

Tendido óptimo de redes cloacales

Sebastián Santisi

Agua y Saneamientos Argentinos S.A.

E-mail: s@ntisi.com.ar

RESUMEN: Utilizando como datos de entrada la traza urbana, relevamientos topográficos y datos poblacionales, se busca encontrar la manera más económica de diseñar redes de efluentes cloacales. Para resolver este problema de grafos incomputable, se aplican técnicas heurísticas de minimización de costos basadas en Monte Carlo en conjunto con la resolución hidráulica del sistema.

INTRODUCCIÓN

En el contexto del plan de expansión del área servida de AySA se están realizando múltiples proyectos de redes cloacales. Dada la magnitud de dichos proyectos es necesario contar con una herramienta fiable que permita encontrar la manera más económica o conveniente de coleccionar los efluentes en las redes urbanas.

El procedimiento tradicional para realizar los diseños de estas redes es artesanal y depende en gran medida del criterio y la experiencia del proyectista y, más allá de las capacidades del mismo, la cantidad de soluciones posibles vuelve improbables las chances de encontrar el tendido óptimo.

En este trabajo se aborda el desarrollo de un modelo computacional para la resolución de tendido de redes óptimas.

PROBLEMA

El problema del tendido cloacal está delimitado por un área urbana a servir, sus datos poblacionales, sus niveles de terreno, las interferencias en el subsuelo y un punto de vuelco en un colector.

El transporte se realiza a gravedad y con las cañerías funcionando a superficie libre, coleccionando en ruta los efluentes domiciliarios. Cada tramo debe respetar una tapada mínima de seguridad y el flujo debe verificar una velocidad mínima de autolimpieza, lo cual condiciona una pendiente mínima (Tchobanoglous et al. 1981). Siendo que en muchos casos la distancia entre los puntos más lejanos de la red y la conexión con el colector es grande, las redes tienden a enterrarse, encareciendo su costo, dificultando su ejecución y, en el peor de los casos, siendo inviables. Es por esto que es importante conseguir un esquema de recolección que minimice los costos totales de la obra (Mays et al. 1975).

Desde el punto de vista hidráulico se tienen varias restricciones. Debe haber sólo un camino para conducir los efluentes, es decir, no se aceptan ramificaciones. Todos los tramos se vinculan entre sí mediante bocas de registro. La cota de intradós inicial del tramo que sale de una boca de registro no puede ser mayor que la cota de intradós final de ninguno de los tramos que acometen a la misma. Asimismo, el diámetro no puede ser menor que el de cada uno de ellos. Todo el tiempo deben verificarse las tapadas mínimas (que dependerán del tipo de terreno por el cual se colecta, de la distancia a los frentes que colecta, de interferencias en la ruta, etc.), por lo que el tramo también acompaña los declives del terreno. El cociente entre el tirante y el diámetro (h/D) no debe superar 0,90, en caso de hacerlo, se incrementa el diámetro hasta garantizar el cumplimiento de esa relación.

MODELIZACIÓN

La topografía del área a servir puede modelarse como un grafo, en donde los nodos coinciden con las bocas de registro y las aristas se corresponden con cada una de las calles a servir (Figura 1). Son datos conocidos las coordenadas de cada una de las bocas de registro y la cota de terreno natural en cada una de ellas.

Toda red diseñada sobre esta topografía, deberá conducir el caudal producido en cada uno de los tramos aguas abajo hacia un sumidero. Siendo que no se permiten ciclos o bifurcaciones en la recolección del caudal, las características principales de dicha red pueden esquematizarse según un árbol de tendido sobre el grafo (Figura 2). Esta representación es sencilla pero tiene dos limitaciones: deja los tramos de arranque de la red indefinidos por lo que es ambigua y una misma red puede representarse con más de un árbol. Ambas limitaciones no afectan significativamente el proceso. El objetivo de la optimización es encontrar el árbol que represente el menor costo para determinado parámetro de la red (costo, cota de vertido, etc.).

A diferencia de los problemas clásicos de árboles de tendido mínimo sobre grafos, en este caso el costo se encuentra desacoplado de la topología del grafo (Weiss 1997, Sedgewick 2002). El cómputo del costo se realiza según un diseño basado en criterios hidráulicos y dado que en el mismo intervienen las cotas de terreno, los diámetros y las cotas de los tramos aguas arriba no es posible aplicar técnicas de construcción de la solución basadas en enfoques ávidos (*greedy*) o de minimización local dado que las mismas no garantizan un costo mínimo en la red total.

