

# USO DE REDES VIRTUALES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE PARA COMPLETAR MODELOS HIDRÁULICOS Y CATASTRO DE REDES EXISTENTES

Juliana Robles<sup>1</sup>, Natalia Hernández<sup>2</sup> y Juan Saldarriaga<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Investigador, Centro de investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) Universidad de los Andes.

<sup>3</sup> Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.

E-mail: j.robles1812@uniandes.edu.co, n.hernandez1456@uniandes.edu.co, jsaldarr@uniandes.edu.co

## Introducción

Las Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP) hacen parte de la infraestructura básica de una ciudad permitiendo la entrega de agua potable a un área de servicio bajo condiciones óptimas de presión y calidad. Con el fin de obtener un adecuado funcionamiento, es necesario realizar mantenimiento permanente basado en un conocimiento profundo del sistema y sus componentes.

El rápido y desorganizado crecimiento poblacional dificulta la toma de mediciones y afecta su calidad. Lo anterior limita la información disponible para el desarrollo de investigaciones que permitan generar y comprobar hipótesis acerca de estos sistemas y apoyar futuros diseños.

Los generadores automáticos de redes virtuales o semi-virtuales permiten obtener modelos que simulan escenarios reales y pueden ser utilizados como casos de estudio. Entre las herramientas más utilizadas se encuentra el Modular System Design (MDS), Water Distribution System Designer (WDS), HydroGen y WaterGen, entre otros (Sitzenfrei, 2016). En este trabajo se utilizó DynaVIBe-Web (Mair, Rauch & Sitzenfrei, 2014; Mair *et al.*, 2014) una herramienta reciente desarrollada con el fin de generar redes automáticas utilizando información de fácil acceso.

## Descripción del software

El software DynaVIBe-Web es la versión simplificada de DynaVIBe, una aproximación creada por la Universidad de Innsbruck., Austria. Este software tiene como objetivo principal generar redes virtuales que operan por gravedad basándose en poca información. Para esto, se basa en la correlación existente entre la infraestructura de calles y las redes de agua potable encontrada por Mair, Sitzenfrei, Möderl, y Rauch (2012) utilizando el proyecto Open Street Map. Adicionalmente, la generación requiere un área de servicio (polígono trazado a mano alzada en la página), ubicación de fuentes de abastecimiento y un DEM.

El proceso de generación del trazado visualiza el sistema como un grafo en el que los arcos hacen referencia a las tuberías y los vértices a los nudos. De esta manera, se inicia obteniendo la información de calles dentro del área de servicio y conectando las fuentes de abastecimiento. La elevación de cada nudo se determina a partir del Modelo de Elevación Digital y se calcula un árbol de expansión que puede ser aleatorio, mínimo o máximo. La demanda de cada nudo es aproximada según la elección del usuario (distribución uniforme o normal) y se realiza un proceso de limpieza en el que los nudos que no conecten a una tubería son removidos. Por último, se crean los ciclos del trazado teniendo en cuenta el Cycle Indicator (CI), un criterio expresado en porcentaje que define la condición bajo la cual se crearán tuberías nuevas.

Adicionalmente, el Main Pipe Offset (MPO) es un parámetro que debe ser ingresado por el usuario y permite definir la distancia, desde el borde del polígono de interés, a la cual se ubican las tuberías con mayor diámetro. El diseño hidráulico se basa en una superficie óptima de presiones y tiende a aumentar la elevación de los tanques en 10 m o más con el fin de cumplir los requerimientos básicos de presión.

## Metodología

Para esta investigación se analizaron seis RDAP de ciudades pequeñas o sectores de ciudades grandes en Colombia que fueron comparadas con los resultados del software. Para esto, los modelos de cada uno de los casos fueron recolectados y evaluados para verificar su calidad. Estas redes fueron escogidas como base para generar redes virtuales buscando obtener la mayor similitud posible entre ellas. De esta manera, se desarrolló una metodología para evaluar el valor óptimo del MPO que permitiera obtener el mejor modelo, con respecto a la red base.

