

**PROYECTO DE GRADO**  
**Ingeniería Civil**

**METODOLOGÍAS Y ECUACIONES PARA ESTABLECER LA RESILIENCIA  
DE UNA RED DE ALCANTARILLADO DENTRO DE UN PROCESO DE  
OPTIMIZACIÓN MULTICRITERIO**

**David Alejandro Rivera Ojeda**

**Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**  
**BOGOTÁ D.C.**  
**2024**

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios, por ser mi fortaleza y guiar cada paso de este camino,*

*A mis padres, Zoila y Ovidio, por su comprensión y apoyo incondicional,*

*A mi asesor, Juan Saldarriaga, por todas sus enseñanzas y por su acompañamiento  
constante en el desarrollo de esta investigación,*

*A mis compañeros y amigos del grupo de investigación CIACUA, por sus  
recomendaciones y valiosos aportes,*

*A todos quienes aportaron un granito de arena y fueron voz de aliento para finalizar  
esta maravillosa etapa.*



## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción .....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo General.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos .....	2
2	Antecedentes .....	3
3	Marco teórico .....	5
3.1	Redes de drenaje urbano.....	5
3.2	Metodología de diseño hidráulico optimizado – UTOPIA.....	6
3.2.1	Definición del problema .....	6
3.2.2	Selección del trazado .....	9
3.2.3	Criterios de selección.....	12
3.2.4	Diseño hidráulico.....	16
3.3	Restricciones de diseño .....	18
3.3.1	Restricciones hidráulicas .....	18
3.3.2	Restricciones comerciales.....	19
3.4	Funciones de costos .....	19
3.5	Índice de resiliencia en redes de drenaje urbano .....	20
4	Metodología .....	22
4.1	Procedimiento y herramientas utilizadas .....	22
4.2	Casos de estudio .....	25
4.2.1	Chicó Sur .....	26
4.2.2	Chicó Norte .....	27
5	Resultados .....	29
5.1	Chicó Sur .....	29
5.1.1	Resiliencia y árbol de la red .....	29
5.1.2	Resiliencia, relación de llenado y costo de diseño .....	32



---

5.1.3	Resiliencia, relación de llenado y costo de diseño para el doble del caudal ....	34
5.1.4	Resiliencia, relación de llenado y costo de diseño para otras modificaciones .	36
5.1.5	Relación de llenado para las diferentes tuberías de la red Chicó Sur .....	38
5.2	Chicó Norte .....	41
6	Análisis de resultados .....	44
6.1	Análisis de la red Chicó Sur .....	44
6.1.1	Índice de resiliencia y correlación entre los árboles de la red .....	44
6.1.2	Relación de llenado, costo y resiliencia.....	45
6.1.3	Evaluación con caudales modificados .....	45
6.2	Análisis de la red Chicó Norte.....	46
6.2.1	Condiciones topográficas y limitaciones .....	46
6.2.2	Costo y resiliencia .....	46
6.3	Comparación entre redes de estudio.....	46
7	Conclusiones .....	48
8	Recomendaciones.....	49
9	Bibliografía.....	50
10	Anexos .....	52
	Anexo 1: Patrones en tuberías de mayor flujo de caudal para los diferentes criterios .....	52



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferencia entre grafos no dirigidos y dirigidos. Adaptado de: (Duque 2015, pág. 26).....	6
Figura 2. Red de alcantarillado. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 28).....	7
Figura 3. Posible trazado de una red de alcantarillado. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 29) .....	8
Figura 4. Diseño hidráulico de una tubería. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 31).....	9
Figura 5. Tipos de tuberías para cada tramo de una red de alcantarillado. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 34) .....	10
Figura 6. Grafo para la selección del trazado de una red de alcantarillado. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 35) .....	10
Figura 7. Posibles variables de decisión por tramo. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 35).....	11
Figura 8. Conjunto de nodos que pertenecen a un mismo pozo de inspección. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 44).....	17
Figura 9. Solución para el diseño hidráulico de una red ejemplo. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 67) .....	17
Figura 10. Funcionamiento UTOPIA. Tomado de: (Saldarriaga, 2023) .....	18
Figura 11. Esquema de uso de herramientas UTOPIA .....	23
Figura 12. Procesamiento de datos y extensiones empleadas.....	23
Figura 13. Script implementando API de EPA SWMM en Python.....	25
Figura 14. Ubicación red Chicó Sur .....	26
Figura 15. Nodos y enlaces red Chicó Sur .....	26
Figura 16. Ubicación red Chicó Norte.....	27
Figura 17. Nodos y enlaces red Chicó Norte.....	28
Figura 18. Identificación de tuberías con mayores caudales C2 – Chicó Sur.....	31
Figura 19. Costo vs. Relación de llenado – C1 – Chicó Sur.....	33
Figura 20. Resiliencia vs. Relación de llenado – C1 – Chicó Sur .....	34
Figura 21. Costo vs. Relación de llenado – C1 para el doble del caudal – Chicó Sur.....	35
Figura 22. Resiliencia vs. Relación de llenado – C1 para el doble del caudal – Chicó Sur.....	36
Figura 23. Costo vs. Relación de llenado – C1 para diferentes configuraciones de caudal – Chicó Sur.....	37
Figura 24. Resiliencia vs. Relación de llenado – C1 para diferentes configuraciones de caudal – Chicó Sur .	38
Figura 25. Relación de llenado por tubería de la red Chicó Sur - C1 - YnD: 0.55 .....	39
Figura 26. Relación de llenado por tubería de la red Chicó Sur - C1 - YnD: 0.7 .....	39
Figura 27. Relación de llenado por tubería de la red Chicó Sur - C1 - YnD: 0.85 .....	40



---

Figura 28. Relación de llenado por tubería de la red Chicó Sur - C1 - $Y_nD$ : 0.93 .....	40
Figura 29. Topografía red Chicó Norte .....	41
Figura 30. Costo vs. Relación de llenado – C1 – Chicó Norte .....	42
Figura 31. Resiliencia vs. Relación de llenado – C1 – Chicó Norte.....	43
Figura 32. Identificación de tuberías con mayores caudales C2 y C3 – Chicó Sur .....	52
Figura 33. Identificación de tuberías con mayores caudales C10 y C18 – Chicó Sur .....	52
Figura 34. Identificación de tuberías con mayores caudales C22 y C28 – Chicó Sur .....	52



---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Restricciones hidráulicas. Tomado de: (Saldarriaga et al., 2021).....	19
Tabla 2. Constantes de la función de costos de Maurer et al. (2010). .....	20
Tabla 3. Índice de resiliencia para cada criterio en la red Chicó Sur.....	29
Tabla 4. Cálculo manual del índice de resiliencia a partir de las tuberías con mayor paso de caudal – Chicó Sur .....	31
Tabla 5. Comparación entre metodologías para el cálculo del índice de resiliencia – Chicó Sur .....	32
Tabla 6. Compilado de resultados de relación de llenado, costo y resiliencia – Chicó Sur.....	33
Tabla 7. Compilado de resultados de relación de llenado, costo y resiliencia para el doble del caudal – Chicó Sur .....	35
Tabla 8. Compilado de resultados de relación de llenado, costo y resiliencia para la mitad del caudal – Chicó Sur .....	37
Tabla 9. Compilado de resultados de relación de llenado, costo y resiliencia para cinco veces el caudal – Chicó Sur .....	37
Tabla 10. Compilado de resultados de relación de llenado, costo y resiliencia – Chicó Norte .....	42



---

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1</b> .....	10
<b>Ecuación 2</b> .....	12
<b>Ecuación 3</b> .....	12
<b>Ecuación 4</b> .....	12
<b>Ecuación 5</b> .....	13
<b>Ecuación 6</b> .....	13
<b>Ecuación 7</b> .....	13
<b>Ecuación 8</b> .....	13
<b>Ecuación 9</b> .....	13
<b>Ecuación 10</b> .....	13
<b>Ecuación 11</b> .....	13
<b>Ecuación 12</b> .....	14
<b>Ecuación 13</b> .....	14
<b>Ecuación 14</b> .....	14
<b>Ecuación 15</b> .....	14
<b>Ecuación 16</b> .....	14
<b>Ecuación 17</b> .....	14
<b>Ecuación 18</b> .....	15
<b>Ecuación 19</b> .....	15
<b>Ecuación 20</b> .....	15
<b>Ecuación 21</b> .....	15
<b>Ecuación 22</b> .....	15
<b>Ecuación 23</b> .....	15
<b>Ecuación 24</b> .....	15
<b>Ecuación 25</b> .....	15
<b>Ecuación 26</b> .....	16
<b>Ecuación 27</b> .....	16
<b>Ecuación 28</b> .....	16
<b>Ecuación 29</b> .....	16



---

<b>Ecuación 30</b> .....	16
<b>Ecuación 31</b> .....	19
<b>Ecuación 32</b> .....	20
<b>Ecuación 31</b> .....	21
<b>Ecuación 32</b> .....	21



## 1 INTRODUCCIÓN

El diseño y la gestión de los sistemas de alcantarillado han desempeñado históricamente un papel crucial en el desarrollo de las ciudades. Desde sus primeras aplicaciones, estas infraestructuras han sido concebidas con el propósito de garantizar la recolección y disposición adecuada de las aguas residuales y pluviales, centrándose en conceptos clave como la capacidad hidráulica y la eficiencia económica. Estos principios han guiado la planificación de las redes de alcantarillado para responder a las demandas del crecimiento urbano, asegurando su funcionalidad en escenarios cotidianos y minimizando los riesgos asociados a su operación.

Sin embargo, el panorama actual exige ir más allá de estos fundamentos. Factores como el cambio climático, el crecimiento demográfico acelerado y la intensificación de eventos extremos de precipitación han puesto en evidencia las limitaciones de las infraestructuras tradicionales. Estas redes, diseñadas bajo condiciones históricas y estándares que no consideraban plenamente la magnitud e imprevisibilidad de los desafíos actuales, enfrentan una creciente vulnerabilidad ante fallas funcionales y estructurales. Eventos como inundaciones urbanas, colapsos de tuberías o bloqueos en los sistemas ponen de manifiesto la necesidad de integrar enfoques más avanzados y adaptativos en su diseño y operación.

En este contexto, surge el concepto de resiliencia como un enfoque innovador y transformador para la planificación y gestión de los sistemas de alcantarillado. Según Butler et al. (2014), la resiliencia se define como la capacidad de un sistema para minimizar las fallas del servicio en términos de magnitud y duración, manteniendo niveles aceptables de funcionalidad y recuperándose rápidamente tras una interrupción. Este enfoque no solo busca prevenir fallas bajo condiciones normales, sino también garantizar que las redes puedan soportar y superar condiciones excepcionales, como lluvias extremas, bloqueos y colapsos.

La investigación realizada por Mugume et al. (2015) propone un índice de resiliencia para sistemas de drenaje urbano que combina la evaluación de la magnitud y duración de las fallas, ofreciendo una metodología innovadora para caracterizar la resiliencia de estas redes. Este índice proporciona una métrica cuantitativa para evaluar la capacidad residual del sistema tras eventos disruptivos que pongan en peligro el funcionamiento óptimo de la red.



Incorporar la resiliencia en los sistemas de alcantarillado implica adoptar un marco analítico que permita evaluar no solo la confiabilidad del sistema ante amenazas conocidas, sino también su capacidad para adaptarse y responder a amenazas emergentes e imprevisibles. Para ello, se requieren metodologías cuantitativas y herramientas analíticas robustas que combinen conceptos tradicionales, como el diseño basado en la capacidad hidráulica, con enfoques modernos como la optimización multicriterio. Este enfoque permite equilibrar múltiples objetivos, desde el costo hasta la capacidad de recuperación del sistema.

Con este propósito, la presente investigación se enfoca en evaluar y verificar la validez del índice de resiliencia propuesto por Mugume et al. (2015) en redes de alcantarillado locales. Adicionalmente, se busca analizar si existe algún tipo de relación entre el índice de resiliencia y la estructura del árbol de la red de alcantarillado, explorando cómo la configuración y conectividad del sistema podrían influir en el costo de la red y en su capacidad para resistir y recuperarse de fallas. Este enfoque permitirá diseñar infraestructuras más robustas, sostenibles y preparadas para enfrentar los crecientes desafíos ambientales y urbanos, contribuyendo al desarrollo de ciudades más resilientes y adaptativas.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

Evaluar y verificar la validez del índice de resiliencia propuesto por Mugume et al. (2015) en redes de alcantarillado locales, analizando su relación con la estructura del árbol de la red y su influencia en el costo y la capacidad del sistema para resistir y recuperarse de fallas.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la aplicabilidad del índice de resiliencia en redes de alcantarillado locales mediante su análisis en diferentes escenarios de operación.
- Explorar la relación entre el índice de resiliencia y la configuración estructural del árbol de la red de alcantarillado, identificando patrones de conectividad que influyan en su desempeño.
- Evaluar el impacto de la configuración y conectividad de la red en el costo total del sistema y en su capacidad para resistir y recuperarse de perturbaciones externas e internas.



## 2 ANTECEDENTES

El diseño de redes de drenaje urbano ha sido un tema de interés en diversas investigaciones, especialmente en el ámbito de la optimización y la resiliencia. Estas redes son fundamentales para la evacuación de aguas residuales y pluviales, contribuyendo al saneamiento y la prevención de problemas de salud pública y ambientales. En este contexto, múltiples estudios han abordado la optimización de estas infraestructuras, integrando objetivos como la minimización de costos y la maximización de la funcionalidad.

En el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillado (CIACUA) de la Universidad de los Andes, se han desarrollado metodologías innovadoras para el diseño optimizado de redes de drenaje urbano. Los trabajos iniciales, como los de Natalia Duque (2013, 2015), se centraron en minimizar costos mediante el diseño hidráulico y la selección de trazados óptimos, utilizando modelos de programación entera mixta para garantizar conexiones eficientes en las redes. Sin embargo, estas metodologías no garantizaban soluciones globalmente óptimas debido a la naturaleza aleatoria de los trazados iniciales.

Posteriormente, Andrés Aguilar (2016, 2019) propuso avances significativos al conectar la selección del trazado y el diseño hidráulico mediante funciones linealizadas de costos. Además, introdujo un enfoque de optimización multiobjetivo para maximizar la resiliencia, utilizando índices que evalúan el impacto de las fallas en la red. Su metodología incorporó el algoritmo *Non-Inferior Set Estimation* (NISE), permitiendo la creación de fronteras de Pareto que balancean costos y resiliencia. Por último, Juana Herrán (2020) enriqueció este marco al proponer nuevos índices de resiliencia, como los de distancia, altura, y combinaciones de ambos, ampliando las posibilidades de análisis y diseño.

A nivel internacional, destacan los trabajos de Mugume et al. (2015), quienes propusieron un índice de resiliencia para redes de drenaje urbano que evalúa la capacidad del sistema para mantener niveles aceptables de funcionalidad ante fallas, integrando la magnitud y la duración de estas. Su metodología marcó un hito en la evaluación cuantitativa de la resiliencia, permitiendo analizar cómo las redes pueden resistir y recuperarse tras perturbaciones. Este enfoque ha servido como base para investigaciones posteriores en resiliencia estructural y funcional.

Asimismo, Haghghi y Bakshipour (2016) se han centrado en metodologías de optimización, como programación no lineal y algoritmos genéticos, incorporando índices



---

basados en la probabilidad de falla de las tuberías. Aunque estos trabajos no se basan directamente en la propuesta de Mugume et al. (2015), comparten el objetivo de fortalecer la resiliencia de las redes frente a escenarios disruptivos.

