



## Desarrollo de una Herramienta Digital para la Optimización de Redes de Alcantarillado

Revista EIA  
ISSN 1794-1237  
e-ISSN 2463-0950  
Año XIX/ Volumen 22/ Edición N.44  
Julio - diciembre 2025  
Reia4416 pp. 1-17

Publicación científica semestral  
Universidad EIA, Envigado, Colombia

### PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Rodríguez-Vivas, D. E.; Alvarado-Rueda, S. A. y Pimiento, M. A.  
Desarrollo de una Herramienta Digital para la Optimización de Redes de Alcantarillado

Revista EIA, 22(44), Reia4416 pp. 1-17  
<https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1864>

 *Autor de correspondencia:*  
Rodríguez-Vivas, D. E.  
Ingeniero Químico  
Magister en Gerencia Ambiental  
Correo electrónico:  
[coord.invambiental@umb.edu.co](mailto:coord.invambiental@umb.edu.co)

**Recibido:** 19-02-2025  
**Aceptado:** 10-06-2025  
**Disponible online:** 01-07-2025

 DAVID ERNESTO RODRÍGUEZ-VIVAS<sup>1</sup>  
SIMÓN ANDRÉS ALVARADO-RUEDA<sup>1</sup>  
MARÍA ALEJANDRA PIMIENTO<sup>2</sup>

1. Universidad Manuela Beltrán, Colombia.
2. Universidade da Coruña, España.

### Resumen

La creciente demanda de infraestructuras eficientes para el drenaje de aguas residuales y pluviales debido al acelerado aumento de la población mundial ha generado desafíos significativos en términos de costos y eficiencia para los diseñadores y empresas constructoras. En respuesta a esta necesidad, este estudio presenta el desarrollo y la validación de una herramienta digital innovadora destinada a optimizar el diseño de redes de alcantarillado, reduciendo al mínimo los costos de construcción y operación. La herramienta, implementada en Python y utilizando algoritmos genéticos combinados con programación heurística (GA-HP), está diseñada para cumplir con las normativas colombianas actuales. Su funcionamiento se divide en dos etapas: inicialmente, el Algoritmo Genético identifica los diámetros óptimos de las tuberías y la convergencia de la función de costos; posteriormente, la Programación Heurística ajusta las pendientes y calcula las características hidráulicas junto con las restricciones por norma de la red. Los ensayos realizados en un escenario hipotético mostraron una notable disminución en los costos totales de construcción y operación, alcanzando un costo de \$276.954,01 USD, significativamente inferior al del modelo original (\$411.096,90 USD), teniendo en cuenta que este valor es con las restricciones adicionales para su comparación equitativa. La herramienta desarrollada es práctica y accesible para los diseñadores hidráulicos, demostrando ser capaz de encontrar soluciones costo-efectivas incluso en condiciones exigentes.

**Palabras clave:** Optimización, Alcantarillado, Algoritmos Genéticos, Convergencia, Hidráulica, Programación Heurística, Costos, Función Objetivo, Normativa, Restricciones.

---

# Development of a Digital Tool for Sewer Network Optimization

## Abstract

The increasing demand for efficient infrastructure for wastewater and stormwater drainage, driven by the rapid growth of the world population, has posed significant challenges in terms of costs and efficiency for designers and construction companies. In response to this need, this study introduces the development and validation of an innovative digital tool aimed at optimizing the design of sewerage networks, minimizing construction and operation costs. The tool, developed in Python and using genetic algorithms combined with heuristic programming (GA-HP), is designed to comply with current Colombian regulations. Its operation is divided into two stages: initially, the Genetic Algorithm identifies the optimal pipe diameters and the convergence of the cost function; subsequently, the Heuristic Programming adjusts the slopes and calculates the hydraulic characteristics along with the regulatory constraints of the network. Tests conducted in a hypothetical scenario demonstrated a notable reduction in total construction and operational costs, achieving a cost of \$276,954.01 USD, significantly lower than the original model (\$411,096.90 USD), considering that this value includes additional constraints for fair comparison. The developed tool is practical and accessible for hydraulic designers, proving capable of finding cost-effective solutions even under demanding conditions.

**Keywords:** Optimization, Sewerage, Genetic Algorithms, Convergence, Hydraulics, Heuristic Programming, Costs, Objective Function, Regulations, Constraints.