A partir de las redes reales y virtuales, se utilizaron índices de teoría de grafos con el fin de verificar la capacidad de los modelos sintéticos en términos de estructura, eficiencia y robustez. Adicionalmente, el Índice de Resiliencia (Todini, 2000), excedente y déficit promedio de presión (Di Nardo, Di Natale, Santonastaso, Tzatchkov, y Alcocer-Yamanaka, 2015) y la edad del agua fueron calculados para verificar el desempeño hidráulico de las redes virtuales.

Por último, se calculó una expresión para relacionar el MPO con características como densidad de calles y forma del polígono de interés. Esto permitió plantear una solución sencilla para los usuarios que deseen generar redes virtuales que se asemejen en gran medida a redes ya existentes. Los resultados fueron evaluados en otro municipio pequeño de Colombia, del cual ya se tenía la red real. Un proceso de calibración permitió definir la factibilidad de completar catastro de redes existentes a partir de los resultados de DynaVIBe-Web.

## Resultados

La metodología expuesta fue aplicada a cada uno de los casos de estudio. En la Figura 1 se presenta el trazado de la red real y virtual de uno de los casos de estudio, encontrando una gran similitud entre los dos modelos.



Figura 1.- Red real (izquierda) y virtual (derecha) para uno de los casos de estudio.

Al obtener los resultados de los índices de teoría de grafos se encontró que la densidad de los modelos virtuales y reales fueron muy similares indicando redes muy dispersas debido a que los valores fueron cercanos a cero. El grado promedio de conexiones de los nudos estuvo, como se esperaba, entre 2 y 3 siendo un resultado lógico para este tipo de infraestructura. Por

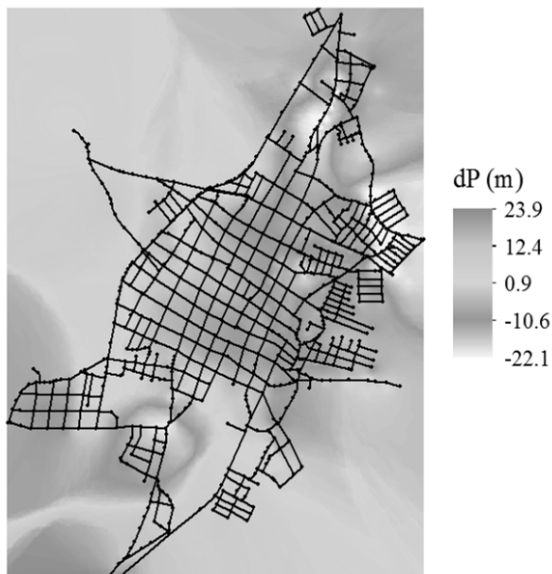
último, el coeficiente de cluster y de enmallado cuantifican la redundancia de la red. Sin embargo, el primero tiene en cuenta únicamente la presencia de triángulos mientras que el último cuantifica todo tipo de ciclos. Esta idea se vio reforzada por los bajos valores obtenidos para el coeficiente de cluster comparado con el segundo coeficiente.

Los coeficientes de eficiencia cuantifican la distancia promedio entre los nudos de una red y la mayor distancia entre un par de nudos, respectivamente. Se encontró que tres de las seis redes virtuales se comportan mejor que las redes reales, aunque las diferencias pueden ser despreciables.

Para el análisis de vulnerabilidad y robustez, se calculó el número de tuberías que deben ser eliminadas para desconectar el grafo; el resultado fue menor para las redes reales indicando mayor robustez. El “Spectral Gap” y “Algebraic Connectivity” indican un mejor desempeño de la red ante valores más grandes. Los resultados para todas las redes analizadas son muy similares con mejores resultados, en algunos casos, para las redes virtuales.

Debido a la diferencia de altura en los embalses, para el análisis hidráulico fue necesario corregir los modelos virtuales causando una disminución en el desempeño de las redes virtuales, alcanzando incluso presiones negativas en algunos casos.

En la Figura 2 se presenta la superficie de diferencia de presión entre los dos modelos para uno de los casos de estudio. En este caso, los nudos del modelo real tuvieron hasta 13.8 m por encima del virtual y los puntos con mayor alteración en la elevación presentaron diferencias en la presión, como se esperaba.