Este panorama evidencia la necesidad de evaluar y adaptar estas metodologías e índices a redes locales, considerando sus características específicas y explorando nuevas relaciones entre la estructura del árbol de la red y su resiliencia. La presente investigación busca contribuir a este campo, abordando estos aspectos desde un enfoque contextualizado y riguroso.



## 3 MARCO TEÓRICO

### 3.1 Redes de drenaje urbano

Las redes de drenaje urbano son sistemas de infraestructura fundamentales que gestionan la recolección y evacuación de aguas residuales y pluviales en áreas urbanizadas, previniendo inundaciones y garantizando condiciones sanitarias adecuadas. En Colombia, la cobertura de alcantarillado varía significativamente entre regiones y entre zonas urbanas y rurales. Según el *Informe Nacional de Coberturas de los Servicios Públicos de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de 2022*, en el ámbito urbano, el 90% de los municipios reportan coberturas superiores al 90%, mientras que en el ámbito rural, el 76% de los municipios presentan coberturas iguales o inferiores al 15%. Estas cifras evidencian la necesidad de fortalecer y ampliar las redes de drenaje urbano, especialmente en áreas rurales, para mejorar la calidad de vida y reducir riesgos asociados a la falta de saneamiento (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2022).

Además, el crecimiento urbano no planificado y el cambio climático han generado desafíos adicionales, como la insuficiencia de capacidad en las redes para manejar eventos extremos de lluvia. Esto ha llevado a la implementación de soluciones innovadoras como los sistemas de drenaje sostenible (SUDS), que buscan integrar la infraestructura gris con elementos naturales para gestionar las aguas pluviales de manera más eficiente y ecológica.

El papel de las redes de drenaje urbano en Colombia va más allá de su función técnica; estas infraestructuras son clave para mejorar la calidad de vida, garantizar la salud pública, proteger los recursos naturales y fortalecer la resiliencia de las ciudades frente a los efectos del cambio climático. Sin embargo, su desarrollo y mantenimiento requieren inversiones significativas, una gobernanza eficiente y un marco normativo que fomente la planificación integrada y la participación comunitaria.

Es importante resaltar que las redes de drenaje urbano no son estructuras triviales ni limitadas a simples tuberías; son sistemas complejos que integran diversos componentes diseñados para garantizar su correcto funcionamiento y adaptarse a las necesidades de las ciudades. Según el Reglamento Técnico del Sector de Saneamiento Básico y Agua Potable, conocido como RAS 2000, entre sus elementos más relevantes se encuentran:

- **Estructuras de bombeo:** Aunque costosas, son necesarias en casos donde el flujo no puede transportarse por gravedad.



- **Sistemas de almacenamiento temporal:** Retienen el agua durante picos de caudal para homogenizar los flujos.
- **Aliviaderos:** Separan los excesos de caudal, dirigiéndolos a sistemas de almacenamiento o drenaje pluvial.
- **Pozos de inspección:** Permiten el acceso para mantenimiento, el cambio de dirección del flujo y modificaciones en los diámetros de las tuberías.
- **Cámaras de caída:** Disipan la energía del flujo y protegen la infraestructura de daños causados por flujos supercríticos.
- **Sumideros invertidos:** Permiten superar obstáculos inevitables (Aguilar, 2019).
- **Canales abiertos:** Conducen aguas lluvias hacia cuerpos receptores.
- **Sumideros:** Ubicados en bordes de andenes, recogen el agua de escorrentía y la conducen hacia los pozos de inspección.
- **Acometidas:** Recogen el agua residual doméstica y la conducen al sistema de alcantarillado.
- **Canales y bajantes:** Recolectan el agua lluvia de los techos.

## 3.2 Metodología de diseño hidráulico optimizado – UTOPIA

### 3.2.1 Definición del problema

Según Duque (2015), el problema del diseño óptimo de sistemas de drenaje urbano recae sobre dos partes principales: la selección de la disposición física de la red y la planificación hidráulica. Cada uno de ellos requiere diferentes conjuntos de variables y restricciones con enfoques metodológicos diferentes. Primero, para la disposición física de la red, teniendo en cuenta su carácter topológico, es posible analizar el problema como un tema de flujo de redes, donde las tuberías pueden representarse como grafos no direccionales. Luego, es necesario aplicar un algoritmo que emplee una función objetivo que se encargue de minimizar criterios como costos, distancias, fiabilidad, entre otros; haciendo que los enlaces del nodo adquieran una dirección, tal como se muestra en la siguiente Figura:

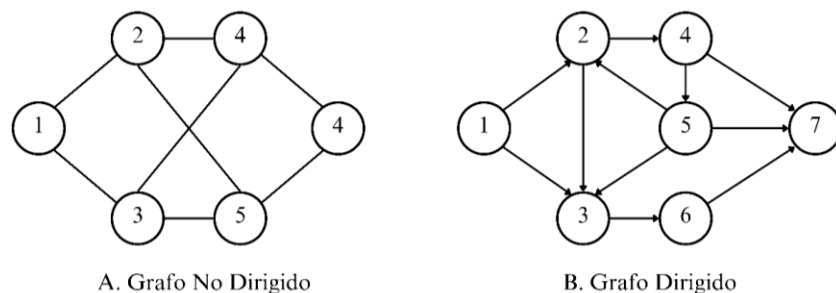


Figura 1. Diferencia entre grafos no dirigidos y dirigidos. Adaptado de: (Duque 2015, pág. 26)



En la Figura 1 (B), se entiende que los nodos numerados corresponden a los pozos de captación y los enlaces representan la función que llevan a cabo las tuberías de la red, es decir, conducir las aguas recolectadas. Estos enlaces, además, están representados con flechas direccionadas, permitiendo observar el flujo que tendría el agua y la cantidad que transportan, hasta finalizar en el nodo 7. Para llevar a cabo el proceso de direcciones del grafo, se debe partir de la premisa de que existan tuberías en cada calle y puntos de captación en cada esquina.

La principal limitación de la disposición física es que la red resultante debe tener una estructura tipo árbol. Esto significa que no pueden existir circuitos cerrados dentro de la red. Si se analiza la Figura 1 (B), el circuito 5-2-3 representa un circuito cerrado y, por esa razón, no se puede considerar como una disposición factible de las direcciones de las tuberías.

Teniendo en cuenta lo anterior, surge la necesidad de introducir un concepto que permita solucionar este inconveniente: tuberías iniciales y continuas. Una tubería inicial es aquella que no presenta secciones conectadas aguas arriba y su caudal de diseño está determinado por el porcentaje de aportación proveniente del punto de captación aguas arriba. Por el contrario, una tubería continua recibe todo el aporte de las secciones que se encuentran aguas arriba y se añade el caudal proveniente del punto de captación del cual comienza (Duque, 2015). Considérese la siguiente red:

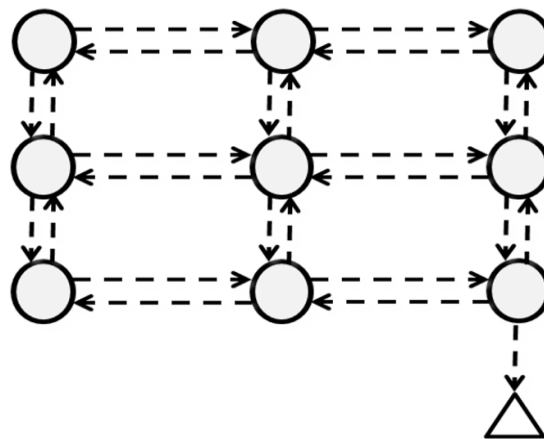
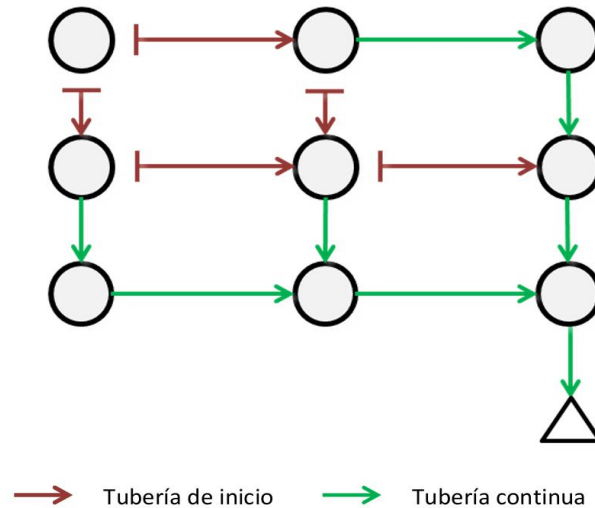


Figura 2. Red de alcantarillado. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 28)

La red compuesta por 9 puntos de captación (círculos) y un punto de descarga (triángulo) se ha representado utilizando la teoría de grafos no dirigidos. Así, surge un mundo muy amplio de posibilidades para determinar la disposición física de la red, de tal manera que el flujo de agua hacia los puntos de captación sea conducido hacia la salida, logrando que no



se formen circuitos cerrados en el trazado resultante. Una posible configuración de la red mostrada en la Figura 2 podría ser la siguiente:



**Figura 3. Posible trazado de una red de alcantarillado. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 29)**

Basándose en las ideas planteadas por Duque (2015), la Figura 3 muestra claramente cómo la implementación del concepto de tuberías iniciales puede interrumpir los circuitos cerrados, permitiendo una configuración funcional sin necesidad de eliminar partes de la red. Además, una regla clave para el diseño de trazados abiertos indica que, desde cada punto de captación, puede partir como máximo una única tubería continua, lo cual se refleja en el diseño presentado en la figura mencionada. Una vez establecido el trazado, se puede calcular el caudal de diseño correspondiente a cada tramo, el cual servirá como dato inicial para proceder con el diseño hidráulico de las tuberías. Los datos requeridos para definir el trazado incluyen la topología y topografía de cada pozo (coordenadas x, y, z), el caudal que ingresa a los pozos y la estructura topológica de la red, que define las posibles conexiones entre ellos.

En cuanto al diseño hidráulico, Duque (2015) destaca que el objetivo principal es determinar la combinación óptima de diámetro y pendiente para cada tubería de la red, buscando minimizar los costos totales de construcción mientras se garantiza un funcionamiento eficiente. Este diseño debe cumplir con las restricciones técnicas establecidas en la normativa local. A partir de un tramo específico de la red, es posible ilustrar este proceso mediante el siguiente esquema:

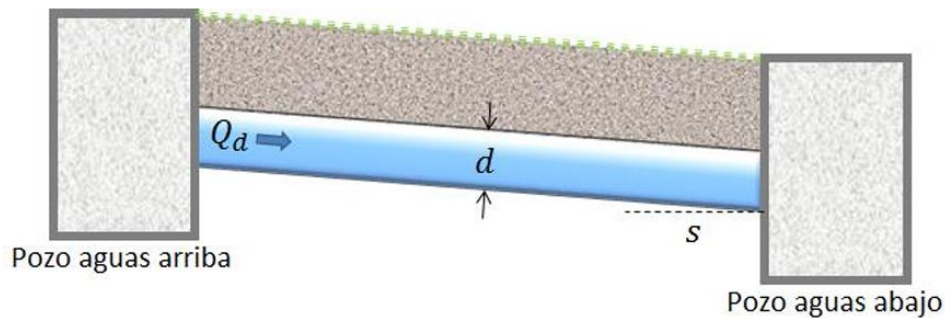


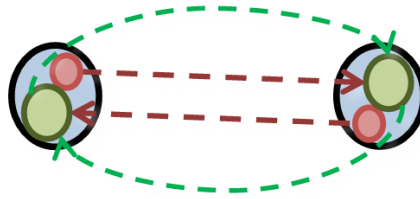
Figura 4. Diseño hidráulico de una tubería. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 31)

Una vez conocido el caudal de diseño del tramo, es posible determinar la pendiente ( $s$ ) y el diámetro ( $d$ ) adecuados para garantizar su capacidad de transporte del caudal de diseño ( $Q_d$ ); sin embargo, es fundamental cumplir con las restricciones normativas y otros criterios técnicos propios del proceso de diseño. Entre estas consideraciones se incluye que el flujo siempre debe dirigirse a favor de la gravedad, que las tuberías aguas arriba deben conectarse a una cota igual o superior a la cota de batea de las tuberías aguas abajo, y que las tuberías de inicio deben conducir el flujo hacia la descarga de manera efectiva. Adicionalmente, factores como la lista de diámetros comerciales disponibles, la profundidad de excavación, la precisión del diseño y la ecuación de costos aplicable amplían significativamente el campo de solución, lo que exige la implementación de técnicas de optimización para encontrar la solución más eficiente.

Finalmente, los datos de entrada necesarios para el diseño hidráulico incluyen la topología y la topografía de los pozos (coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), la clasificación de las tuberías (inicio o continua), la estructura topológica de la red, el caudal de diseño del tramo, los diámetros comerciales disponibles, y las características físicas tanto de las tuberías como del fluido a modelar.

### 3.2.2 Selección del trazado

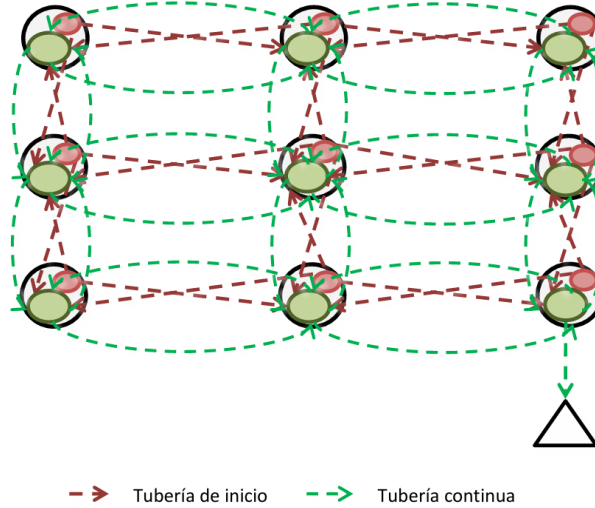
En relación con el problema de selección del trazado, Duque (2015) aborda esta tarea utilizando programación lineal entera mixta, enmarcando la red como un problema de diseño de redes (Network Design Problem). Este enfoque permite definir la dirección del flujo, el caudal y el tipo de conexión para cada tubería que compone la red de drenaje. El modelado de cada tramo se basa en la teoría de grafos, considerando hasta cuatro tipos posibles de tramos: inicio, continuo y en ambos sentidos, como se ilustra en la Figura 5.