## 1. Introducción

El crecimiento demográfico acelerado a nivel global ha manifestado la necesidad de contar con infraestructuras eficientes para el manejo de drenajes urbanos. Los sistemas de alcantarillado son infraestructuras hidráulicas esenciales para la recolección y evacuación de aguas residuales y pluviales, desempeñando un papel crucial en la protección de la salud pública y el medio ambiente, al

controlar la contaminación proveniente de la escorrentía y las aguas residuales (López Cualla, 1995) así como para el entendimiento de las aplicaciones convencionales de las operaciones y procesos de tratamiento requeridos en la potabilización del agua. La presentación didáctica, con ejemplos y problemas resueltos y por resolver, es un aporte efectivo a la formación e instrucción exigidas en los cursos de ingeniería de tratamiento de aguas y constituye, con toda seguridad, una ayuda valiosa para adquirir o refrescar conocimientos indispensables en los cursos de ingeniería ambiental. El CD contiene programas de computador para el cálculo de diversos parámetros y diseño de la mayor parte de las estructuras hidráulicas explicadas en el texto, que complementan y afianzan los conceptos de diseño expuestos. En él se incluyen también las normas del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS. Estos sistemas pueden clasificarse en convencionales y no convencionales. Los sistemas convencionales, como los alcantarillados separados y combinados, cumplen con normativas técnicas más exigentes, especialmente en zonas con recursos económicos limitados. Por otro lado, los sistemas no convencionales, como el alcantarillado simplificado y los sistemas sin arrastre de sólidos, incorporan tecnologías más avanzadas, aunque se limitan a la evacuación de aguas residuales (López Cualla, 1995).

El diseño de redes de alcantarillado, especialmente en el contexto de los sistemas convencionales, requiere una planificación cuidadosa, tanto en términos técnicos como económicos, con el objetivo de asegurar la correcta operación de la red de drenaje. Una de las principales dificultades durante la fase de diseño es la estimación precisa de los costos, ya que el tiempo limitado en las primeras etapas del proyecto y restringe la capacidad del ingeniero para optimizar la estructura en términos de costo y eficiencia (Bizier, 2007). Principalmente, el diseño de redes de alcantarillado se ve influenciado por factores críticos como el diámetro y la pendiente de las tuberías. Una reducción en el diámetro puede resultar en un aumento de la pendiente, incrementando los costos de excavación, Por el contrario, el uso de diámetros mayores permite pendientes más suaves, pero también genera un impacto en los costos debido al incremento en el volumen de material a excavar y los requerimientos

de instalación (Afshar et al., 2011). Es por esta razón que la optimización de estos parámetros es crucial para lograr un equilibrio entre costos y eficiencia.

Históricamente, se han desarrollado diversas metodologías para la optimización del diseño de redes de alcantarillado, incluyendo programación lineal (Elimam, Charalambous & Ghobrial, 1989) no lineal (Price, 1978) dinámica (Li & Matthew, 1990; Walters & Templeman, 1979), métodos heurísticos (A. Afshar, 2002; Diogo et al., 2000; Miles & Heaney, 1988) y estrategias evolutivas, como algoritmos genéticos (GA) (Afshar, 2006a), algoritmos de optimización de colonias de hormigas (ACOA) (Afshar, 2006b), algoritmos de optimización de enjambres de partículas (PSO) (Afshar, 2008), los algoritmos Autómata Celular (CA) (Afshar et al., 2011), Algoritmos genéticos (GA) (Afshar, 2011), algoritmos Autómata Celular de dos fases para mejorar su eficiencia (Two-phase CA) (Afshar, Zaheri & Kim, 2016). Entre estos, los algoritmos genéticos combinados con programación heurística (GA-HP) (Hassan, Jassem & Mohammed, 2017). Estas metodologías han demostrado ser eficaces en la reducción de costos y la mejora de la eficiencia del diseño

Este estudio se enfoca en la creación y validación de una herramienta digital innovadora que utiliza algoritmos genéticos con programación heurística para optimizar el diseño de redes de alcantarillado y promoviendo soluciones costo-efectivas en la infraestructura, asegurando el cumplimiento con las normativas colombianas vigentes, específicamente la resolución 0330 de 2017 “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009” y la resolución 0799 de 2021 “Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017” expedidas por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio en Colombia,

## 2. Materiales y Métodos

El desarrollo de la herramienta digital se basa en la metodología GA-HP un modelo de optimización basado en Algoritmos Genéticos (AG) con Programación Heurística (PH) propuesto por Hassan,

Jassem & Mohammed, (2017), con una adaptación a las restricciones de la normativa colombiana. Se implementa por etapas adoptando un enfoque experimental, mediante la calibración y validación de parámetros de diseño, logrando ajustar variables independientes y observar sus efectos en variables dependientes, maximizando la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos para optimizar redes de alcantarillado de manera costo-efectiva.

La Ecuación 1, como función objetivo se formula bajo la premisa de resolver el problema de minimización de costos, buscando una convergencia a un valor óptimo.

$$\text{Min. } C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n f_i \left( d_i, \bar{Z}_i, C_i \right) \times L_i$$

*Ecuación 1. Formulada por Hassan, Jassem & Mohammed, (2017)*

Donde:  $C_{\text{total}}$  es el costo total de la red de alcantarillado,  $d_i$  es el diámetro de la tubería,  $Z_i$  es la profundidad media de excavación,  $C_i$  es el costo unitario de tubería y excavación, y  $L_i$  es la longitud de la tubería.

El modelo se basa en el uso de la PH para encontrar la pendiente óptima y calcular la función objetivo, implementando una modificación en la invocación del algoritmo PH, contando con el cálculo de las características hidráulicas de la red (Tabla 1) y las restricciones en cada tramo de tubería (Tabla 2). El enfoque del AG se implementó para encontrar el diámetro de tubería óptimo para cada tramo de la red y la convergencia de la función objetivo.

