

# DISEÑO OPTIMIZADO DE TUBERÍAS EN SERIE EN REDES DE DRENAJE URBANO INCLUYENDO ESTRUCTURAS DE CAÍDA

Andrea Marú<sup>1</sup>, Andrés Aguilar<sup>2</sup>, Natalia Duque<sup>3</sup> y Juan Saldarriaga<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

<sup>2,3</sup> Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

<sup>4</sup> Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

E-mail: ac.maru432@uniandes.edu.co, af.aguilar691@uniandes.edu.co, n.duque634@uniandes.edu.co, jsaldarr@uniandes.edu.co

## Resumen

En Latinoamérica son muy comunes los asentamientos en zonas de alta pendiente, donde es igual de importante evacuar las aguas residuales y pluviales que en las zonas de baja pendiente. Sin embargo, esta situación representa un desafío para el diseño de los sistemas de drenaje urbano, pues las condiciones topográficas de la zona pueden llegar a convertirse en obstáculos para el cumplimiento de las condiciones hidráulicas y económicas de la red. En otras palabras, cuando una red de drenaje urbano se construye en una zona de alta pendiente, los tramos de tuberías de los diseños que se obtienen, en la mayoría de los casos, poseen una pendiente menor a la del terreno; es decir, el inicio de un tramo de tubería tiene una diferencia de profundidad significativa con respecto al final del tramo de tubería previa. Debido a esta diferencia de altura es necesario construir una estructura complementaria, pozo (cámara) de quiebre o caída.

En este artículo se propone un complemento en el que se tenga en cuenta las estructuras de caída para la metodología propuesta por Duque et al. (2016), la cual realiza el diseño optimizado de series de tuberías en sistemas de drenaje urbano en donde el principal objetivo es encontrar el diseño de mínimo costo de construcción. Dicha propuesta modela el diseño optimizado como un problema conocido como el problema de la ruta más corta. La metodología utiliza un grafo en el que se representan las diferentes decisiones concernientes al diseño de la serie de tramos, i.e., el diámetro y pendiente de cada tubería en cada tramo.

## Metodología

El caso del diseño de redes de drenaje urbano es considerado un problema NP-duro, es decir que no es determinista en un tiempo polinómico y por lo tanto no existen algoritmos que puedan resolverlos de manera práctica. Este tipo de problema se resuelve por medio de métodos heurísticos. Por esta razón Duque et al. (2016) proponen resolver este tipo de problemas con un algoritmo de ruta más corta, los cuales permiten modelar la red como varios caminos que van de un punto a otro, siendo cada uno de los caminos una posibilidad de tubería entre un pozo y otro.

Duque et al. (2016) llevaron a cabo la programación del algoritmo de Bellman Ford para solucionar el problema del diseño de series de tuberías. Este algoritmo resuelve el problema de ruta más corta para grafos dirigidos, donde en este caso los nodos del grafo van a tener asociados un diámetro comercial disponible y una profundidad de excavación en un pozo de la red, mientras los arcos van a representar las posibles tuberías que se pueden instalar entre cada una de los pozos (arcos Tipo 1), y el algoritmo va a tener como principal objetivo encontrar la combinación entre diámetro y profundidad que minimice los costos de construcción de todas las tuberías de la serie.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo matemático del problema se muestra de la siguiente manera:

$$\min \sum_{(v_i, v_j) \in A} c(v_i, v_j) * x_{ij} \quad [1]$$

s.a

$$\sum_{\{j|(v_i, v_j) \in A\}} x_{ij} - x_{ji} = \begin{cases} 1 & v_i = v_s \\ 0 & v_i \neq v_s, v_t \forall v_i \in N \\ -1 & v_i \neq v_t \end{cases} \quad [2]$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \forall v_i \in N, v_j \in \quad [3]$$

donde  $x_{ij}$  es una variable binaria que toma el valor de uno si el arco  $(i,j) \in A$  está en la solución del problema (el camino) o toma el valor de cero de lo contrario;  $c(v_i, v_j)$  es el costo de utilizar el arco  $(i,j) \in A$  en el camino;  $v_s$  el nodo inicial del cual parte el camino y  $v_t$  el nodo final del camino.