— ➤ Tubería de inicio    - - ➤ Tubería continua

Figura 5. Tipos de tuberías para cada tramo de una red de alcantarillado. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 34)

Aplicando este concepto a la red de la Figura 2, el grafo que la representa tiene cuatro posibles arcos por tramo, como se muestra a continuación:



— ➤ Tubería de inicio    - - ➤ Tubería continua

Figura 6. Grafo para la selección del trazado de una red de alcantarillado. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 35)

Para abordar el problema, la metodología emplea una función objetivo que considera dos tipos de variables: la primera modela el flujo en la red, representando los costos asociados al transporte del caudal; la segunda es una variable binaria que determina la dirección asignada al flujo. El objetivo principal es minimizar esta función, optimizando tanto los costos de transporte como la asignación del sentido de flujo dentro de la red.

$$\min \left( \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_t} c_{ij} l_{ij} q_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_t} a_{ij} l_{ij} x_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_t} b_{ij} x_{ijt} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$



La Ecuación 1, en su primer término, establece que a cada enlace posible  $i, j$  representado en la Figura 6, se le asocia un costo  $c_{ij}$ , que refleja el gasto por unidad de flujo transportado. Este costo influye en el caudal  $q_{ijt}$  en el primer término de la ecuación, así como en la longitud del tramo  $l_{ij}$ . En cuanto al segundo término, el coeficiente  $a_{ij}$  representa el costo relacionado con la inclusión del enlace  $i, j$ , donde la variable binaria  $x_{ij}$  toma valores de 0 o 1 dependiendo del trazado final definido, mientras que  $l_{ij}$  indica la longitud correspondiente del tramo. Finalmente, el tercer término considera el coeficiente  $m_{ij}$ , que está asociado al costo derivado de la topografía del terreno, representado por la pendiente del tramo entre el pozo de registro  $i$  y el pozo de registro  $j$ . Duque (2015) ilustra el este procedimiento de la siguiente manera:

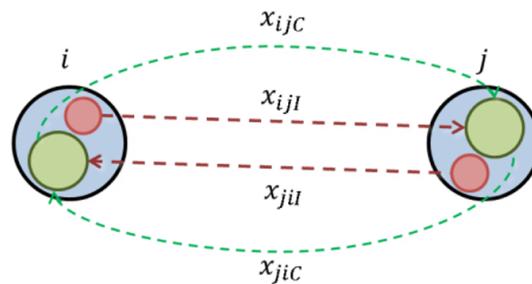


Figura 7. Posibles variables de decisión por tramo. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 35)

De los cuatro posibles enlaces que conectan dos pozos, únicamente uno definirá el trazado final. En ese enlace, el valor de  $x_{ijt}$  será igual a 1, mientras que en los demás será 0. Por consiguiente, minimizar la función expresada por la Ecuación 1, asegura que el trazado seleccionado distribuye el caudal de manera óptima a lo largo de toda la red. Según Duque (2015), para determinar los parámetros  $c_{ij}$  y  $a_{ij}$ , se recomienda realizar una regresión lineal que relacione los costos del diseño hidráulico con el caudal transportado en cada caso. Así, cada segmento de tubería diseñado tendrá un costo total vinculado directamente al caudal que conduce.

Para determinar el coeficiente  $b_{ij}$ , Saldarriaga et al. (2021), llevaron a cabo una investigación en la que se encontró que al incluir algunos criterios topográficos se lograba obtener el trazado óptimo de una red, empleando un menor número de iteraciones y llegando al mínimo costo. Se desarrolló un total de nueve criterios en esa investigación, sin embargo, con el paso del tiempo, investigaciones futuras confirmaron que solo tres de ellos llevaban al mínimo costo. Posteriormente, Bermúdez (2023), propone unas modificaciones a la metodología de selección de los trazados de las redes de drenaje urbano planteada en la investigación inicial. Estas modificaciones se centran en mejorar la determinación del



trazado inicial mediante nuevos criterios geométricos y de masa, así como combinaciones entre ambos.

En esta investigación se emplearán los criterios establecidos por Bermúdez (2023) para alcanzar los objetivos propuestos, dado que estos criterios han demostrado ser los más adecuados y robustos en el contexto del diseño y optimización de redes de drenaje urbano. Dichos criterios integran factores geométricos, topográficos y de flujo, lo que permite una selección más precisa del trazado óptimo al considerar no solo la eficiencia hidráulica, sino también la reducción de costos de construcción y operación. Además, los enfoques propuestos por Bermúdez se validaron en diferentes escenarios, evidenciando su aplicabilidad y efectividad en contextos con topografías variadas y condiciones de caudal complejas. La combinación de estos criterios asegura que las soluciones adoptadas sean sostenibles, económicamente viables y adaptables a las particularidades de cada sistema de drenaje, convirtiéndolos en una herramienta fundamental para la obtención de los resultados. En la siguiente sección se describirán los criterios empleados.

### 3.2.3 Criterios de selección

#### 3.2.3.1 Criterios de geometría

**Criterio 1 (Base de comparación):** Basado en el criterio original de Zambrano, usa la pendiente y la longitud para minimizar costos priorizando tuberías con pendiente favorable.

$$b_{ijt_2} = -s_{ijt_2} \cdot L_{ij} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$b_{ij_1} = -s_{ijt_1} \cdot L_{ij} \cdot \mu \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde  $s_{jit}$  es la pendiente y  $L_{ij}$  la longitud de la tubería.  $\mu$  es 0.65 si  $s_{ijt_1} > 0$  y 1.65 si  $s_{ijt_1} < 0$ .

**Criterio 2:** Multiplica la diferencia de altura por la longitud para incluir explícitamente la longitud en el cálculo.

$$b_{ijt} = -h_{ijt} \cdot L_{ij} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $h_{jit}$  es la diferencia de altura entre los dos pozos que une la tubería.

**Criterio 3:** Penaliza tuberías cortas restando la longitud a la diferencia de altura.



$$b_{ijt} = -h_{ijt} - L_{ij} \quad \text{Ecuación 5}$$

**Criterio 4:** Da mayor peso a la diferencia de altura elevándola al cuadrado antes de multiplicarla por la longitud.

$$b_{ijt} = -h_{ijt}^2 \cdot L_{ij} \quad \text{Ecuación 6}$$

**Criterio 5:** Da más peso a la pendiente multiplicando su cuadrado por la longitud.

$$b_{ijt} = -s_{ijt}^2 \cdot L_{ij} = -s_{ijt} \cdot h_{ij} \quad \text{Ecuación 7}$$

**Criterio 6:** Penaliza tuberías largas dividiendo la diferencia de altura entre el cuadrado de la longitud.

$$b_{ijt} = -\frac{h_{ijt}}{L_{ij}^2} = -\frac{s_{ijt}}{L_{ij}} \quad \text{Ecuación 8}$$

**Criterio 7:** Combina pendiente, longitud y distancia al punto de descarga para minimizar costos.

$$b_{ijt} = -s_{ijt} \cdot L_{ij} \cdot L_{outfall} = h_{ijt} \cdot L_{outfall} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde  $L_{outfall}$  es la distancia euclidiana entre el nodo de descarga y la salida.

**Criterio 8:** Ajusta la magnitud de la pendiente elevándola a un exponente basado en datos experimentales.

$$b_{ijt} = -h_{ij}^7 \cdot L_{outfall} \quad \text{Ecuación 10}$$

**Criterio 9:** Similar al Criterio 8, pero usa directamente la longitud del arco en lugar de la distancia al punto de descarga.

$$b_{ijt} = -h_{ij}^7 \cdot L_{ij} \quad \text{Ecuación 11}$$

**Criterio 10:** Resta la longitud de la pendiente elevada al mismo exponente del Criterio 8.



$$b_{ijt} = -h_{ij}^7 - L_{ij} \quad \text{Ecuación 12}$$

### 3.2.3.2 Criterios de masa

**Criterio 11:** Calcula el flujo promedio ascendente para priorizar tuberías con mayor capacidad de transporte.

$$b_{ijt} = \frac{Q_{AUij}}{\max(Q_{AU})} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde  $Q_{AUij}$  es el flujo promedio ascendente de las cámaras de inspección aguas arriba y  $\max(Q_{AU})$  es el flujo máximo calculado en la red.

**Criterio 14:** Considera únicamente el flujo ascendente de la cámara de entrada para calcular el coeficiente.

$$b_{ijt} = 1 - \frac{Q_{Uij}}{\max(Q_U)} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde  $Q_{Uij}$  es el flujo ascendente de la cámara de entrada.

**Criterio 17:** Resta directamente el flujo promedio ascendente de su valor máximo.

$$b_{ijt} = \max(Q_{AU}) - Q_{AUij} \quad \text{Ecuación 15}$$

**Criterio 20:** Usa el flujo promedio descendente para priorizar tuberías que transporten menos flujo.

$$b_{ijt} = Q_{DSij} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde  $Q_{DSij}$  es el flujo promedio descendente de las cámaras de inspección aguas abajo.

**Criterio 23:** Calcula el flujo descendente usando únicamente la cámara de entrada.

$$b_{ijt} = Q_{Dij} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde  $Q_{Dij}$  es el flujo descendente de la cámara de entrada.

**Criterio 26:** Normaliza el flujo promedio descendente dividiéndolo por el valor máximo.



$$b_{ijt} = \frac{Q_{DSij}}{\max(Q_{DS})} \quad \text{Ecuación 18}$$

### 3.2.3.3 Criterios combinados

**Criterio 12:** Combina flujo promedio ascendente con diferencia de altura.

$$b_{ijt} = \left(1 - 1 - \frac{Q_{AUij}}{\max(Q_{AU})}\right) \cdot h_{ij} \quad \text{Ecuación 19}$$

**Criterio 13:** Combina flujo promedio ascendente, diferencia de altura y distancia al punto de descarga.

$$b_{ijt} = \left(1 - 1 - \frac{Q_{AUij}}{\max(Q_{AU})}\right) \cdot h_{ij} \cdot L_{outfall} \quad \text{Ecuación 20}$$

**Criterio 15:** Combina flujo ascendente con diferencia de altura.

$$b_{ijt} = \left(1 - 1 - \frac{Q_{Uij}}{\max(Q_U)}\right) \cdot h_{ij} \quad \text{Ecuación 21}$$

**Criterio 16:** Combina flujo ascendente, diferencia de altura y distancia al punto de descarga.

$$b_{ijt} = \left(1 - 1 - \frac{Q_{Uij}}{\max(Q_U)}\right) \cdot h_{ij} \cdot L_{outfall} \quad \text{Ecuación 22}$$

**Criterio 18:** Usa el flujo promedio ascendente máximo menos el actual para calcular el coeficiente con la diferencia de altura.

$$b_{ijt} = (\max(Q_{AU}) - Q_{AUij}) \cdot h_{ij} \quad \text{Ecuación 23}$$

**Criterio 19:** Similar al Criterio 18, pero incluye la distancia al punto de descarga.

$$b_{ijt} = (\max(Q_{AU}) - Q_{AUij}) \cdot h_{ij} \cdot L_{outfall} \quad \text{Ecuación 24}$$

**Criterio 21:** Combina flujo promedio descendente con la diferencia de altura.

$$b_{ijt} = Q_{DSij} \cdot h_{ij} \quad \text{Ecuación 25}$$



**Criterio 22:** Similar al Criterio 21, pero incluye la distancia al punto de descarga.

$$b_{ijt} = Q_{DSij} \cdot h_{ij} \cdot L_{outfall} \quad \text{Ecuación 26}$$

**Criterio 24:** Combina flujo descendente con la diferencia de altura.

$$b_{ijt} = Q_{Dij} \cdot h_{ij} \quad \text{Ecuación 27}$$

**Criterio 25:** Similar al Criterio 24, pero incluye la distancia al punto de descarga.

$$b_{ijt} = Q_{Dij} \cdot h_{ij} \cdot L_{outfall} \quad \text{Ecuación 28}$$

**Criterio 27:** Normaliza el flujo promedio descendente y lo combina con la diferencia de altura.

$$b_{ijt} = \frac{Q_{DSij}}{\max(Q_{DS})} \cdot h_{ij} \quad \text{Ecuación 29}$$

**Criterio 28:** Similar al Criterio 27, pero incluye la distancia al punto de descarga.

$$b_{ijt} = \frac{Q_{DSij}}{\max(Q_{DS})} \cdot h_{ij} \cdot L_{outfall} \quad \text{Ecuación 30}$$

En caso de requerir una comprensión más detallada de los criterios y su implementación, se recomienda consultar el trabajo realizado por Bermúdez (2023), donde se explican a profundidad las modificaciones propuestas y los fundamentos teóricos, junto con ejemplos de aplicación.

### 3.2.4 Diseño hidráulico

Cuando el trazado ha sido definido, se determina el caudal de diseño para cada tubería, lo que permite avanzar al diseño hidráulico. Según el enfoque propuesto por Duque (2015), esta etapa se aborda mediante un modelo de programación dinámica. El problema se formula como un Problema de la Ruta Más Corta (RMC), generando múltiples grafos para cada tramo. Específicamente, se construyen tantos grafos como combinaciones de diámetros y pendientes hayan sido previamente definidas por el usuario. En este contexto, cada pozo se representa como un conjunto de nodos que corresponden a las combinaciones posibles de diámetros y profundidades para ese pozo, como se muestra en la figura a continuación:

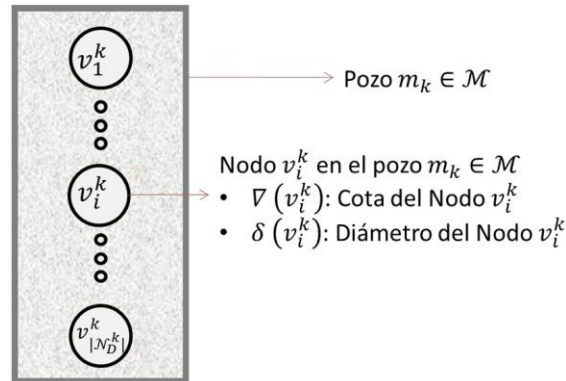


Figura 8. Conjunto de nodos que pertenecen a un mismo pozo de inspección. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 44)

Según lo descrito por Duque (2015), una vez generados los nodos para todos los pozos, estos se interconectan mediante grafos que representan todas las combinaciones posibles. Cada grafo está asociado a un costo, el cual se determina principalmente por el diámetro y la pendiente, que son las variables más relevantes para calcular el costo de construcción de cada tramo.

Una vez definida la red a diseñar, la metodología utiliza el algoritmo de Bellman-Ford para analizar y evaluar todos los caminos posibles, identificando aquellos de costo mínimo. Antes de realizar este análisis, se descartan los grafos (tuberías) que no cumplen con las restricciones hidráulicas, de capacidad o que presenten contrapendiente. Gracias a que el algoritmo considera todas las alternativas generadas, la metodología es exhaustiva, asegurando que el diseño hidráulico obtenido sea globalmente óptimo para una ecuación de costo específica.