**Tabla 1.** Criterios hidráulicos

| Criterios hidráulicos                                                                         | Símbolo    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Caudal a tubo lleno (LPS)                                                                     | $Q_{full}$ |
| Velocidad a tubo lleno (m/seg)                                                                | $V_{full}$ |
| Relación entre caudal de diseño y caudal a tubo lleno                                         | $q/Q$      |
| Relación entre velocidad real y velocidad a tubo lleno                                        | $v/V$      |
| Relación entre lámina de agua y diámetro interno de la tubería                                | $h/D$      |
| Relación entre el radio hidráulico de la sección de flujo y radio hidráulico a tubo lleno     | $Rh/D$     |
| Relación entre profundidad hidráulica de la sección de flujo y diámetro interno de la tubería | $Yc/D$     |
| Velocidad Real en la sección de flujo (m/s)                                                   | $V_{real}$ |
| Altura de lámina de agua (m)                                                                  | $h$        |
| Profundidad hidráulica máxima (m)                                                             | $Yc$       |
| Numero de Froude                                                                              | $Frd$      |
| Régimen de Flujo                                                                              | $F_R$      |
| Altura de velocidad cinética (m)                                                              | $V^2/2g$   |
| Energía Específica (m)                                                                        | $E$        |
| Radio hidráulico (m)                                                                          | $hyd\_rad$ |
| Esfuerzo cortante ( $N/m^2$ )                                                                 | $T$        |