Mostrando el problema a manera de grafo con arcos tipo 1, se obtendría el esquema mostrado en la figura 1, donde se tienen tres pozos de inspección, los cuales contienen nodos que a su vez tienen asociados un diámetro comercial disponible ( $d_i \in D$ ,  $D$ : Conjunto de diámetros comerciales) y una profundidad de excavación.

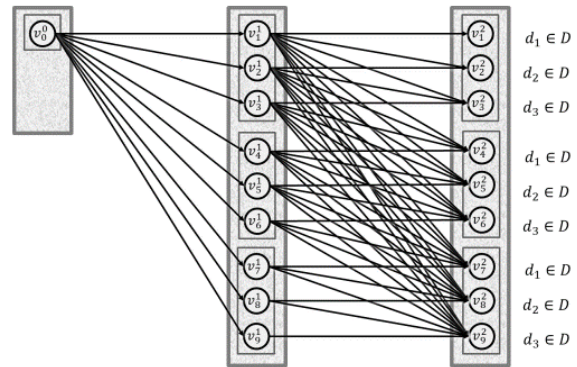


Figura 1.- Representación arcos tipo 1, tres nodos de igual profundidad y diferente diámetro.

También se debe tener en cuenta que los nodos del grafo están conectados mediante arcos, que representan las tuberías, y por lo tanto tienen asociados unos costos de instalación, dependientes del diámetro y la profundidad de excavación de sus nodos asociados, los cuales se calculan con ayuda de la siguiente ecuación de costo propuesta por Maurer et al. (2012 (Peinado, 2014)):

$$C_{ij} = \alpha h_{ij} + \beta \quad [4]$$

$$\alpha = m_\alpha d_{ij} + n_\alpha \quad [5]$$

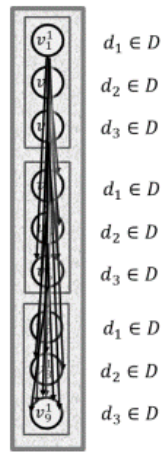
$$\beta = m_\beta d_{ij} + n_\beta \quad [6]$$

$$C_{ij} = (m_\alpha d_{ij} + n_\alpha) h_{ij} + m_\beta d_{ij} + n_\beta \quad [7]$$

Donde  $C_{ij}$  es el costo de construcción del tramo en dólares por metro lineal de tubería,  $m_\alpha = 1.02 * 10^{-3}$ ,  $n_\alpha = 127$ ,  $m_\beta = 0.11 * 10^{-3}$  y  $n_\beta = 37$  son constantes propias de las

regresiones que tratan de explicar la dependencia de las variables frente al costo.

Ahora para considerar la alternativa de construcción de estructuras de caída en una serie de tuberías, se debe agregar arcos tipo 2, los cuales representan la profundidad de la estructura. Donde de cada nodo salen arcos hacia los nodos que tengan diámetros y profundidades mayores o iguales, como se muestra en la figura 2.



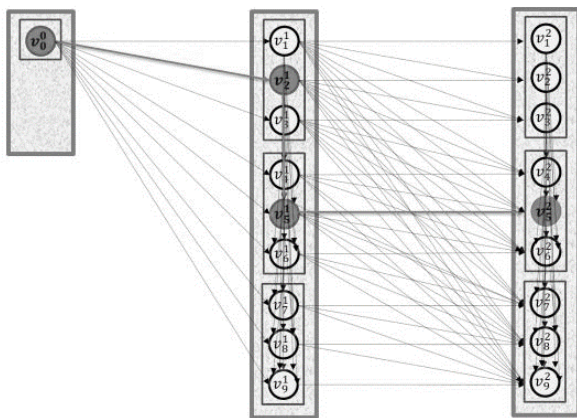
**Figura 2.-** Representación arcos tipo 2, tres nodos de igual profundidad y diferente diámetro en el pozo.