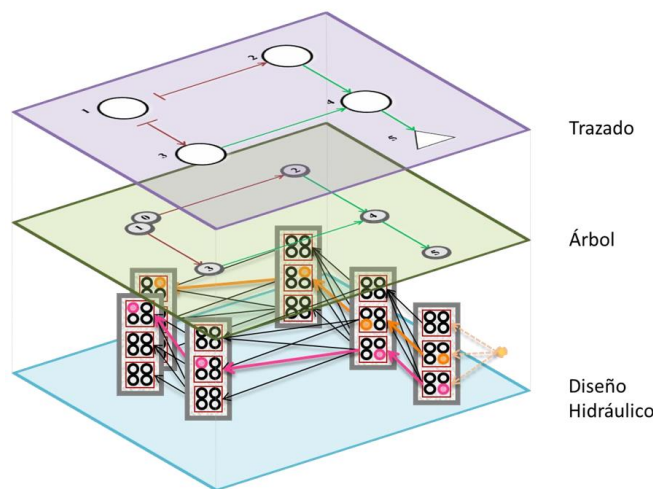


Figura 9. Solución para el diseño hidráulico de una red ejemplo. Tomado de: (Duque, 2015, pág. 67)



En el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), se han integrado cada una de las metodologías anteriormente descritas en un solo programa denominado Underground Topography for Optimal Pipeline Infrastructure Assessment, por sus siglas, UTOPIA. El funcionamiento del programa se resume en el siguiente diagrama:

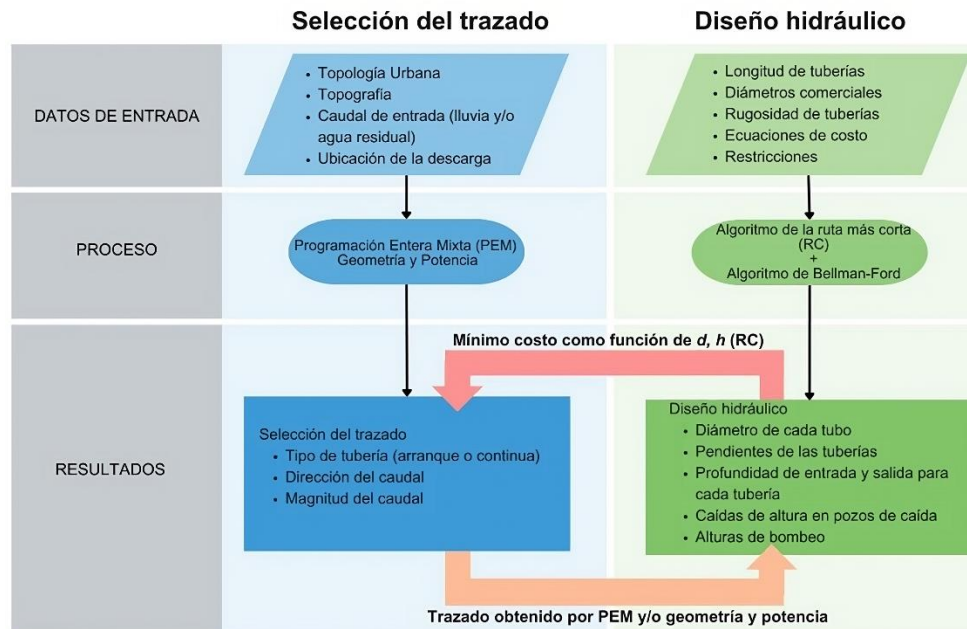


Figura 10. Funcionamiento UTOPIA. Tomado de: (Saldarriaga, 2023)

### 3.3 Restricciones de diseño

#### 3.3.1 Restricciones hidráulicas

Las restricciones hidráulicas tienen como objetivo principal garantizar que el diseño de las redes de alcantarillado sea capaz de satisfacer las demandas de capacidad de transporte de caudales, asegurando que puedan manejar eficientemente tanto los flujos habituales como los picos durante eventos de alta afluencia, como lluvias intensas. Además, estas restricciones buscan promover condiciones que favorezcan el proceso de autolimpieza dentro de la red, evitando la acumulación de sedimentos y residuos sólidos en las tuberías.

Para llevar a cabo la obtención de los resultados de esta investigación, en cada una de las configuraciones obtenidas a partir de los criterios presentados anteriormente, se aplicaron las mismas restricciones hidráulicas de diseño utilizadas por Saldarriaga et al. (2021), las cuales se presentan en la siguiente tabla:


**Tabla 1. Restricciones hidráulicas. Tomado de: (Saldarriaga et al., 2021)**

Restricción	Valor	Condición
Diámetro mínimo	0.2 m	Siempre
Relación de llenado máxima	0.6	$d \leq 0.3 m$
	0.7	$0.35 m \leq d \leq 0.45 m$
	0.75	$0.5 m \leq d \leq 0.9 m$
	0.8	$d \geq 1 m$
Velocidad mínima	0.7 m/s	$d \leq 0.5 m$ Caudal > 0.015 m <sup>3</sup> /s
	0.8 m/s	$d > 0.5 m$ Caudal > 0.015 m <sup>3</sup> /s
Velocidad máxima	5 m/s	Siempre
Gradiente mínimo	0.003	Caudal < 0.015 m <sup>3</sup> /s
Profundidad mínima	1 m	Siempre

Cabe resaltar que las velocidades fueron obtenidas utilizando la ecuación desarrollada por Manning, con un coeficiente de  $n = 0.009$ , que es un valor aproximado para las tuberías de PVC que ya se encuentran en funcionamiento. Por último, el cambio de elevación utilizado fue  $\Delta z = 0.1 m$ , debido a que la pendiente mínima construible es de 0.001 y, en una tubería de 100 m de longitud, este es el cambio de elevación necesario para cumplir con dicho límite.

### 3.3.2 Restricciones comerciales

Corresponde al conjunto de diámetros estándar disponibles en el mercado de la zona de estudio, los cuales pueden ser utilizados en el diseño. Es importante que el valor seleccionado represente el diámetro interno real de la tubería. En esta investigación, se considerarán los siguientes diámetros, que corresponden a los tamaños comercializados en Colombia para tuberías de PVC.  $D = \{0.2, 0.25, 0.30, 0.35, 0.38, 0.40, 0.45, 0.50, 0.53, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.0, 1.05, 1.20, 1.35, 1.40, 1.50, 1.60, 1.80, 2.0, 2.20, 2.40\}$

### 3.4 Funciones de costos

En esta investigación se utilizará la función de costos propuesta por Maurer et al. (2010), la cual se expresa de la siguiente manera:

$$C = (\alpha h + \beta) \cdot L$$

**Ecuación 31**

Teniendo en cuenta que el coeficiente  $\alpha$  es:



$$\alpha = m_{\alpha}d + n_{\alpha}\beta = m_{\beta}d + n_{\beta}$$

Ecuación 32

Donde:

- $C$  es el costo de construcción de la tubería en *USD*.
- $L$  es la longitud de la tubería en metros.
- $\alpha$  es un coeficiente relacionado con el costo de excavación en función de la profundidad ( $USD \cdot m^{-2}$ )
- $h$  es la profundidad enterrada de la tubería en metros.
- $\beta$  es el costo de la tubería por unidad de longitud ( $USD \cdot m^{-1}$ )
- $m_{\alpha}, m_{\beta}, n_{\alpha}$  y  $n_{\beta}$  son constantes cuyos valores se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 2. Constantes de la función de costos de Maurer et al. (2010).**

Constante	Valor	Unidades
$m_{\alpha}$	110	$USD \cdot m^{-3}$
$m_{\beta}$	1200	$USD \cdot m^{-2}$
$n_{\alpha}$	127	$USD \cdot m^{-2}$
$n_{\beta}$	-35	$USD \cdot m^{-1}$

### 3.5 Índice de resiliencia en redes de drenaje urbano

Según Mugume et al. (2015), el análisis de resiliencia global en redes de drenaje urbano evalúa la capacidad de un sistema para resistir y recuperarse frente a diversos escenarios de fallas estructurales. Este análisis no solo considera la sobrecarga hidráulica causada por lluvias extremas o el aumento del flujo en condiciones de clima seco, sino también otros riesgos críticos, como fallas en los equipos, colapsos de tuberías u obstrucciones que podrían desencadenar inundaciones urbanas.

Un aspecto clave de esta metodología es identificar los "envelopes of failure", que representan la disminución o pérdida de funcionalidad del sistema ante diferentes tipos de fallas. En este contexto, se propone un índice de resiliencia que permite cuantificar el nivel de operación residual del sistema, considerando tanto la magnitud de las inundaciones como el tiempo que estas persisten.



Para evaluar la resiliencia de una red, Saldarriaga y Herrán (2023) adaptaron el índice desarrollado por Mugume et al. (2015), integrando un enfoque basado en flujo constante. Este índice, calculado a través de simulaciones, mide la capacidad del sistema para manejar las inundaciones en términos de volumen y duración. La fórmula original del índice está definida por:

$$RES_0 = 1 - \frac{V_{TF}}{V_{TI}} \cdot \frac{t_f}{t_n} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde  $RES_0$  representa el índice de resiliencia,  $V_{TF}$  es el volumen total de agua que causa inundación,  $V_{TI}$  es el volumen de agua que entra al sistema,  $t_f$  corresponde a la duración de la inundación y  $t_n$  es el tiempo total considerado en la simulación.

En esta adaptación, bajo la premisa de flujo constante, se asume que la duración de la inundación es igual al tiempo total de simulación. Esto simplifica la fórmula a:

$$RES_0 = 1 - \frac{V_{TF}}{V_{TI}} \quad \text{Ecuación 34}$$

Este ajuste permite un análisis más directo de la resiliencia del sistema, enfocándose únicamente en la proporción entre el volumen de inundación y el volumen total de entrada al sistema. Así, se proporciona una herramienta eficaz para evaluar la capacidad de respuesta de las redes de drenaje urbano frente a posibles fallas.



## 4 METODOLOGÍA

La presente investigación se centra en el desarrollo de un enfoque integral para evaluar la resiliencia de redes de alcantarillado. Este trabajo combina herramientas computacionales y análisis hidráulico para diseñar, optimizar y evaluar las redes, considerando criterios modernos que integran aspectos hidráulicos, geométricos y topográficos. La metodología propuesta no solo busca medir el desempeño de las redes en escenarios de fallo, sino también identificar patrones de comportamiento o dependencias a diferentes parámetros para, eventualmente, identificar oportunidades de mejora que contribuyan a su sostenibilidad y capacidad de adaptación.

### 4.1 Procedimiento y herramientas utilizadas

Inicialmente, el trabajo que se llevará a cabo en esta investigación consiste en la evaluación del índice de resiliencia propuesto por Mugume et al. (2015), aplicándolo a los diseños generados a partir de los árboles correspondientes a los diferentes criterios de selección para el diseño hidráulico establecidos por Bermúdez (2023). Estos criterios están diseñados para optimizar la configuración de las redes de alcantarillado en función de parámetros hidráulicos, geométricos y topográficos, lo que resulta en la generación de diferentes árboles de selección para cada red de estudio. Cada árbol de selección representará una propuesta inicial de diseño para una red específica, basada en los criterios adoptados. Posteriormente, se empleará el software UTOPIA como herramienta clave para desarrollar el diseño definitivo de cada árbol para la red de estudio empleada.

UTOPIA es un programa que obtiene un diseño hidráulico, de una red de estudio, con unas características definidas por el usuario a partir de un trazado. Este programa fue desarrollado en Eclipse, el cual es un entorno de desarrollo integrado que sirve como soporte para el lenguaje de programación Java. Es decir, UTOPIA se encuentra desarrollada en ese lenguaje. Esta aplicación logra leer los resultados del trazado obtenidos a partir de programas externos, como FICO Xpress o Python, que se encargan de realizar extensos procesos de optimización. Por una parte, FICO Xpress se emplea cuando tienen redes de menos de 400 nodos debido a las condiciones de su licencia y Python cuando son más de 400 nodos.

A continuación, se muestra se resume el uso de las herramientas que componen el software UTOPIA:

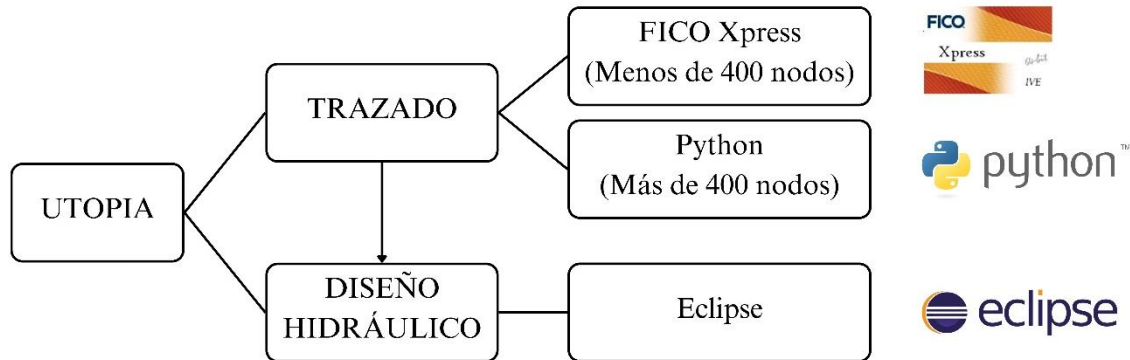


Figura 11. Esquema de uso de herramientas UTOPIA

Una vez se cuente con el diseño hidráulico para el criterio específico, se llevará a cabo un procesamiento de los datos obtenidos empleando hojas de cálculo en el software de Excel y scripts desarrollados en el lenguaje de programación Python, por su facilidad de manejo. Este procesamiento permitirá que la información obtenida del diseño, es decir, un documento de texto organizado con extensión .TXT, sea trasladada a un software que permita su visualización y su posterior modificación: EPA SWMM 5.2 (su versión más reciente), con una extensión .INP. Con el diseño en una extensión .INP y con la posibilidad de poder visualizar el resultado, las características y los parámetros hidráulicos obtenidos para cada criterio en EPA SWMM, se facilita el proceso de cálculo del índice de resiliencia que se ha mencionado a lo largo de esta investigación.

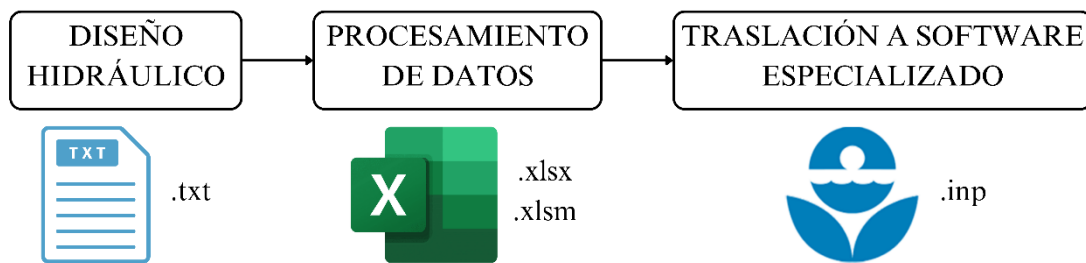


Figura 12. Procesamiento de datos y extensiones empleadas

Simplificando la explicación, el proceso de cálculo del índice de resiliencia consiste en llevar a cabo una serie de simulaciones de falla en los enlaces de la red, aumentando el coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) a un valor muy alto (por ejemplo,  $n = 100$ ). Esto representa una falla completa del enlace, eliminando su capacidad de transporte. De esa manera, se generan múltiples escenarios de fallos aleatorios y acumulativos de los enlaces de la red. Estos fallos se simulan de manera progresiva, fallando enlaces individuales o combinaciones de varios enlaces a lo largo del sistema. Para cada escenario, se evalúan los

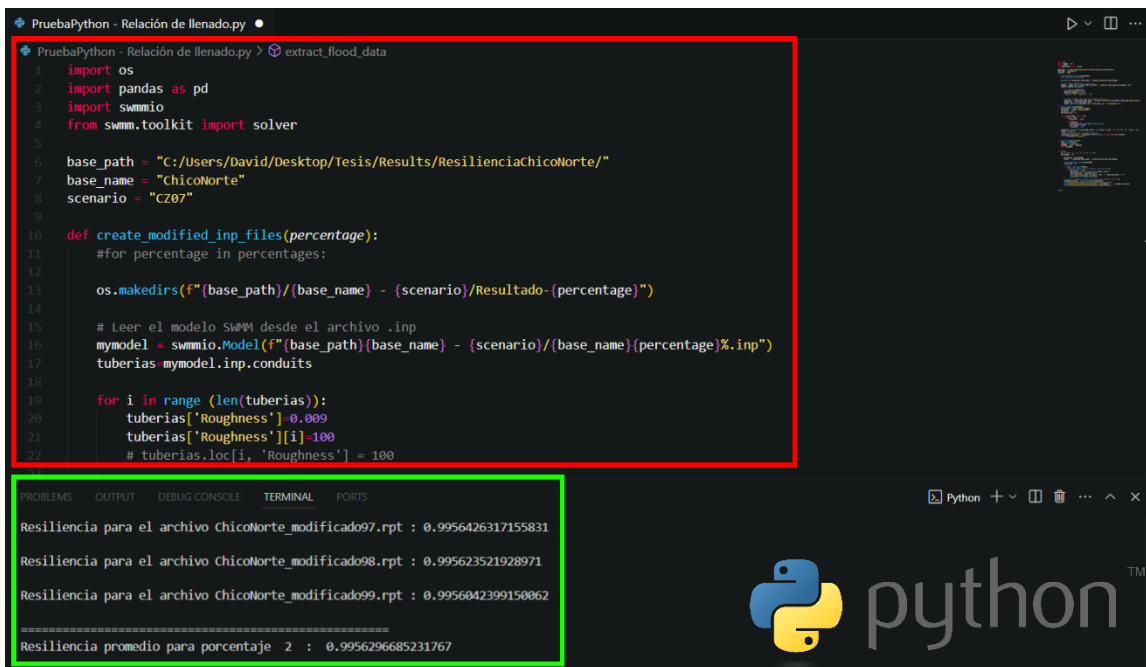


indicadores clave de desempeño, como el volumen total de inundación ( $V_{TF}$ ) y la duración promedio de las inundaciones en los nodos ( $t_f$ ). Aunque el segundo indicador solo es necesario para llevar a cabo un registro, dado que, como se explicó en la sección anterior, con la suposición de flujo constante se asume que la duración de la inundación es igual al tiempo total de simulación.