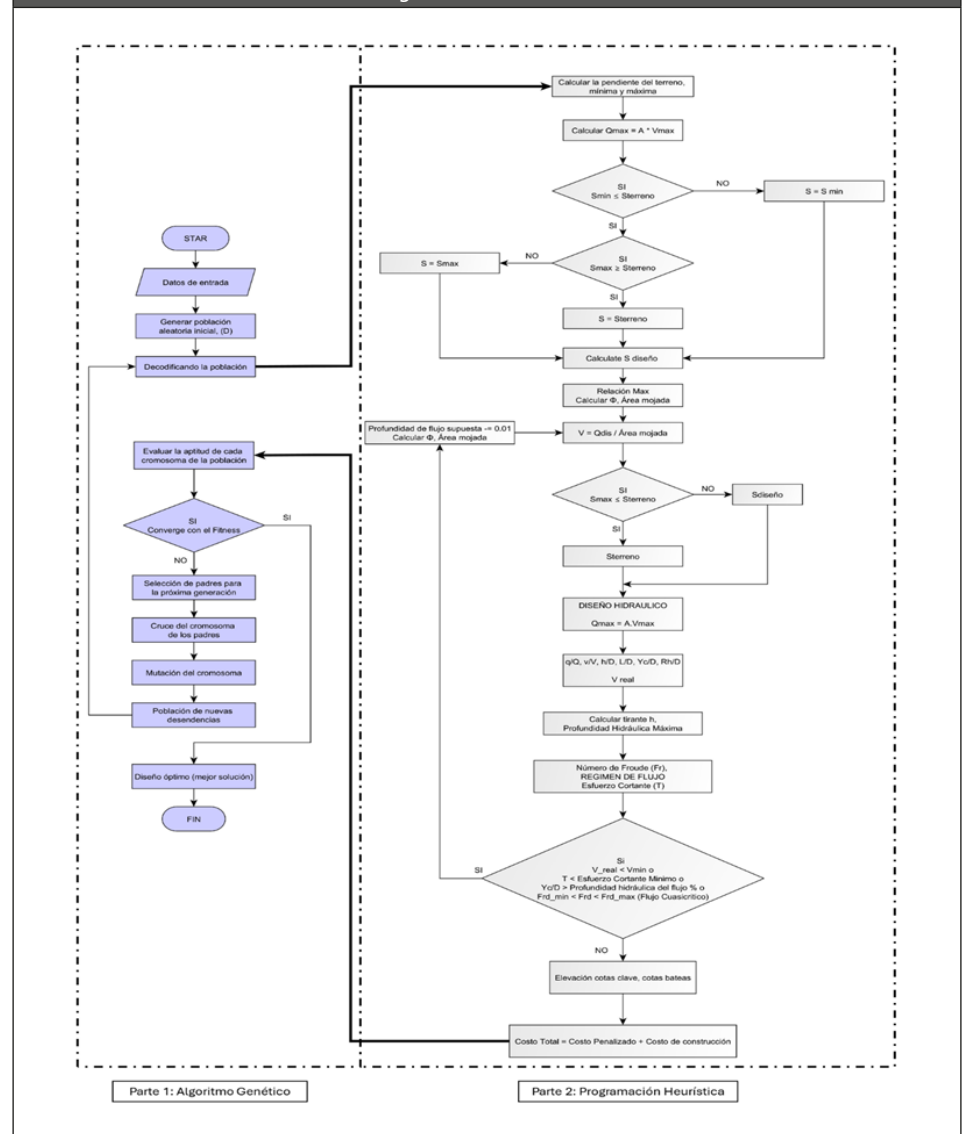
**Tabla 2.** Restricciones de diseño

| Restricciones                                | Condición                                                            |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Progresión del Diámetro                      | $D_i \geq D_{i-1}$                                                   |
| De Velocidad                                 | $V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$                                      |
| Mínimas de la Cubierta de la Tubería         | $C_{Terreno_i} - C_{Clave_i} \geq C_{min}$                           |
| Pendiente de Tubería                         | $S_{min} \leq S_i \leq S_{max}$                                      |
| Profundidad Hidráulica del Flujo             | $\frac{Y_c}{D_i} \leq \text{Profundidad hidráulica del flujo (\%)} $ |
| Régimen de Flujo                             | $Fr_i \leq 0,9 \quad , \quad Fr_i \geq 1,1$                          |
| Criterio de Autolimpieza (Esfuerzo Cortante) | $\tau_i \geq \tau_{min}$                                             |

La modificación propuesta al modelo AG-PH, permiten al modelo cumplir con la normativa colombiana y la optimización efectiva del diseño garantizando el funcionamiento eficiente y seguro del sistema

de alcantarillado. El diagrama de flujo (Figura 1) ilustra el modelo de optimización utilizado, que combina un Algoritmo Genético (Parte 1) y Programación Heurística (Parte 2) para el diseño de redes de alcantarillado. En la primera etapa, el Algoritmo Genético genera soluciones iniciales mediante una selección aleatoria de diámetros, evalúa su aptitud y selecciona las mejores combinaciones para converger hacia una solución óptima. En la segunda etapa, la Programación Heurística ajusta los parámetros hidráulicos y geométricos, como pendientes y profundidades, asegurando el cumplimiento de las restricciones adicionales.

**Figura 1.** Diagrama de flujo del modelo GA-HP Modificado. Parte 1 Algoritmo Genético, Parte 2: Programación Heurística



### *Desarrollo y Estructuración de la herramienta digital*

El código de optimización se estructuró en Python para garantizar eficiencia y accesibilidad. Para utilizar la herramienta, es esencial ingresar datos precisos sobre el trazado de la red y las condiciones de diseño en dos archivos nombrados “CSV: red\_alc.csv” y “datos\_iniciales.csv”. El primero contiene información detallada del trazado de la red, incluyendo identificadores de tramos y pozos, coordenadas, elevaciones, longitudes y caudales de diseño, siguiendo el orden de variables propuesto en la Tabla 3. El segundo archivo incluye los valores iniciales de los criterios y restricciones de diseño, como el coeficiente de Manning, velocidades mínima y máxima permitidas, diámetros comerciales disponibles y otros parámetros hidráulicos y geométricos relevantes como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 3.** Estructura del Archivo red\_alc.csv

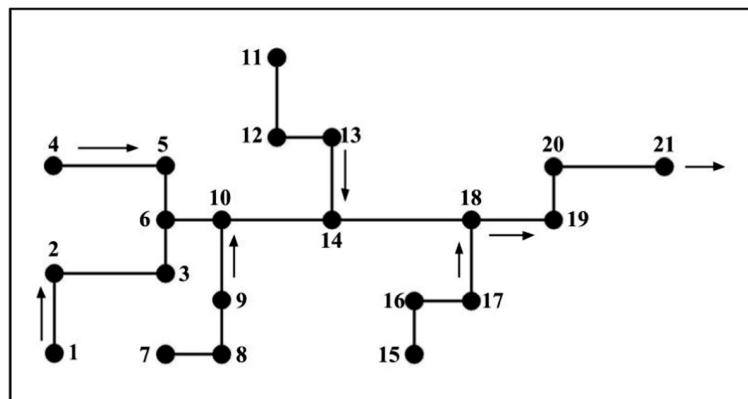
| Columna        | Significado                                           |
|----------------|-------------------------------------------------------|
| idd            | Identificación del tramo de tubería                   |
| pozo inicial   | Identificación del pozo inicial del tramo de tubería  |
| pozo final     | Identificación del pozo final del tramo de tubería    |
| sections       | Enumeración del orden de la red                       |
| type           | Tipo de pozo (1 para pozo inicial, 2 para pozo final) |
| x_initial      | Coordenada plana X del pozo inicial                   |
| y_initial      | Coordenada plana Y del pozo inicial                   |
| G_Elev_initial | Elevación del pozo inicial (m.s.n.m)                  |
| x_final        | Coordenada plana X del pozo final                     |
| y_final        | Coordenada plana Y del pozo final                     |
| G_Elev_final   | Elevación del pozo final (m.s.n.m)                    |
| Length         | Longitud del tramo de tubería (m)                     |
| Q_design       | Caudal de diseño para el tramo de tubería (LSP)       |

