sobre vivienda y suelo en Colombia. En: Colombia ISBN: 978-958-8939-09-4. Ed: Ediciones Unisalle, p.119-166.
- Andrés-Doménech, I., Montanari, A. & Marco, J.B. (2012). Efficiency of Storm Detention Tanks for Urban Drainage Systems under Climate Variability. *Water Resour. Plann. Manage.* 2012.138:36-46. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000144.
- Butler, D. & Schütze, M. (2005). Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software.* 20(4), 415-426. doi:10.1016/j.envsoft.2004.02.003.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(2), 182-197. doi: 10.1109/4235.996017.
- Fu, G., Butler, D., & Khu, S. T. (2008). Multiple objective optimal control of integrated urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software*, 23(2), 225-234. doi: 10.1016/j.envsoft.2007.06.003.
- Iglesias-Rey, P.L., Martínez-Solano, F.J., Vallejo, D., Saldarriaga, J. (2014). Metodología para la creación de modelos hidráulicos de redes de drenaje y la optimización del tiempo de cálculo. En Universidade Federal do Ceará. *XIII Simpósio Iberoamericano de Redes de Água, Esgoto e Drenagem. Linguas Ibéricas como Instrumento de Conhecimento, Ciência e Tecnologia.* Fortaleza, Brasil.
- Martínez-Solano, F.J., Iglesias-Rey, P.L., Saldarriaga, J. & Vallejo, D. (2014). Diseño de redes de alcantarillado mediante el uso de una librería de funciones de acceso al motor de cálculo del programa SWMM5. En Universidade Federal do Ceará. *XIII Simpósio Iberoamericano de Redes de Água, Esgoto e Drenagem. Linguas Ibéricas como Instrumento de Conhecimento, Ciência e Tecnologia.* Fortaleza, Brasil.
- Mora-Meliá, D., Iglesias-Rey, P.L., Martínez-Solano, F.J. & Fuertes-Miquel, V.S. (2013). Design of Water Distribution Networks using a Pseudo-Genetic Algorithm and Sensitivity of Genetic Operators. *Water Resour Manage* (2013) 27:4149–4162. doi: 10.1007/s11269-013-0400-6.
- Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model user's manual, version 5.0.* National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. EPA, Cincinnati, OH. Obtenido es: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100N3J6.TXT>.
- Saldarriaga, J., Camilloni, I., Cunha, M., Simoes, N., Zeferino, J., Iglesias, P., Martinez, F.J., Ocampo-Martinez, C., Quijano, N., Paez, D., Bohorquez, J.M., Salcedo, C.A. & Vallejo, D. (2014). Drenaje urbano y cambio climático: Hacia los sistemas de alcantarillado del futuro En Universidade Federal do Ceará. *XIII Simpósio Iberoamericano de Redes de Água, Esgoto e Drenagem. Linguas Ibéricas como Instrumento de Conhecimento, Ciência e Tecnologia.* Fortaleza, Brasil.
- Universidad de los Andes. (2006). *Estudio para proponer la metodología para la evaluación, zonificación y reducción de riesgos por inundaciones y avenidas*

*torrenciales y su articulación con los POT, aplicación de zonificación de amenazas a un caso piloto del Distrito de Bogotá.* Informe elaborado por el CIACUA de la Universidad de Los Andés (Bogotá). Obtenido en: <https://ciacua.uniandes.edu.co/index.php/component/content/article?id=79:studio-para-proponer-la-metodologia-para-la-evaluacion-zonificacion-y-reduccion-de-riesgos>.