El proceso individual final para cada uno de los diseños se resume en: incremento del coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) para una tubería  $n_i$ , obtención de resultados que arroja el software para cálculo del coeficiente de resiliencia y consignación de resultados de manera organizada con el fin de no cometer errores. Posterior a la obtención de los resultados para esa primera tubería  $n_i$ , se corrige el valor modificado del coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) y se realiza el mismo procedimiento con la siguiente tubería  $n_{i+1}$ . Se realiza el mismo procedimiento hasta completar las  $n$  tuberías de la red y se lleva a cabo el cálculo del índice de resiliencia para el criterio específico como el promedio de las resiliencias individuales de cada tubería.

Este procedimiento no presenta mayor dificultad, salvo por el tiempo que tomaría hacerlo de manera manual, ya que las redes con las que cuenta el CIACUA, por lo general, presentan 50 o más tuberías. Haciendo la suposición básica de que se trabajara con una red de 50 tuberías, al contar con 28 criterios de selección, se debería correr el programa EPA SWMM, almacenar los resultados y realizar el cálculo manual del índice de resiliencia, como mínimo, un total de 1400 veces. Esta situación, aunque no imposible, se ve muy limitada por el tiempo de desarrollo de la investigación, obligando a encontrar una manera más eficiente de hacerlo.

Por esa razón, aprovechando que EPA SWMM es programa de código abierto, fue posible emplear un API (Application Programming Interfaces) que permitiera correrlo utilizando un lenguaje de programación. En esta investigación, se utilizó Python por su facilidad de manejo. A continuación, se muestra una captura de la implementación realizada (recuadro rojo) y los resultados que arrojaba la terminal después de correrlo (recuadro verde):

```

PruebaPython - Relación de llenado.py
PruebaPython - Relación de llenado.py > extract_flood_data
1 import os
2 import pandas as pd
3 import swmmio
4 from swmm.toolkit import solver
5
6 base_path = "C:/Users/David/Desktop/Tesis/Results/ResilienciaChicoNorte/"
7 base_name = "ChicoNorte"
8 scenario = "CZ07"
9
10 def create_modified_inp_files(percentage):
11     #for percentage in percentages:
12
13     os.makedirs(f"{base_path}/{base_name} - {scenario}/Resultado-{percentage}")
14
15     # Leer el modelo SWMM desde el archivo .inp
16     mymodel = swmmio.Model(f"{base_path}{base_name} - {scenario}/{base_name}{percentage}.inp")
17     tuberias = mymodel.inp.conduits
18
19     for i in range(len(tuberias)):
20         tuberias['Roughness'] = 0.009
21         tuberias['Roughness'][i] = 100
22         # tuberias.loc[i, 'Roughness'] = 100
23
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
Resiliencia para el archivo ChicoNorte_modificado97.rpt : 0.9956426317155831
Resiliencia para el archivo ChicoNorte_modificado98.rpt : 0.995623521928971
Resiliencia para el archivo ChicoNorte_modificado99.rpt : 0.9956042399150062
=====
Resiliencia promedio para porcentaje 2 : 0.9956296685231767
python
    
```

**Figura 13. Script implementando API de EPA SWMM en Python**

Una vez desarrollado el script que permitiera correr el programa, almacenar los resultados individuales y realizar los cálculos; la obtención de los resultados finales se tornaría significativamente más eficiente, permitiendo que se pueda jugar con ellos y variar algunos criterios para observar si se encontraba algún otro tipo de dependencia. Básicamente, esta implementación abriría las puertas a muchas modificaciones de la red, de sus parámetros y esto repercutiría de manera directa en la robustez de los resultados.

## 4.2 Casos de estudio

Los casos de estudio utilizados en esta investigación fueron seleccionados considerando tanto las necesidades del trabajo como las limitaciones presentes a lo largo de su desarrollo. Inicialmente, se eligió una red de menor extensión, como Chicó Sur, la cual facilitó la gestión de los diferentes parámetros y permitió mantener el control sobre las pruebas realizadas. Esta red fue fundamental para desarrollar la mayor parte de los análisis y obtener los principales resultados de la investigación.

Posteriormente, se intentó extrapolar las pruebas a una red de mayor escala, como Chicó Norte. Sin embargo, las características topográficas particulares de esta red y las limitaciones de tiempo disponibles dificultaron la obtención de resultados extensivos. A pesar de ello, las comparaciones realizadas, aunque menos numerosas, ofrecieron aportes significativos al análisis, evidenciando diferencias clave entre ambas redes.



#### 4.2.1 Chicó Sur

La red de Chicó Sur es un modelo de referencia frecuentemente empleado en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados para analizar el diseño optimizado de redes de drenaje urbano. Esta red está ubicada en Bogotá, en la zona del Chicó, delimitada entre las calles 94 y 100, y entre la carrera Séptima y la diagonal 97.



Figura 14. Ubicación red Chicó Sur

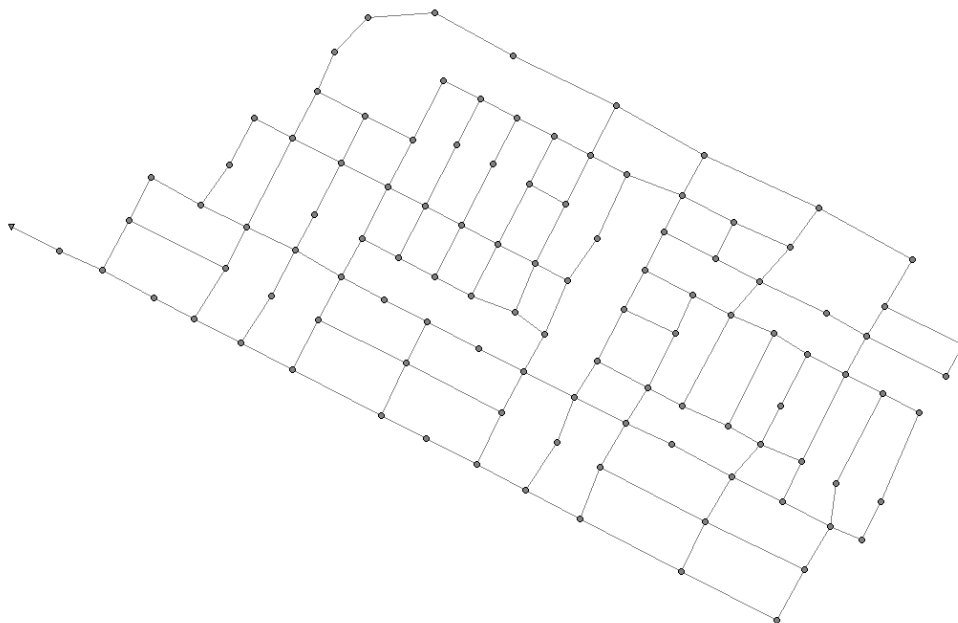


Figura 15. Nodos y enlaces red Chicó Sur



La red cuenta con 109 pozos y 160 tuberías con longitudes entre 65 y 204 metros con una topografía entre ondulada y plana al final. El área de la cuenca es de aproximadamente 87 hectáreas y recoge un caudal de  $1.517 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4.2.2 Chicó Norte

La red Chicó Norte también se encuentra en el repositorio de información del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, sin embargo, ha sido poco frecuentada en investigaciones anteriores dadas sus condiciones topográficas, su extensión y el número de nodos. Esta red también se encuentra ubicada en la zona del Chicó, en Bogotá, delimitada entre las calles 100 y 127, y entre la Avenida Carrera 45 algunos barrios ubicados en los cerros orientales



Figura 16. Ubicación red Chicó Norte



**Figura 17. Nodos y enlaces red Chicó Norte**

La red cuenta con 523 pozos y 522 tuberías con longitudes entre 152 y 315 metros con una topografía entre con pendientes altas en las zonas de los cerros, pasando a ondulada y plana al final. El área de la cuenca es de aproximadamente 712 hectáreas y recoge un caudal de  $21.9 \text{ m}^3/\text{s}$ .



## 5 RESULTADOS

La metodología desarrollada en la sección anterior se aplicó en los casos de estudio mencionados, teniendo en cuenta los criterios desarrollados por Bermúdez (2023) y aplicando posteriores modificaciones a las condiciones de las redes evaluadas. Estas modificaciones se irán presentando a medida que se exponen los resultados.

### 5.1 Chicó Sur

#### 5.1.1 Resiliencia y árbol de la red

Los primeros resultados obtenidos corresponden al índice de resiliencia obtenido para cada uno de los criterios que se han expuesto previamente en esta investigación en la red de Chicó Sur. Además, también se almacenó los datos del volumen total de entrada al sistema. A continuación, se presentan los datos compilados:

**Tabla 3. Índice de resiliencia para cada criterio en la red Chicó Sur**

<b>Criterio</b>	<b>Resiliencia</b>	<b>Volumen total [L/s]</b>
<b>C1</b>	0.97831754	527.391
<b>C2</b>	0.98562136	634.968
<b>C3</b>	0.98448324	514.065
<b>C4</b>	0.98537408	499.573
<b>C5</b>	0.98338966	540.457
<b>C6</b>	0.98338966	540.457
<b>C7</b>	0.97804506	525.663
<b>C8</b>	0.97937331	495.621
<b>C9</b>	0.97938317	501.517
<b>C10</b>	0.98193954	498.277
<b>C11</b>	0.97702661	498.925
<b>C12</b>	0.97850556	498.536
<b>C13</b>	0.97804506	525.663
<b>C14</b>	-	-
<b>C15</b>	0.98015329	526.635
<b>C16</b>	0.97938404	519.745
<b>C17</b>	0.97707155	495.707
<b>C18</b>	0.97894585	497.327

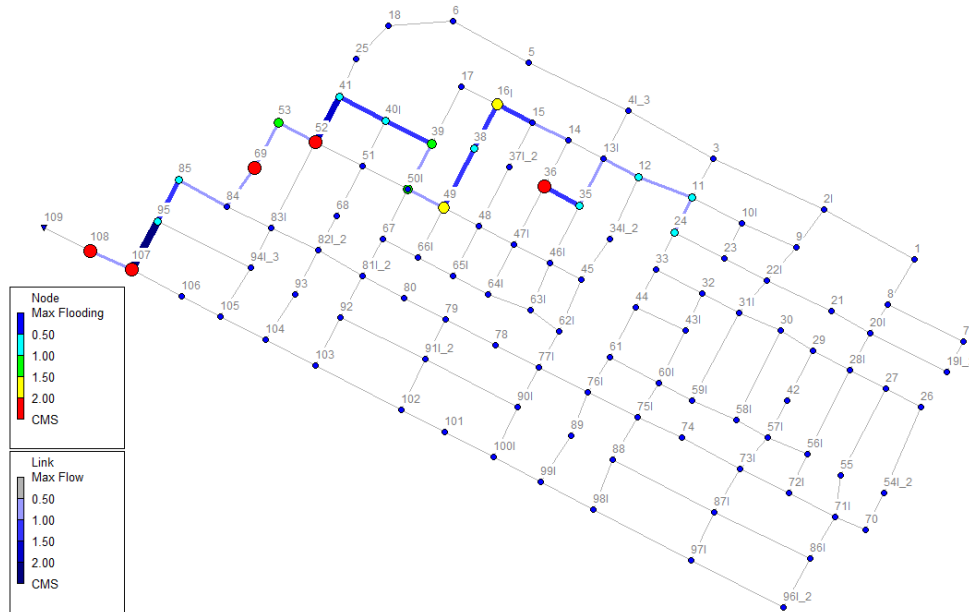


<b>C19</b>	0.97804506	525.663
<b>C20</b>	0.97700686	502.856
<b>C21</b>	0.97894248	498.364
<b>C22</b>	0.97804506	525.663
<b>C23</b>	-	-
<b>C24</b>	0.97854311	522.056
<b>C25</b>	0.97898271	522.056
<b>C26</b>	0.97535327	495.426
<b>C27</b>	0.97850263	499.573
<b>C28</b>	0.97804506	525.663

Los colores que presenta la Tabla 3 indican similitudes entre los índices de resiliencia calculados y los volúmenes arrojados por EPA SWMM, los cuales serán motivo de análisis y discusión en la siguiente sección.

Posteriormente, se observó que los resultados obtenidos para los índices de resiliencia eran muy similares, independientemente del criterio utilizado. Esto generó dudas sobre la premisa inicial de esta investigación, que planteaba una dependencia significativa del índice propuesto por Mugume et al. (2015) con los diferentes árboles de diseño que podían derivarse de una misma red, en este caso, los generados por los criterios de Bermúdez (2023). Esta similitud en los resultados sugirió que la relación entre el índice y la estructura del árbol podría no ser tan determinante como se había planteado inicialmente o que el índice propuesto por la bibliografía escogida no representa de manera significativa la resiliencia de una red en condiciones normales.

Así, se realizó una propuesta para un índice de resiliencia basado en el propuesto por Mugume et al. (2015), que solo tuviera en cuenta la eliminación o bloqueo únicamente de las 5 tuberías con mayor paso de caudal, con el objetivo de afectar de manera más directa el resultado del promedio del índice. De esa manera, se utilizó el árbol y el diseño obtenido a partir del Criterio 2 y, utilizando algunas herramientas del software EPA SWMM, se identificó las 5 tuberías con mayor paso de caudal, como se observa a continuación:



**Figura 18. Identificación de tuberías con mayores caudales C2 – Chicó Sur**

Las tuberías eliminadas fueron las identificadas con los ID's 98, 124, 125, 142 y 159, presentado un color azul más intenso en la figura anterior y, luego de realizar el bloqueo de la tubería, se corría el programa para obtener los valores necesarios para realizar el cálculo del índice de resiliencia, como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 4. Cálculo manual del índice de resiliencia a partir de las tuberías con mayor paso de caudal – Chicó Sur**

<b>Tubería eliminada</b>	<b>Resiliencia</b>
98	0.9857493
124	0.9857501
125	0.9853305
142	0.9855424
159	0.9855409
<b>Promedio</b>	<b>0.9855826</b>

Los resultados obtenidos teniendo en cuenta esta suposición no presentan una variación significativa frente al valor obtenido al considerar el cierre de todas las tuberías, utilizando el mismo criterio, como se puede observar en la siguiente tabla comparativa:



**Tabla 5. Comparación entre metodologías para el cálculo del índice de resiliencia – Chicó Sur**

<b>Metodología empleada</b>	<b>Resiliencia</b>
Todas las tuberías	0.98562136
Tuberías de mayor caudal	0.98558264

Se observó un cambio porcentual de solo 0.004% entre ambos resultados, lo que indica que considerar las tuberías de mayor caudal (que, en teoría, deberían tener un impacto relevante en el índice en caso de bloqueo u obstrucción) no altera de manera significativa el resultado. Esto sugiere que el problema podría estar relacionado con la forma en que fue concebido el índice propuesto, poniendo en duda su capacidad para reflejar adecuadamente las diferencias en el desempeño de las redes bajo distintas condiciones.