**Tabla 4.** Estructura del Archivo datos\_iniciales.csv

| Columna       | Significado                                                       |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|
| manning_cff   | Coefficiente de Manning                                           |
| flow_depth    | Porcentaje de la profundidad de flujo (m/m)                       |
| vel_min       | Velocidad mínima del flujo permitida (m/s)                        |
| vel_max       | Velocidad máxima del flujo permitida (m/s)                        |
| crown_exc_min | Excavación mínima a cota clave (m)                                |
| gravity       | Aceleración debida a la gravedad (m/s <sup>2</sup> )              |
| density       | Densidad del agua (N/m <sup>3</sup> )                             |
| froude_sbc    | Rangos del número de Froude para el régimen de flujo subcrítico   |
| froude_spc    | Rangos del número de Froude para el régimen de flujo supercrítico |
| d_manhole_min | Diámetro mínimo del pozo (m)                                      |
| diameter_com  | Lista de diámetros comerciales (m)                                |

### Validación del Modelo

La herramienta se validó en un escenario hipotético de una red de alcantarillado diseñado por Mays & Wenzel, (1976). La Figura 2 presenta la configuración de la red de alcantarillado con sus respectivos nodos y tuberías, mostrando la distribución de las conexiones y la dirección del flujo. La Tabla 5 detalla las características del escenario propuesto para algunos tramos, incluyendo la elevación del suelo, la longitud de las tuberías y los caudales de diseño.

**Figura 2.** Trazado del escenario propuesto. Fuente: Optimal design of multilevel branching sewer systems. (Mays & Wenzel, 1976)

**Tabla 5.** Fragmento de las características del escenario propuesto

| Nodo | Cota terreno (msnm) | Longitud (m) | Caudal (m <sup>3</sup> /s) | Caudal (L/s) |
|------|---------------------|--------------|----------------------------|--------------|
| 1 2  | 152,4000 150,8760   | 106,7        | 0,1132                     | 113,2        |
| 2 3  | 150,8760 148,4876   | 121,9        | 0,1982                     | 198,2        |
| 3 6  | 148,4876 146,3040   | 106,7        | 0,2548                     | 254,8        |
| 4 5  | 149,3520 147,8280   | 121,9        | 0,1132                     | 113,2        |
| 5 6  | 147,8280 146,3040   | 131,1        | 0,2265                     | 226,5        |
| 6 10 | 146,3040 143,2560   | 167,7        | 0,6229                     | 622,9        |

Fuente: Optimal design of multilevel branching sewer systems. (Mays & Wenzel, 1976)

La función de costo implementada fue desarrollada por Mays & Wenzel (1976) para el diseño óptimo de sistemas de alcantarillado. Esta función tiene como objetivo calcular el costo unitario de instalación de tuberías ( $C_p$ ) diferenciando entre distintos rangos de diámetros y profundidades (Ecuación 2) y el costo total de construcción de pozos ( $C_m$ ) en función de la profundidad media (Ecuación 3).

$$C_p = \begin{cases} 10,98D_i + 0,8Z - 5,98 & \forall D_i \leq 3's Z \leq 10' \\ 5,94D_i + 1,166Z + 0,504DZ - 9,64 & \forall D_i \leq 3's Z \geq 10' \\ 30,0D_i + 4,9Z - 105,9 & \forall D_i > 3's \end{cases}$$

Ecuación 2. Costo unitario de instalación de tuberías

$$C_m = 250 + Z_m^2$$

Ecuación 3 Costo total de construcción de pozos

Dónde:  $D_i$  = diámetro de la tubería (ft) y  $Z_m$  = excavación media (ft).

Se consideraron las siguientes restricciones: una profundidad de cobertura de 2,4 m, velocidades de flujo entre 0,6 m/s y 3,6 m/s, una profundidad de flujo del 82%, y un coeficiente de Manning de 0,013. Los diámetros comerciales de las tuberías de 254 mm, 304,8 mm, 381

mm, 457,2 mm, 533,4 mm, 762 mm, 914,4 mm, 1066,8 mm y 1219,2 mm. Además, se evaluó la eficiencia del algoritmo en función del número de diseños optimizados y el tiempo de cómputo necesario para alcanzar la solución más económica.

La configuración de los parámetros iniciales del algoritmo genético (AG) (Tabla 6), fue seleccionada para equilibrar la exploración del espacio de soluciones y la convergencia hacia el costo óptimo. Se ajustaron variables como el tamaño de la población, el número de generaciones y las tasas de cruce y mutación, siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez, Tapia Córdoba & Rodríguez del Nozal, (2020). Este enfoque permitió maximizar la eficiencia del algoritmo y garantizar las soluciones óptimas sin incurrir en altos costos computacionales.