Teniendo en cuenta lo anterior se debe tener una función de costo que considere los costos de construcción de estas estructuras de caída, y no solo los de instalación de las tuberías. Por lo que mediante la variación de una ecuación propuesta por Peinado (2016) se encuentra una expresión que calcula dichos costos, de la siguiente manera:

$$C_c = 289,14 * H^{1.3} \quad [8]$$

Donde  $C_c$  es el costo unitario de la construcción un pozo de caída en dólares y  $H$  es la altura del pozo en metros.

De este modo, ya se tiene un grafo compuesto por arcos tipo 1 y 2, donde ahora se puede implementar el algoritmo de ruta más corta para definir el diseño hidráulico de una serie de tuberías dada, es decir, encontrar la combinación de arcos que tracen el camino desde el pozo de inicio hasta la descarga, donde se minimicen los costos de construcción de cada uno de los tramos



**Figura 3.-** Solución del grafo con estructuras de caída.

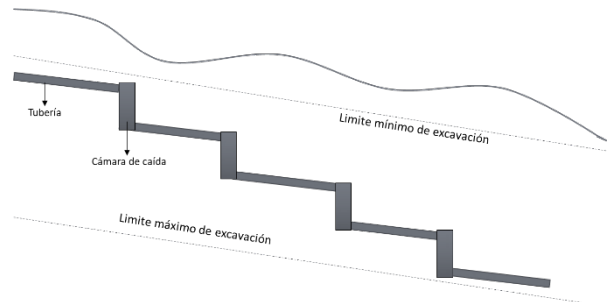
## Resultados

Para poner a prueba la funcionalidad y eficiencia de la metodología se plantearon escenarios donde se modificaron

factores como el número de tramos de la serie, el material de las tuberías, la pendiente del terreno y la velocidad máxima.

De esta manera se calcularon los costos totales, los costos de tubería, los costos de excavación, costos de los pozos y el tiempo computacional, los cuales permitieron evaluar cada uno de los escenarios y llegar a las conclusiones respectivas.

En este trabajo se implementaron series de 5, 10 y 20 tramos con materiales de tubería como PVC y concreto, y con cambios de pendiente desde 12% hasta 20%.



**Figura 4.-** Perfil de pozos de caída para cinco tramos.

## Conclusiones y recomendaciones

A partir de lo realizado en este artículo se pudo concluir que de los diferentes tipos de costos el de mayor influencia sobre los costos totales se da por costos de tuberías y el de menor influencia se da por costos de pozos de caída. Sin embargo, sin la posibilidad de creación de los pozos de caída el campo de acción de los diseños se reduce debido a las restricciones normativas.

Adicionalmente, la máxima pendiente factible para una serie de tuberías depende del material. Al ser el concreto un material con una velocidad máxima más restrictiva que el PVC posee una pendiente máxima factible menor a la del PVC.

También, la posibilidad de creación de pozos de caída permite que en los diseños se pueda aumentar la profundidad de tal manera que las tuberías reduzcan su diámetro.

Finalmente, los costos computaciones de la metodología original son menores en comparación a aquellos de la metodología modificada. Lo anterior se debe a la creación de un nuevo tipo de arcos que incrementa el número de posibilidades de diseño factibles.

## Referencias

- Duque, N., Duque, D., & Saldarriaga, J.** (2016). A new methodology for the optimal design of series of pipes in sewer systems. *Journal of Hydroinformatics*.
- Maurer, Scheidegger, & Herlyn.** (12 de septiembre de 2012). Quantifying costs and lengths of urban drainage systems with a simple static sewer. Dubendorf, Suiza: Taylor & Francis.
- Peinado, C.** (2014). Uso del programa CIE-AGUA para el diseño optimizado de redes de drenaje urbano. Redes patrón para Colombia. *Tesis de maestría*. Colombia: Universidad de los Andes.