Se planificó repetir el procedimiento utilizando otros criterios con el objetivo de obtener resultados que pudieran mostrar diferencias significativas. Sin embargo, al identificar las tuberías de mayor caudal, se observó un patrón de comportamiento consistente entre los diseños generados bajo los distintos criterios. Esto llevó a la conclusión de que los resultados serían idénticos o muy similares. Debido a las limitaciones de tiempo, se optó por no realizar estos cálculos adicionales. Se sugiere que futuras investigaciones profundicen en este aspecto para evaluar con mayor detalle la influencia de los criterios seleccionados en los índices de resiliencia. En la sección de anexos (Anexo 1) se encuentran los patrones identificados respecto a las tuberías con mayor flujo.

### **5.1.2 Resiliencia, relación de llenado y costo de diseño**

Una vez obtenidos los resultados para verificar o descartar la dependencia del índice de resiliencia con el árbol generado a partir del criterio utilizado, se decidió llevar a cabo un análisis adicional. Este consistió en evaluar el comportamiento del índice de resiliencia en función de la relación de llenado máxima, configurada en UTOPIA, y el costo del diseño obtenido en dólares para un solo criterio, el Criterio 1. Este enfoque buscaba identificar posibles patrones o correlaciones entre estas tres variables, con el objetivo de obtener conclusiones más completas y significativas. A continuación, se presenta una tabla que compila los resultados de costos, resiliencias y, además, se muestra un análisis de cambio porcentual del costo para relaciones de llenado  $\frac{y_n}{d} = \{0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.93\}$ .

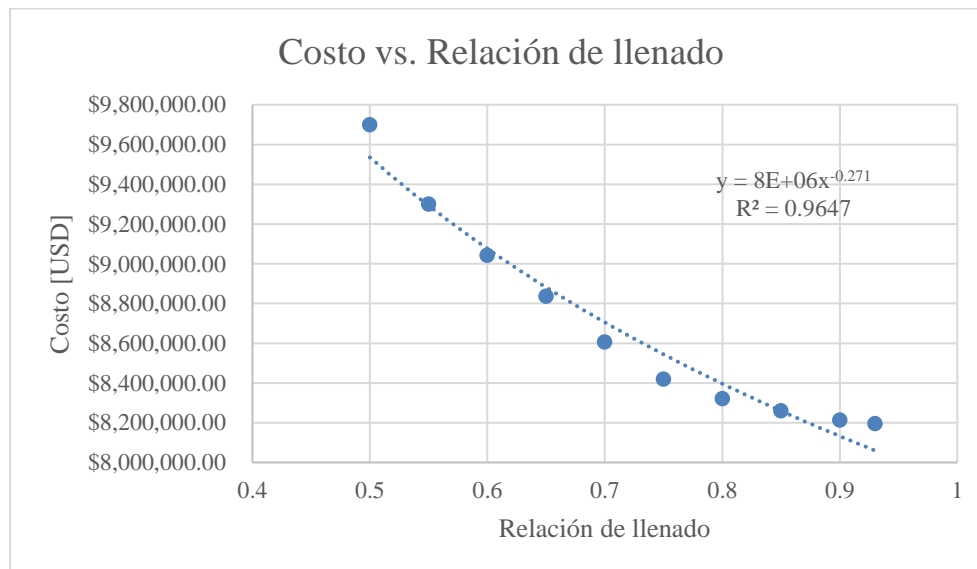

**Tabla 6. Compilado de resultados de relación de llenado, costo y resiliencia – Chicó Sur**

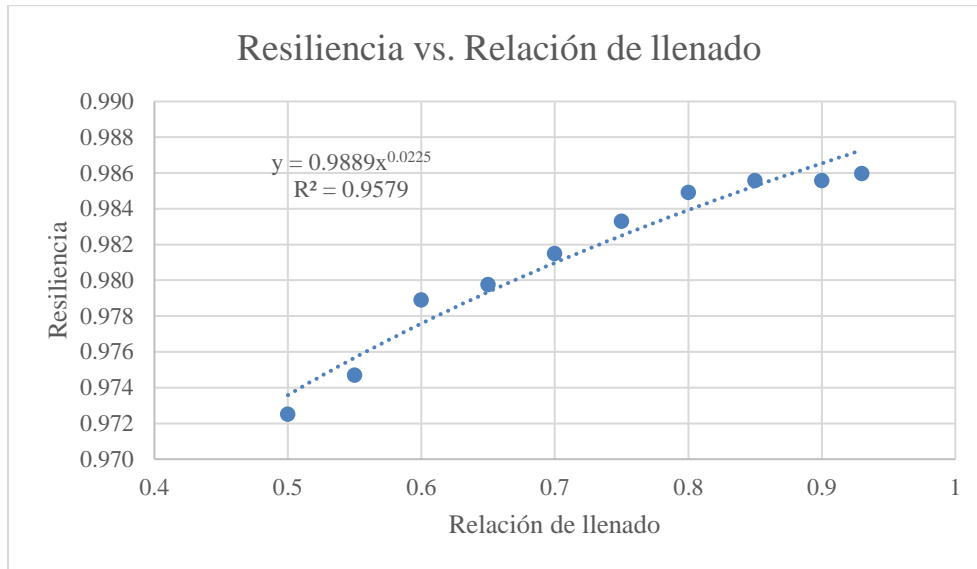
Relación de llenado	Costo [USD]	Resiliencia	Cambio porcentual
0.5	\$ 9,698,641.67	0.972509783	18.35%
0.55	\$ 9,300,197.63	0.974686970	13.49%
0.6	\$ 9,042,171.92	0.978894468	10.34%
0.65	\$ 8,836,026.48	0.979761344	7.83%
0.7	\$ 8,606,021.99	0.981500994	5.02%
0.75	\$ 8,419,351.65	0.983295792	2.74%
0.8	\$ 8,320,204.85	0.984916121	1.53%
0.85	\$ 8,260,099.40	0.985568679	0.80%
0.9	\$ 8,212,711.91	0.985571299	0.22%
0.93	\$ 8,194,661.72	0.985963794	-

Cabe resaltar que, el análisis del cambio porcentual se llevó a cabo entre el costo obtenido a partir de las relaciones de llenado entre 0.5 y 0.9, frente al costo de la mayor relación de llenado permitida, es decir, 0.93. Por ejemplo, para calcular el cambio porcentual entre el costo obtenido con 0.93 y 0.7 se realiza el siguiente cálculo:

$$\text{Cambio porcentual}_{0.93-0.7} = \frac{|8,194,661.72 - 8,606,021.99|}{8,194,661.72} * 100 = 5.02 \%$$

Al realizar una curva a partir de los resultados presentados, el comportamiento se observa de la siguiente manera:


**Figura 19. Costo vs. Relación de llenado – C1 – Chicó Sur**



**Figura 20. Resiliencia vs. Relación de llenado – C1 – Chicó Sur**

Como se puede notar en la Figura 19, el costo del diseño de la red disminuye a medida que la relación de llenado aumenta. Esto tiene sentido, debido a que cuando la relación de llenado aumenta, el caudal que transportan las tuberías es mayor y, por lo tanto, es posible emplear diámetros menores, lo que reduce significativamente los costos.

En la Figura 20 es posible observar que, a medida que la relación de llenado aumenta, el índice de resiliencia también aumenta. Esto se debe a que a medida que la relación de llenado crece, el sistema puede ser menos propenso a congestiones o bloqueos en momentos de alta demanda. Esto implica que el sistema es más flexible y capaz de adaptarse a condiciones cambiantes, lo que mejora su resiliencia frente a fallas o cambios inesperados.

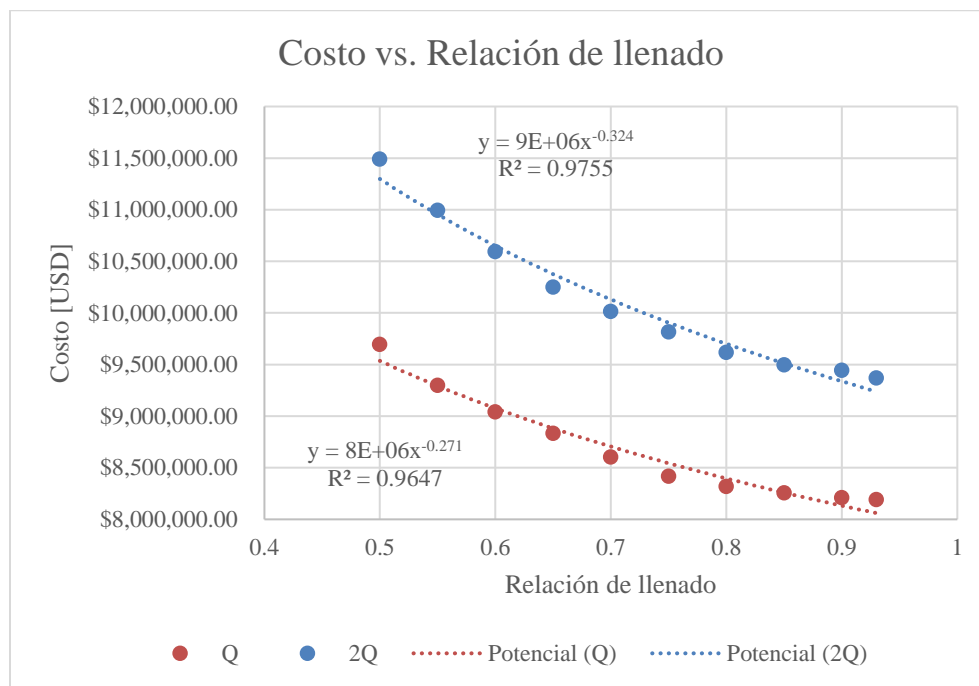
### 5.1.3 Resiliencia, relación de llenado y costo de diseño para el doble del caudal

Con el propósito de someter la red a condiciones más extremas y evaluar si el comportamiento de las variables analizadas en la sección anterior se ve alterado, se duplicó el caudal de entrada a la red. A continuación, se presentan el compilado de datos recogidos al duplicar el caudal y las curvas obtenidas con el caudal original y el doble del caudal, para poder observar los cambios:


**Tabla 7. Compilado de resultados de relación de llenado, costo y resiliencia para el doble del caudal – Chicó Sur**

Relación de llenado	Costo [USD]	Resiliencia	Cambio porcentual
0.5	\$ 9,698,641.67	0.972509783	18.35%
0.55	\$ 9,300,197.63	0.974686970	13.49%
0.6	\$ 9,042,171.92	0.978894468	10.34%
0.65	\$ 8,836,026.48	0.979761344	7.83%
0.7	\$ 8,606,021.99	0.981500994	5.02%
0.75	\$ 8,419,351.65	0.983295792	2.74%
0.8	\$ 8,320,204.85	0.984916121	1.53%
0.85	\$ 8,260,099.40	0.985568679	0.80%
0.9	\$ 8,212,711.91	0.985571299	0.22%
0.93	\$ 8,194,661.72	0.985963794	-

Las curvas obtenidas fueron:


**Figura 21. Costo vs. Relación de llenado – C1 para el doble del caudal – Chicó Sur**

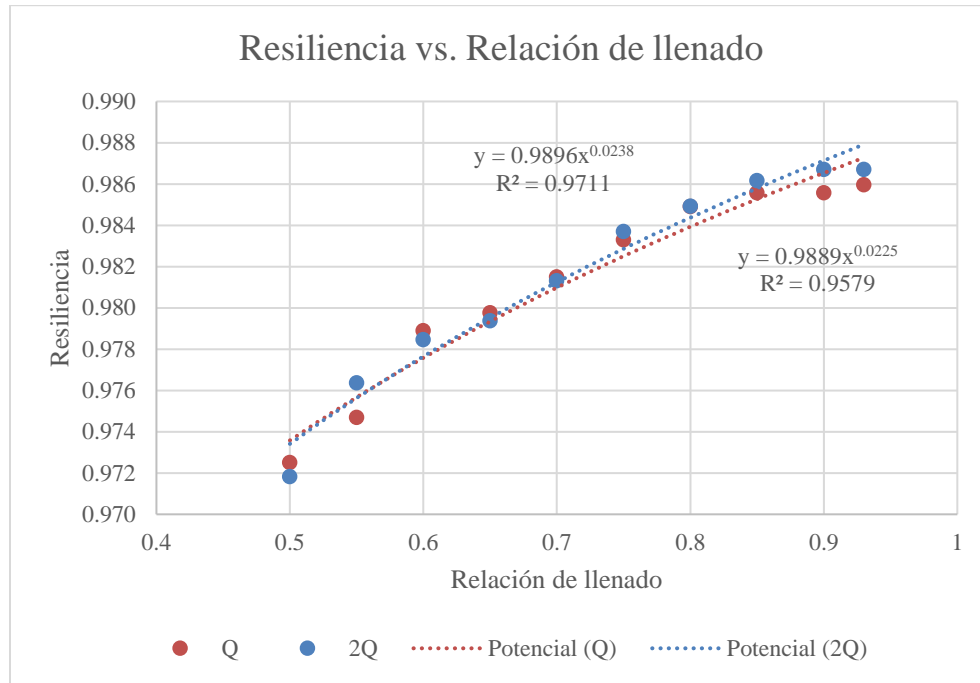


Figura 22. Resiliencia vs. Relación de llenado – C1 para el doble del caudal – Chicó Sur

Como se puede observar, los costos aumentaron significativamente para cada una de las relaciones de llenado, debido a la necesidad de incorporar tuberías de mayor diámetro para evacuar el exceso de caudal en la red. Sin embargo, en cuanto a la resiliencia frente a la relación de llenado, ambas curvas casi se superponen, lo que demuestra que el índice no responde de manera significativa a situaciones en las que el caudal aumenta considerablemente, lo que podría esperarse en escenarios de mayor presión de flujo.