**Tabla 6.** Configuración de los parámetros iniciales para el AG

| Parámetros              | Variable | Valor |
|-------------------------|----------|-------|
| Tamaño de la Población  | pop_size | 50    |
| Tamaño del Hall of Fame | hf       | 20    |
| Tasa de Cruce           | cxpb     | 0,9   |
| Tasa de Mutación        | mutpb    | 0,1   |
| Número de Generaciones  | ngen     | 100   |

### 3. Resultados y discusión

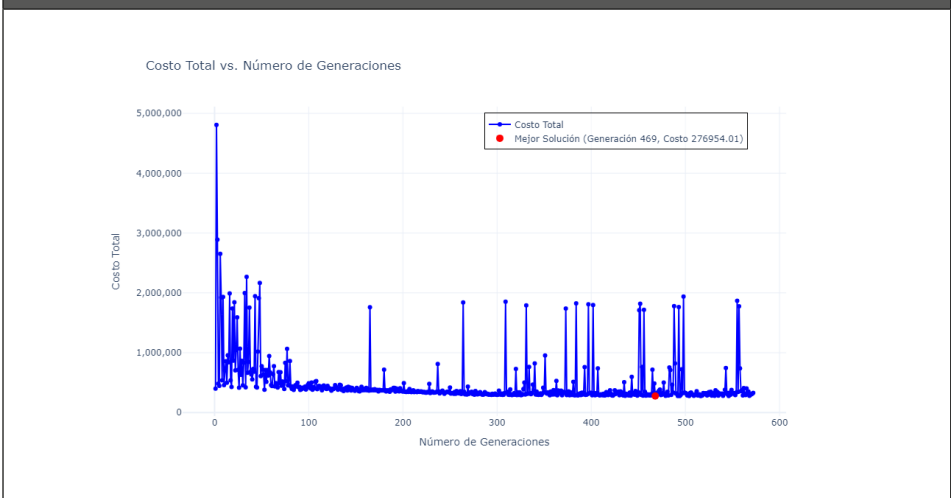
Los resultados obtenidos con la implementación del algoritmo genético se presentan en la Tabla 7, donde se resalta la exploración y optimización del espacio de soluciones. A lo largo de 572 iteraciones, el algoritmo logró converger hacia una solución óptima en la iteración 469. Adicionalmente, la secuencia óptima de diámetros de tuberías obtenida permitió optimizar los costos y cumplir con las restricciones hidráulicas. La mejor configuración incluye diámetros que van desde 381 mm hasta 1066,8 mm, lo que garantiza un diseño eficiente y ajustado a las normativas. El costo mínimo alcanzado por la mejor solución fue de \$276.954,01 USD, representando la solución óptima de todas las generaciones.

**Tabla 7.** Resultados del modelo para el escenario de la red de alcantarillado

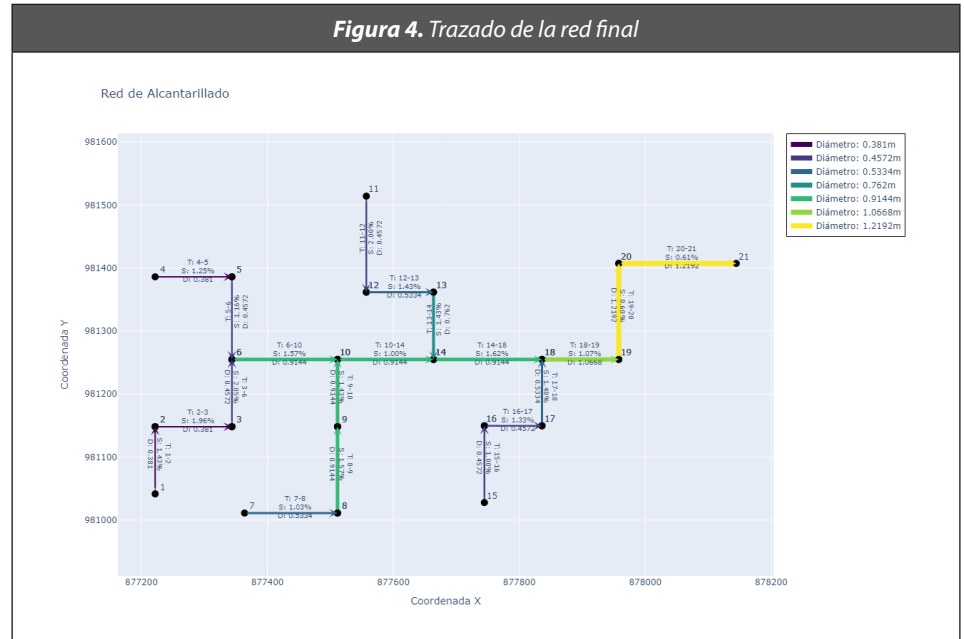
| RESULTADOS                       | Modelo Modificado (Estudio Actual)                                                                                                            |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Total generaciones               | 572                                                                                                                                           |
| Generación óptima                | 469                                                                                                                                           |
| Mejor solución de diámetros (mm) | [381,0, 381,0, 457,2, 381,0, 457,2, 762,0, 5334, 762,0, 762,0, 762,0, 457,2, 533,4, 609,6, 762,0, 457,2, 457,2, 533,4, 914,4, 1066,8, 1066,8] |
| Costo de la mejor solución       | \$ 276.954,01                                                                                                                                 |

La Figura 3 ilustra el desempeño del Modelo Modificado AG-PH en la optimización del costo total para todas las generaciones. Inicialmente, se observa una alta variabilidad en los costos debido a que las primeras generaciones de soluciones aleatorias no cumplen con las restricciones, lo que provoca penalizaciones de costos. Sin embargo, el algoritmo muestra una clara tendencia hacia la estabilización y reducción de los costos conforme avanza, alcanzando una solución óptima en la generación 469, siendo esta, la mejor solución en términos de eficiencia de costos y viabilidad técnica, cumpliendo con las restricciones hidráulicas. A pesar de algunos picos esporádicos generados por mutaciones, el algoritmo converge efectivamente hacia un costo bajo, logrando minimizar la función objetivo.