Utilizando el enfoque de representar una red como un árbol de tendido sobre el grafo, cada red particular quedará definida según si cada uno de los tramos forma parte o no del árbol de tendido. Es inmediato ver que la cantidad de combinaciones posibles dentro de la red queda acotada por 2^m , con m la cantidad de aristas del grafo. Siendo un problema de naturaleza exponencial, cualquier técnica que explore todas las posibilidades de tendido será incomputable, por lo que la resolución del problema deberá hacerse según estrategias heurísticas.

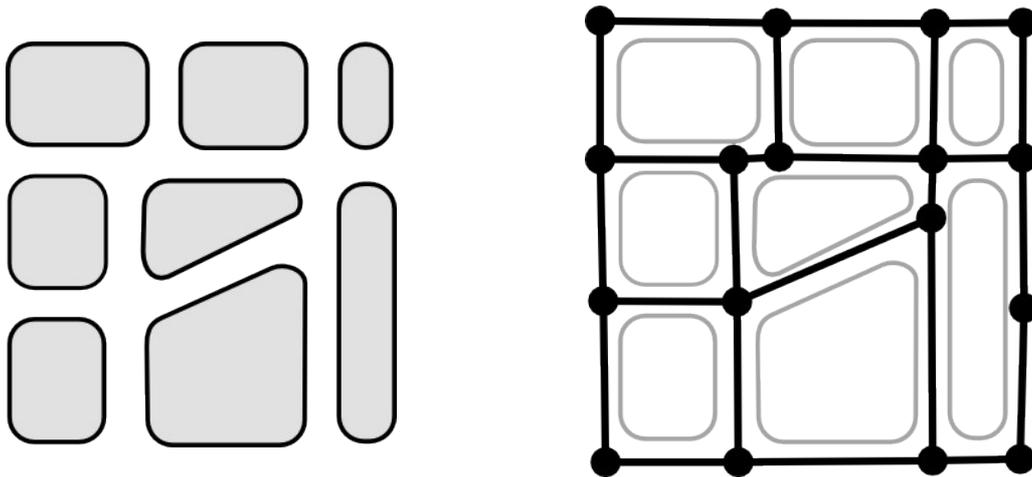


Figura 1.- Izq.: Ejemplo de amanzamiento. Der.: Grafo que lo representa.

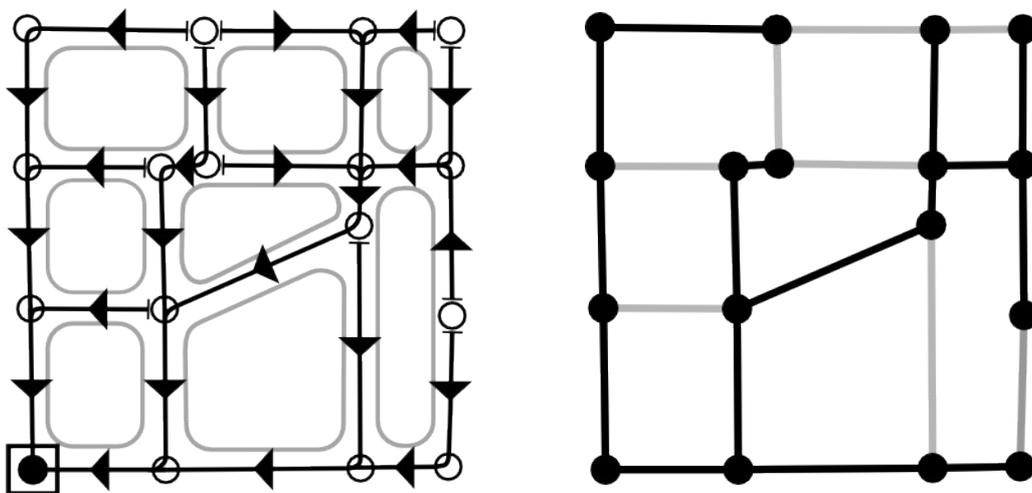


Figura 2.- Izq. Ejemplo de red. Der: Un posible árbol de tendido representante.

Generación de soluciones

Para la obtención de redes válidas sobre el grafo, se implementó un algoritmo ávido que genera un árbol aleatorio. Dado que el objetivo es encontrar árboles compatibles con redes el algoritmo se diseñó de manera de sesgar las soluciones hacia estructuras compatibles con redes. Las soluciones se generan definiendo previamente el nodo que será sumidero de la red.