#### 5.1.4 Resiliencia, relación de llenado y costo de diseño para otras modificaciones

Estos mismos resultados se obtuvieron para diferentes configuraciones de caudal aplicadas en la misma red, con el objetivo de identificar algún posible patrón. Se realizó los cálculos para un caudal igual a la mitad del caudal original y para uno de cinco veces el caudal original. En este caso, se redujo el número de resiliencias empleadas a solo 3 ( $y_n = \{0.5, 0.7, 0.93\}$ ), que son los puntos más representativos de la curva, para poder economizar tiempo en la obtención de los datos. A continuación, se presentan los resultados:

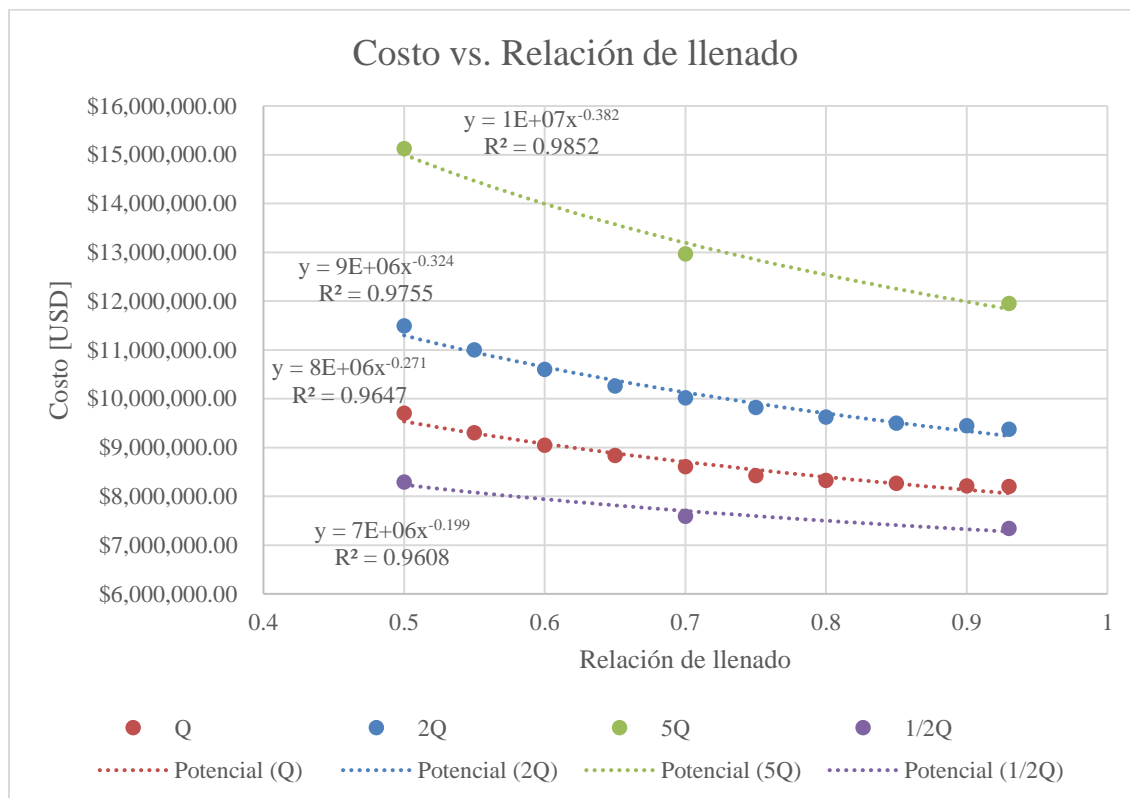
**Tabla 8. Compilado de resultados de relación de llenado, costo y resiliencia para la mitad del caudal – Chicó Sur**

Relación de llenado	Costo [USD]	Resiliencia	Cambio porcentual
0.5	\$ 8,289,474.06	0.967132633	13.01%
0.7	\$ 7,587,667.66	0.979401999	3.44%
0.93	\$ 7,335,436.28	0.981654665	-

**Tabla 9. Compilado de resultados de relación de llenado, costo y resiliencia para cinco veces el caudal – Chicó Sur**

Relación de llenado	Costo [USD]	Resiliencia	Cambio porcentual
0.5	\$ 15,123,001.51	0.975945157	26.54%
0.7	\$ 12,967,453.89	0.985160924	8.50%
0.93	\$ 11,951,039.16	0.988652411	-

Las curvas obtenidas, indicando los resultados de las anteriores secciones para poder observar el cambio de comportamiento, fueron las siguientes:


**Figura 23. Costo vs. Relación de llenado – C1 para diferentes configuraciones de caudal – Chicó Sur**

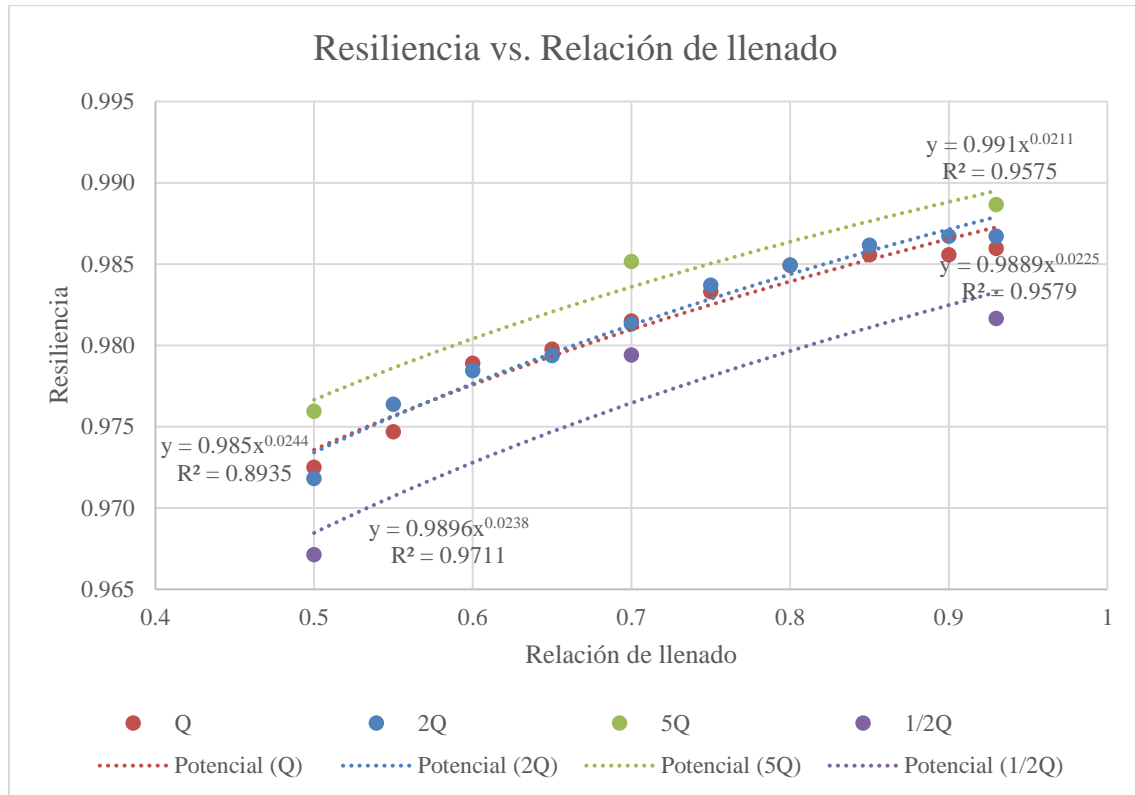


Figura 24. Resiliencia vs. Relación de llenado – C1 para diferentes configuraciones de caudal – Chicó Sur

En las gráficas anteriores es posible observar que, por una parte, el comportamiento de los costos se describe igual que en la sección anterior: el costo aumenta a medida que el caudal en la red aumenta y viceversa. Y, en términos de la relación de llenado, el comportamiento siempre es igual: el costo disminuye a medida que la relación de llenado aumenta.

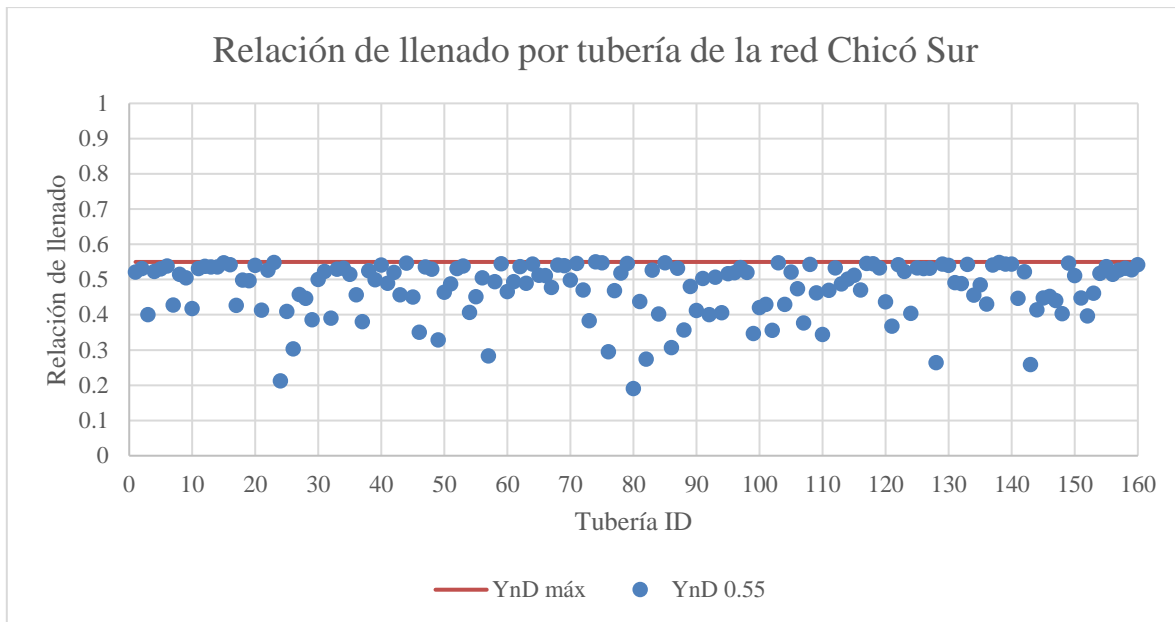
Por otro lado, en términos de la resiliencia versus la relación de llenado, las curvas obtenidas con la mitad del caudal y con cinco veces el caudal original ya no se superponen del todo, pero aún presentan una cercanía significativa y el comportamiento es el mismo: a medida que la relación de llenado aumenta, el valor del índice de resiliencia también lo hace. Esta situación vuelve a confirmar las posibles inconsistencias en el planteamiento del índice de resiliencia que se ha empleado a lo largo de esta investigación, puesto que no responde a este tipo de modificaciones que deberían alterarlo de manera notoria.

### 5.1.5 Relación de llenado para las diferentes tuberías de la red Chicó Sur

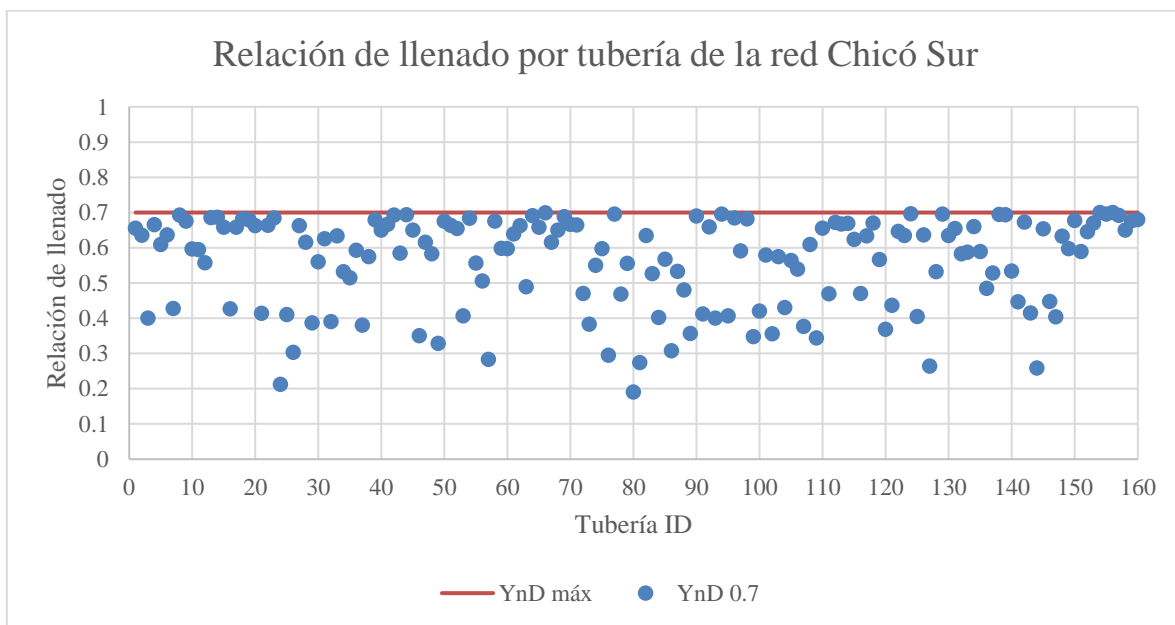
Para confirmar los resultados obtenidos en las secciones anteriores, fue necesario verificar las relaciones de llenado calculadas para cada una de las tuberías de la red, teniendo en cuenta el Criterio 1. Esto permitió observar que ninguna de las tuberías alcanza la relación



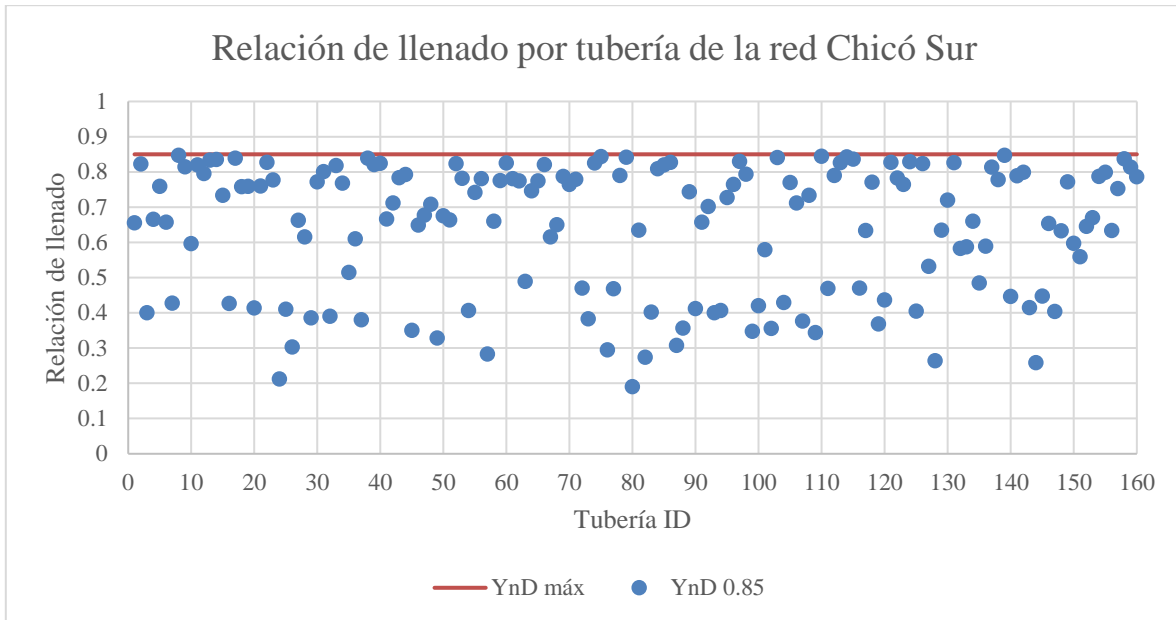
de llenado máxima establecida, a pesar de que algunas se acercan considerablemente a este valor. Inicialmente, se mostrará las relaciones de llenado obtenidas para todas las tuberías de la red, teniendo en cuenta algunas relaciones de llenado significativas como: 0.55, 0.7, 0.85 y 0.93.