**Figura 3.** Soluciones de costo óptimo de cada generación. En rojo la generación óptima



La Figura 4 presenta el trazado final de la red de alcantarillado con la configuración óptima, considerando características topográficas y requisitos hidráulicos considerando la dirección del flujo, el diámetro y la pendiente de cada tramo.



Las restricciones hidráulicas impuestas por el modelo fueron cumplidas, asegurando un diseño óptimo para la red de alcantarillado. Se destacan parámetros clave como la velocidad del flujo, que previene la sedimentación y garantiza la autolimpieza de las tuberías, y la profundidad de flujo, mantenida por debajo del 82% para evitar el flujo a presión. Además, el régimen de flujo, mayormente supercrítico, asegura una alta velocidad que mejora el transporte de sedimentos, mientras que el esfuerzo cortante protege la integridad estructural de las tuberías, previniendo la erosión. En conjunto, estos factores garantizan que el diseño cumple con los requisitos técnicos, asegurando la eficiencia y durabilidad del sistema a largo plazo.

Para una comparación justa, se recalibró el modelo original incorporando las mismas restricciones adicionales aplicadas en el modelo modificado obteniendo un costo mayor de \$ 411.096,90 USD al costo óptimo \$ 239.672,00 USD del modelo original (Tabla 8). Esto

permite evaluar objetivamente la eficiencia de ambos enfoques de optimización.

**Tabla 8.** Comparación de resultados Modelo Original - Modelo Modificado

| RESULTADOS                          | Modelo Original de Hassan, Jassem & Mohammed, (2017)                                                                                    | Modelo Modificado (Estudio Actual)                                                                                                             |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mejor solución de diámetros (mm)    | [304,8, 381,0, 381,0, 304,8, 457,2, 533,4, 381,0, 457,2, 533,4, 762,0, 381,0, 533,4, 533,4, 914,4, 304,8, 381,0, 457,2, 1066,8, 1066,8] | [381,0, 381,0, 457,2, 381,0, 457,2, 762,0, 533,4, 762,0, 762,0, 762,0, 457,2, 533,4, 609,6, 762,0, 457,2, 457,2, 533,4, 914,4, 1066,8, 1066,8] |
| Costo original                      | \$ 239.672 USD                                                                                                                          | -                                                                                                                                              |
| Costo con restricciones adicionales | \$ 411.096,90 USD                                                                                                                       | \$ 276.954,01 USD                                                                                                                              |
| Número de generaciones              | 38                                                                                                                                      | 469                                                                                                                                            |

Incluir las restricciones adicionales incrementó el costo del modelo original en un 148%, destacando el impacto significativo de parámetros más rigurosos en el costo final de \$411.096,89 USD. Sin embargo, el modelo modificado, a pesar de requerir más generaciones, logró un costo de \$276.954,01 USD bajo las mismas condiciones. Las diferencias en el diseño del algoritmo y el lenguaje de programación también influyeron en el número de generaciones necesarias. Además, el modelo modificado tiende a seleccionar diámetros más grandes debido a las restricciones hidráulicas adicionales, lo que optimiza el flujo y reduce los costos a largo plazo.

#### 4. Conclusiones y Recomendaciones

Este estudio desarrolló y evaluó un modelo modificado de Algoritmo Genético con Programación Heurística (AG-PH) para la optimización de redes de alcantarillado, implementado una herramienta digital accesible y práctica para los diseñadores hidráulicos. El análisis se centra en la respuesta del modelo modificado incluyendo restricciones hidráulicas basadas en la normativa colombiana vigente para el diseño de redes

de alcantarillado. Además, el modelo demostró una notable capacidad para minimizar los costos operativos y de construcción, destacando su eficiencia en la resolución de problemas complejos y multidimensionales ofreciendo soluciones más eficientes en el diseño de redes de alcantarillado. Estos hallazgos abren nuevas oportunidades de investigación, sugiriendo mejoras en las metodologías de optimización y la importancia de profundizar en el análisis del impacto de las variables hidráulicas para el diseño en el manejo de mejor eficiencia y costo del sistema.

Una de las principales ventajas de la herramienta digital desarrollada es su flexibilidad para adaptarse a diferentes configuraciones de redes de alcantarillado, siempre y cuando el usuario tenga conocimientos básicos de programación y una comprensión general de los algoritmos genéticos, que constituyen la base de su funcionamiento. La correcta configuración de parámetros como el tamaño de la población, las tasas de mutación y cruce, el tamaño del Hall of Fame y el número de generaciones, es esencial para optimizar su desempeño según las necesidades específicas de cada proyecto. Por lo tanto, esta herramienta no solo proporciona soluciones costo-efectivas, sino que también fomenta un aprendizaje práctico en torno a los conceptos y técnicas avanzadas de optimización. Adicionalmente, la implementación en Python facilita su uso y adaptación, abriendo la puerta a futuras investigaciones y mejoras en el diseño de redes hidráulicas.