Los pasos del algoritmo son:

1. Enlistar todas las aristas vinculadas con el sumidero de la red. Marcarlo como visitado.
2. Mientras queden aristas en la lista:
 - 2.1. Elegir una arista al azar. Esa arista forma parte del árbol solución.
 - 2.2. Marcar como visitado el nodo al que conduce esa arista.
 - 2.3. Todas las aristas de ese nodo que ya se encuentren en la lista se eliminan de la misma: O son la arista que se está recorriendo o son aristas que forman lazos. Todas las aristas de ese nodo que no se encuentren en la lista se enlistan.

Dado que el algoritmo realiza una exploración en ancho (*breadth first search*) en torno al sumidero, el árbol resultante tendrá una tendencia a poseer ramas que converjan directamente al mismo.

Cómputo de costos

Dado un árbol de tendido para computar el costo de la red definida por el mismo, hace falta primero diseñar dicha red.

El diseño de la red en base al árbol se realiza en forma determinística utilizando criterios hidráulicos. Se recorre el árbol desde las hojas hacia el sumidero, realizando el diseño de la red tramo por tramo hacia aguas abajo. En el caso de las aristas del grafo que no forman parte del árbol, se trata de tramos de arranque y los mismos se orientan según la pendiente del terreno. El diseño tiende los tramos según las tapadas y pendientes mínimas, y colecta caudales distribuidos por unidad de longitud. En el proceso dimensiona los diámetros comerciales que garantizan un h/D menor a 0,90.

El cómputo del costo se realiza sobre la red utilizando los costos reales de las cañerías y de la excavación así como estimaciones de rotura de pavimento o de vereda según la tapada del tramo, etc.

Minimización por Monte Carlo

El procedimiento de búsqueda de la mejor solución al problema se realiza mediante el método de Monte Carlo (Metropolis 1949). Sucesivamente se generan soluciones válidas, se diseña la red resultante, se computa su costo y se almacena la mejor solución conocida.

Para la elección de la mejor solución se pueden utilizar tres criterios diferentes: menor costo, menor cota de vertido, o menor costo dada la superación de determinada cota de vertido.

Implementación del modelo

El modelo se programó en ANSI-C99, utilizando GNU Octave (Eaton et al. 2009) para la visualización gráfica en tiempo real de las mejores soluciones. Todo el motor aleatorio utiliza semillas y las soluciones se representan en *tokens*, por lo que es posible recuperar cualquiera de las soluciones individuales.

En el contexto del uso real de la herramienta la carga de los datos topográficos de la red se realiza utilizando QGIS (QGIS Development Team 2014), donde se han programado complementos que permiten la exportación de la geometría del problema al modelo y posterior importación de la solución óptima.

RESULTADOS

Para la validación de los resultados y de la convergencia, se utilizaron tanto redes de prueba con soluciones óptimas triviales, como redes reales que fueron previamente diseñadas y estudiadas manualmente. En todos

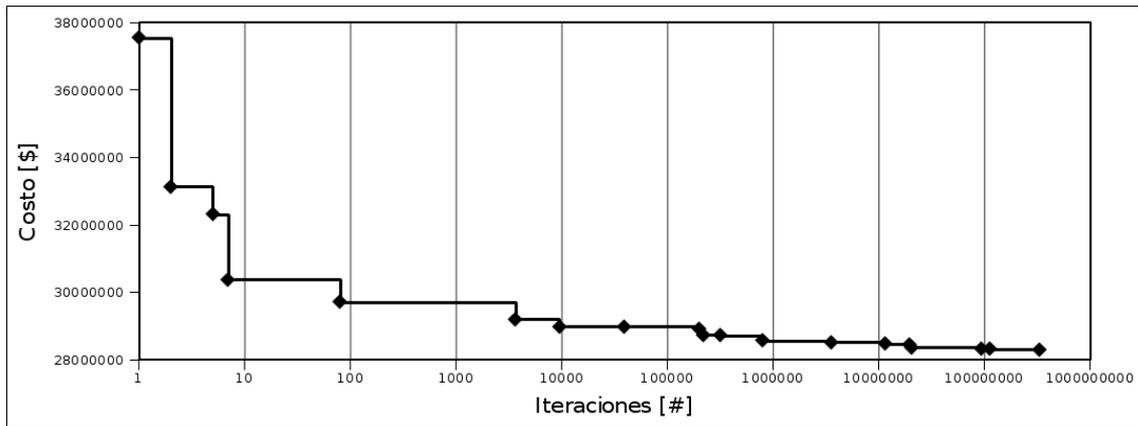


Figura 3.- Minimización del costo en función del número de iteraciones.

los casos, para redes de menos de 200 bocas de registro el método convergió en un tiempo razonable (de menos de un día) a buenas soluciones.