**Figura 2.-** Superficie de diferencia de presión entre modelo real y virtual:

De igual manera, se encontró que los resultados de índice de resiliencia para 4 de los 6 casos fue mejor en las redes reales debido a la alteración de los modelos. La diferencia máxima en la edad media del agua fue de 5 horas para el peor caso.

Por último, se calculó la siguiente expresión para encontrar el valor óptimo del parámetro MPO de cada red. Los tres indicadores utilizados tuvieron en cuenta la relación entre el perímetro y área de interés cuantificando su compacidad, la densidad media de calles dentro del polígono y la máxima distancia entre el centroide del polígono y la fuente de abastecimiento.

$$MPO = 657.5 - 42.8I_1 + 8.8I_2 - 188.4I_3 \quad [4]$$

Un pequeño municipio de Colombia fue utilizado para validar

los resultados. Al evaluar los indicadores y generar la red virtual, se encontró que las tuberías de mayor diámetro no estaban situadas de la misma manera que en la red real. Por esta razón, fue posible concluir que la expresión encontrada no es adecuada para el objetivo planteado.

Como último paso, la red generada fue calibrada con base en información conocida del modelo real. Así, se obtuvo la información de tres puntos con presión conocida, diámetros de la red, rugosidad y patrón de demanda a partir de la cual se realizó un proceso de calibración manual. Los resultados fueron aceptables, demostrando que la red virtual calibrada puede simular el comportamiento hidráulico de la red existente.

## Conclusiones

El software DynaVIBe-Web permite generar redes virtuales a partir de información de calles, DEM, entre otros. En esta investigación se analizaron seis RDAP ubicadas en Colombia generando las redes virtuales y comparando los resultados con las redes reales, previamente obtenidas y calibradas.

Los resultados mostraron un excelente desempeño por parte de la herramienta para representar el trazado de la red. Sin embargo, el parámetro MPO, ingresado por el usuario, no facilita la representación de un sistema ya existente y la relación encontrada en este estudio debe ser revaluada para obtener mejores resultados.

Los resultados de teoría de grafos muestran gran similitud en términos de estructura, eficiencia y robustez, siendo los valores congruentes con lo encontrado en la literatura. El cambio en la elevación de los embalses afectó la comparación directa de presiones entre modelos por lo que, en algunos casos, las redes virtuales alcanzaron presiones negativas (peor desempeño hidráulico).

Por último, fue posible comprobar que los modelos virtuales generados a partir del software pueden ser calibrados con pocos datos conocidos. Este resultado muestra que la falta de información puede ser superada con esta herramienta que permite obtener casos de estudio muy similares a la realidad para fines de investigación o gestión.

## Referencias

- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V. G., & Alcocer-Yamanaka, V. H.** (2015). Performance indices for water network partitioning and sectorization. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15(3), 499–509. <https://doi.org/10.2166/ws.2014.132>
- Mair, M., Sitzenfrei, R., Möderl, M., & Rauch, W.** (2012). Identifying multi utility network similarities. In *World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries* (pp. 3147–3153).
- Mair, M., Rauch, W., and Sitzenfrei, R.** (2014). Spanning tree based algorithm for generating water distribution network sets by using street network data sets (pp. 465–474).
- Mair, M. et al.** (2014). The application of a Web-geographic information system for improving urban water cycle modelling. *Water Science and Technology*, 70(11), 1838–1846. doi:10.2166/wst.2014.327
- Paez, D., and Filion, Y.** (2016). Generation and validation of synthetic WDS case studies using graph theory and reliability indexes. <http://doi.org/10.1016/j.seta.2016.12.002>
- Sitzenfrei, R.** (2016). A Review on Network Generator Algorithms for Water Supply Modelling and Application Studies (pp. 505–514).
- Todini, E.** (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115–122. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00049-2)
- Yazdani, A., and Jeffrey, P.** (2011). Complex network analysis of water distribution systems, 1–11. <http://doi.org/10.1063/1.3540339>