En futuras investigaciones, se sugiere desarrollar una interfaz gráfica de usuario (GUI) para hacer que la herramienta sea más accesible y fácil de usar, especialmente para aquellos sin conocimientos de programación, mejorando así su aplicabilidad. También sería útil modificar o crear nuevas funciones objetivo, enfocadas en la minimización de costos, adaptándolas a las características específicas de las redes de alcantarillado en diversos escenarios. Además, se recomienda realizar pruebas exhaustivas en diferentes condiciones para validar la robustez y fiabilidad de la herramienta, permitiendo identificar y corregir posibles errores. Otro aspecto importante es incluir el diseño para pozos con estaciones de bombeo, lo cual ampliará el alcance de la herramienta en áreas con topografía variada donde el flujo por gravedad no es viable.

Finalmente, se sugiere explorar nuevas técnicas de optimización, como aquellas basadas en inteligencia artificial o aprendizaje automático, para mejorar la precisión y la eficiencia en el diseño de redes de alcantarillado.

## 5. Referencias

- Afshar, H. Z. (2002). *An improved storm water network design model in spreadsheet template*. International Journal of Engineering and Science.
- Afshar, M. H. (2006a). Application of a genetic algorithm to storm sewer network optimization. *Scientia Iranica*, 13(3), 234–244.
- Afshar, M. H. (2006b). Improving the efficiency of ant algorithms using adaptive refinement: Application to storm water network design. *Advances in Water Resources*, 29(9), 1371–1382. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.10.013>
- Afshar, M. H. (2008). Rebirthing particle swarm optimization algorithm: application to storm water network design. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(10), 1120–1127. <https://doi.org/10.1139/L08-056>
- Afshar, M. H. (2011). Rebirthing genetic algorithm for storm sewer network design. *Scientia Iranica*, 19(1), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.12.005>
- Afshar, M. H.; Shahidi, M.; Rohani, M.; Sargolzaei, M. (2011). Application of cellular automata to sewer network optimization problems. *Scientia Iranica*, 18(3 A), 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.037>
- Afshar, M. H.; Zaheri, M. M.; Kim, J. H. (2016). Improving the efficiency of cellular automata for sewer network design optimization problems using adaptive refinement. *Procedia Engineering*, 154, 1439–1447. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.517>
- Bizier, P.; Water Environment Federation (WEF); American Society of Civil Engineers (ASCE). (2007). *Gravity sanitary sewer design and construction* (WPCF Manual Practice No. FD-5). American Society of Civil Engineers.
- Diogo, A.; Walters, G.; Sousa, E.; Graveto, V. (2000). Three-dimensional optimization of urban drainage systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15, 409–426. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00204>
- Elimam, A. A.; Charalambous, C.; Ghobrial, F. H. (1989). Optimum design of large sewer networks. *Seattle University*, 115(6), 1171–1190.
- Gutiérrez, D.; Tapia Córdoba, A.; Rodríguez del Nozal, Á. (2020). *Algoritmos genéticos con Python: Un enfoque práctico para resolver problemas de ingeniería*. Marcombo.
- Hassan, W. H.; Jassem, M. H.; Mohammed, S. S. (2017). A GA-HP model for the optimal design of sewer networks. *Water Resources Management*, 32(3), 865–879.

<https://doi.org/10.1007/s11269-017-1843-y>

- Li, G.; Matthew, R. (1990). New approach for optimization of urban drainage systems. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, 116. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1990\)116:5\(927\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1990)116:5(927))
- López Cualla, R. A. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Mays, L. W.; Wenzel, H. G. (1976). Optimal design of multilevel branching sewer systems. *Water Resources Research*, 12(5), 913–917. <https://doi.org/10.1029/WR012i005p00913>
- Miles, S. W.; Heaney, J. P. (1988). Better than “optimal” method for designing drainage systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(5), 477–499. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1988\)114:5\(477\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:5(477))
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2016). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS Título D: Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y aguas lluvias*. República de Colombia. [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO\\_D.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO_D.pdf)
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 de 2017*. República de Colombia. <http://www.minvivienda.gov.co/Resoluciones-Agua/0330%20-%202017.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). *Resolución 0799 de 2021*. República de Colombia. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/resolucion-799-de-2021.pdf>
- Price, R. K. (1978). Design of storm water sewers for minimum construction cost. En *Proc. 1st Int. Conf. on Urban Storm Drainage*, Southampton, UK, 636–647.
- Walters, G. A.; Templeman, A. B. (1979). Non-optimal dynamic programming algorithms in the design of minimum cost drainage systems. *Engineering Optimization*, 4(3), 139–148. <https://doi.org/10.1080/03052157908902416>