Utilizando el método de Monte Carlo, la mejora en las soluciones depende de la cantidad de soluciones ensayadas. Cuantas más soluciones se ensayen, hay menores chances de no haber probado una solución buena. El éxito del método depende de la calidad de las soluciones a ensayar y de la variedad en dichas soluciones, así como de la proporción de soluciones buenas en el problema.

En la Figura 3 puede observarse el costo de la mejor solución encontrada en función del número de iteraciones para una red real de 188 bocas de registro y 284 tramos (red de prueba B).

Tabla 1.- Comparación de resultados entre redes diseñadas por experto y por la herramienta.

Red	Bocas	Tramos	Solución experto	Minimización por tapada	Minimización por costo
A	119	174	2,81m \$16,45 mill.	2,28m \$16,19 mill.	2,68m \$15,59 mill.
B	188	284	1,57m \$29,40 mill.	1,31m \$29,63 mill.	2,47m \$28,35 mill.

En la Tabla 1 puede observarse la comparación entre las soluciones diseñadas por un experto contra las soluciones obtenidas luego de un día de simulaciones de Monte Carlo minimizando por costo total y por cota de vertido final. En la red de prueba A puede verse que ambas soluciones obtenidas por la herramienta mejoran los parámetros de la red del experto. Para la red de prueba B puede verse que las soluciones están en el orden de las diseñadas por el experto, minimizando el parámetro de interés.

En todas las redes ensayadas se verificó que:

1. Las soluciones que mejoran a la mejor solución conocida están distribuidas logarítmicamente en función de las iteraciones, es decir, que la cantidad de mejoras encontradas por década de iteración no varía significativamente.

2. La tasa de mejora entre dos soluciones buenas sucesivas es decreciente en función del número de iteraciones.
3. En el caso de optimizaciones por cota de vertido, se encontraron en las primeras iteraciones soluciones que cumplían la menor cota. En las iteraciones subsiguientes se minimizó únicamente el costo de las mismas.
4. Las mejoras obtenidas entre las soluciones de la última década de iteraciones para simulaciones de menos de un día de cómputo, estuvieron siempre por debajo del 1% en costo.
5. En el caso de redes ya diseñadas manualmente, el modelo encontró en todos los casos mejores soluciones a las diseñadas por expertos.

CONCLUSIONES

En base a las simulaciones realizadas, si bien por cuestiones de computabilidad es imposible obtener la mejor solución como para compararla con la encontrada por este método, los resultados son satisfactorios como para adoptar las soluciones del método como soluciones viables.

Actualmente la herramienta presentada se encuentra en uso habiéndose generado proyectos para una población de más de 150.000 habitantes en 4 partidos del conurbano bonaerense. En todos los casos, la asistencia de esta herramienta redundó en una reducción significativa del tiempo de desarrollo y una mejora en la calidad de la red final.

Sigue siendo una limitación del método el manejo de redes de más de 200 bocas de registro, donde se encuentra una limitación entre las soluciones que admite la red contra las que es posible ensayar por Monte Carlo en un tiempo razonable. En base a esto se está trabajando para aplicar enfoques de minimización basados en algoritmos genéticos (Weng et al. 2005) al modelo desarrollado para esta aplicación.

REFERENCIAS

- Mays, L. W. y Yen, B. C., 1975. Optimal Cost design of branched sewer systems. *Water Resources Research*, 11(1), pp. 37-47.
- Metropolis, N. y Ullam, S., 1949. The monte carlo method. *Journal of the American statistical association*, 44(247), pp. 335-341.
- Eaton, John W., Bateman, D. y Hauberg, S., 2009. GNU Octave version 3.0.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- QGIS Development Team, 2014. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Sedgewick, R., 2002. *Algorithms in C, Part 5: Graph algorithms*, 3/E. Addison-Wesley.
- Tchobanoglous, G., 1981. *Wastewater engineering: Collection and pumping of wastewater*. McGraw-Hill, Inc.
- Weiss, M. A., 1997. *Data structures and algorithm analysis in C*, 2/E. Addison-Wesley.
- Weng H. T. y Liaw S. L., 2005. Establishing an optimization model for sewer system layout with applied genetic algorithm. *Jornal of Enviromental Infomatics*, 5(1), pp. 26-35.