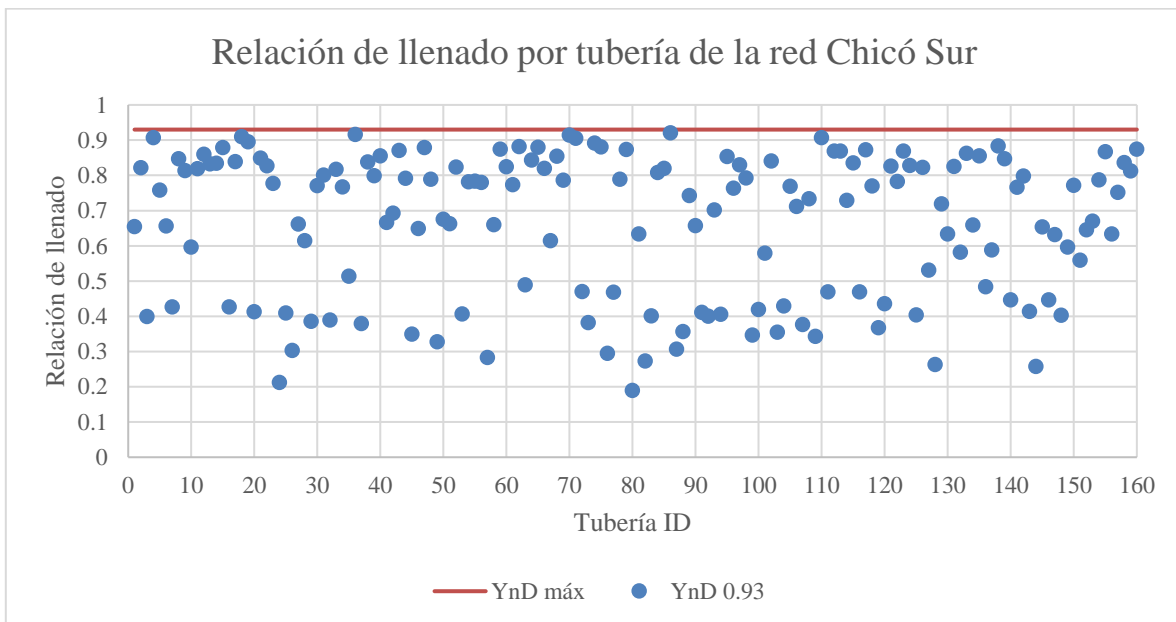
**Figura 25. Relación de llenado por tubería de la red Chicó Sur - C1 - YnD: 0.55**



**Figura 26. Relación de llenado por tubería de la red Chicó Sur - C1 - YnD: 0.7**



**Figura 27. Relación de llenado por tubería de la red Chicó Sur - C1 - YnD: 0.85**



**Figura 28. Relación de llenado por tubería de la red Chicó Sur - C1 - YnD: 0.93**

Las gráficas obtenidas muestran que las relaciones de llenado se mantienen por debajo del umbral de establecido en cada caso, lo que indica que el sistema opera dentro de los límites previstos, sin llegar a condiciones críticas. Esta verificación es crucial para asegurar que el diseño de la red es adecuado y puede manejar el flujo de agua de manera eficiente sin



comprometer su capacidad de evacuación. Además, también garantiza que los cálculos para el índice de resiliencia en cada caso están sujetos a la restricción de la relación de llenado y que su baja respuesta ante las modificaciones realizadas a la red depende única y exclusivamente de la manera en la que el índice fue planteado.

## 5.2 Chicó Norte

Después de obtener resultados sólidos y consistentes para la red Chicó Sur, se consideró la posibilidad de extrapolar esta información a una red de mayor envergadura, como es el caso de Chicó Norte, con el fin de determinar si los comportamientos observados se mantenían también en este escenario. No obstante, el manejo de una red que supera los 500 nodos resulta ser un desafío significativo, ya que presenta complicaciones técnicas al momento de ejecutar los programas utilizados hasta el momento, lo que genera dificultades en la obtención, procesamiento y análisis de los datos.

No obstante, tras un análisis exhaustivo para identificar la causa por la cual no era posible obtener un diseño para esta red, se concluyó que el problema se debía a las condiciones topográficas de Chicó Norte. En particular, en la zona cercana a los cerros orientales de Bogotá, la red presenta pendientes de hasta un 27%. Esta topografía provoca que se superen las velocidades máximas establecidas en las restricciones iniciales, lo que genera que el programa UTOPIA falle de manera abrupta al intentar procesar estos datos.

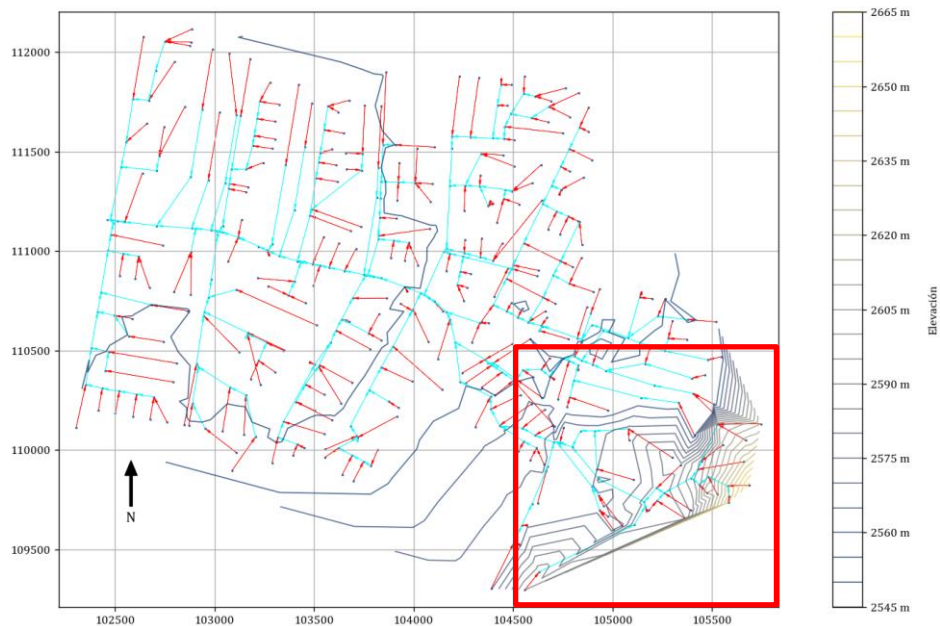


Figura 29. Topografía red Chicó Norte



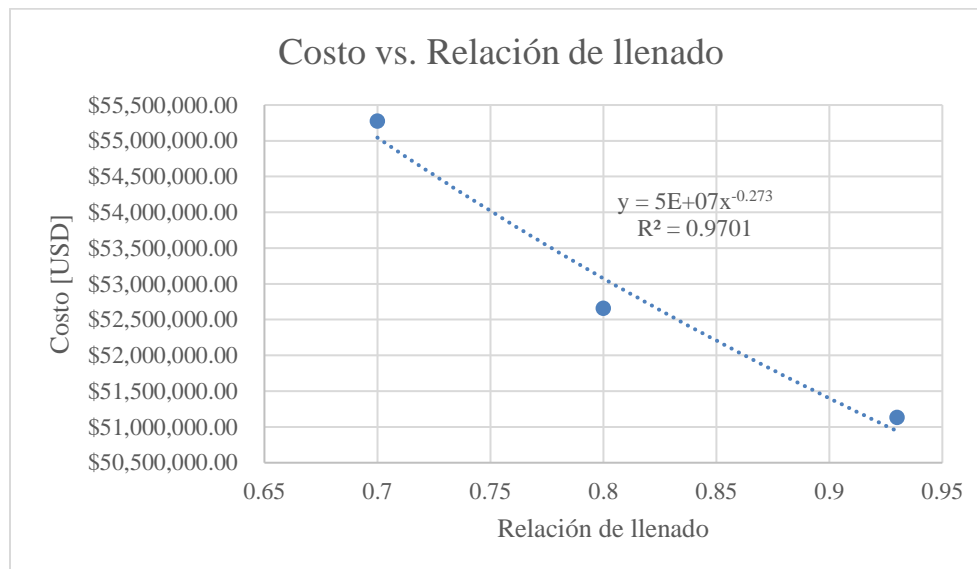
En la anterior figura pueden observarse las zonas de alta pendiente de la red Chicó Norte, señaladas con el rectángulo rojo.

De esa manera, para la obtención de los resultados en la red, fue necesario modificar las condiciones iniciales de velocidad máxima. En este caso, se utilizó una velocidad máxima de 10 m/s, utilizando el Criterio 1. A continuación, se presentan los resultados obtenidos, teniendo en cuenta el caudal original de la red:

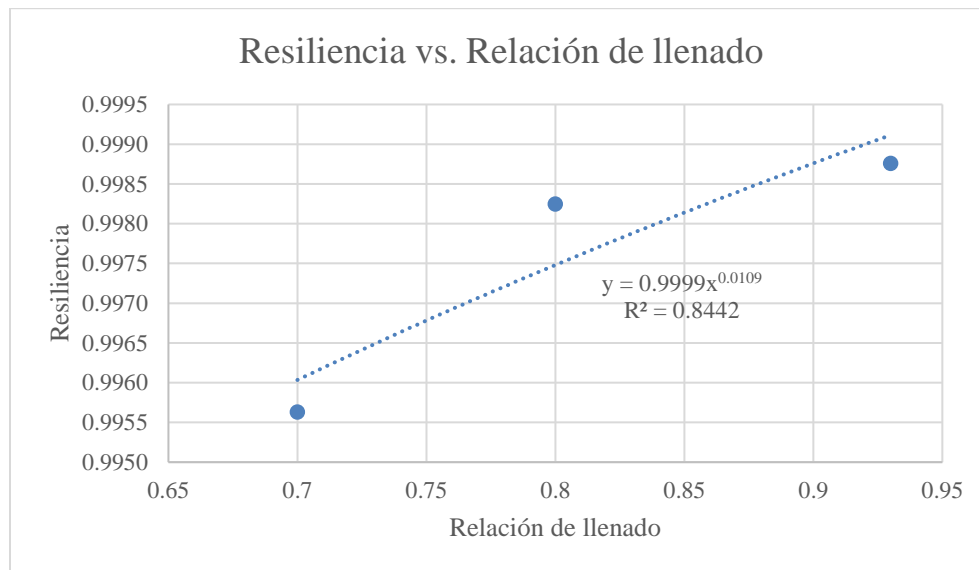
**Tabla 10. Compilado de resultados de relación de llenado, costo y resiliencia – Chicó Norte**

Relación de llenado	Costo [USD]	Resiliencia	Cambio porcentual
0.7	\$ 55,275,043.73	0.995629669	8.10%
0.8	\$ 52,660,264.28	0.998245648	2.99%
0.93	\$ 51,131,745.66	0.998756368	-

Y, por último, las curvas se presentan de la siguiente manera:



**Figura 30. Costo vs. Relación de llenado – C1 – Chicó Norte**



**Figura 31. Resiliencia vs. Relación de llenado – C1 – Chicó Norte**

Como se puede observar en las figuras y las curvas obtenidas, los resultados muestran un comportamiento similar al obtenido en el análisis de la red Chicó Sur. En términos de costos, se evidencia que estos disminuyen a medida que la relación de llenado aumenta. Esto se debe a que, con una mayor relación de llenado, se requieren diámetros de tuberías más pequeños para transportar el caudal dentro de la red, lo que resulta en una reducción de los costos asociados al sistema.

En cuanto a la resiliencia, el análisis indica que, conforme la relación de llenado aumenta, también lo hace el índice de resiliencia. Sin embargo, al igual que en los resultados de la red Chicó Sur, los incrementos en el índice son mínimos y no tienen un impacto significativo. De hecho, al pasar de una relación de llenado de 0.7 a 0.93, el índice de resiliencia solo aumenta en 0.003 puntos, lo que refuerza la premisa de que el índice utilizado en esta investigación no responde de manera efectiva en estos contextos. Este comportamiento sugiere que el modelo de resiliencia, tal como fue planteado, podría no ser el más adecuado para capturar de forma precisa las variaciones importantes en el desempeño de la red frente a cambios en la relación de llenado.

Debido a las limitaciones de tiempo, no fue posible obtener más resultados de la red Chicó Norte. Sin embargo, los resultados obtenidos hasta el momento proporcionan información valiosa que permite robustecer el análisis realizado. Estos datos, aunque limitados, contribuyen a la formulación de conclusiones precisas y respaldan las observaciones previas, ofreciendo una base sólida para futuras investigaciones o ajustes en el modelo.



## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta sección presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos durante la investigación, enfocándose en el desempeño de las redes de alcantarillado Chicó Sur y Chicó Norte, teniendo en cuenta árboles de red generados a partir de los criterios de selección evaluados y diferentes configuraciones de caudal. Se evalúan patrones clave y relaciones entre las variables estudiadas, destacando los principales hallazgos obtenidos a partir de las tablas y curvas generadas y consignadas en la sección anterior.

### 6.1 Análisis de la red Chicó Sur

#### 6.1.1 Índice de resiliencia y correlación entre los árboles de la red

La Tabla 3 muestra que los índices de resiliencia obtenidos para los diferentes criterios son muy similares, oscilando entre 0.975 y 0.986. Esta uniformidad sugiere que el índice de resiliencia propuesto por Mugume et al. (2015) no es particularmente sensible a las variaciones en la estructura del árbol generado por los criterios de Bermúdez (2023). Además, al implementar la propuesta de la eliminación de las tuberías con mayor caudal (Tabla 4), los resultados no cambiaron de manera notable, manteniendo el mismo comportamiento que con los criterios previamente evaluados. Esto indica que el índice de resiliencia, en su forma actual, no considera adecuadamente el peso relativo de estas tuberías en la dinámica global de la red. Aunque estas tuberías transportan un volumen significativo de flujo, su exclusión no alteró de manera perceptible el promedio del índice, posiblemente debido a que el modelo prioriza un cálculo homogéneo en lugar de evaluar la importancia de ciertos elementos.

Este hallazgo plantea la necesidad de ajustar la metodología para que el índice considere factores que reflejen mejor el papel de las tuberías clave en la funcionalidad y resiliencia del sistema. Por ejemplo, se podría incluir un enfoque que evalúe el impacto diferencial de las tuberías basado en su caudal y conectividad. Además, la baja variación observada en los resultados cuestiona si el índice actual es suficiente para capturar diferencias importantes entre configuraciones de diseño. Por tanto, se recomienda una revisión exhaustiva del cálculo del índice, incorporando variables que destaquen la criticidad y el desempeño de elementos estructurales particulares dentro de la red.



### 6.1.2 Relación de llenado, costo y resiliencia

La Tabla 6 indica que al pasar de una relación de llenado de 0.93 a 0.70, el costo incrementa en apenas un 5%, mientras que la resiliencia prácticamente no presenta variaciones significativas. Este hallazgo sugiere que adoptar relaciones de llenado más bajas podría ser una estrategia eficiente, en términos de que no se pondría en riesgo la operatividad a futuro del sistema general de la red, como sucede al emplear relaciones de llenado muy altas. Además, los recursos no se verían afectados de manera drástica, permitiendo dar mayores garantías de la funcionalidad del diseño y favoreciendo su implementación en escenarios donde los costos de mantenimiento son un factor determinante.

La Figura 19 y la Figura 20 muestran una correlación negativa entre la relación de llenado y el costo de diseño, mientras que la resiliencia aumenta con el incremento de la relación de llenado. Este comportamiento tiene sentido desde un punto de vista técnico, ya que mayores relaciones de llenado permiten optimizar el uso de los materiales (reduciendo costos) y mejorar la eficiencia del sistema. Sin embargo, la variación mínima en la resiliencia sugiere que el índice empleado no refleja adecuadamente las diferencias en el desempeño del sistema.

### 6.1.3 Evaluación con caudales modificados

La evaluación de las redes bajo caudales modificados permitió observar cómo estas responden a variaciones significativas en el volumen de flujo. Se realizaron simulaciones reduciendo, duplicando y quintuplicando el caudal base para ambas redes (Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9), analizando las implicaciones en costos y resiliencia.

- **Con caudal reducido a la mitad:** El costo total disminuyó en un 30%, reflejando una menor necesidad de tuberías de gran diámetro. Sin embargo, la resiliencia aumentó ligeramente (alrededor de un 3%), indicando que el sistema se vuelve más estable bajo condiciones de menor demanda, aunque esto no refleja escenarios reales de funcionamiento crítico.
- **Con caudales duplicados:** Se observó que el costo total aumentó en un 48%, mientras que la resiliencia apenas disminuyó en un 2%. Este comportamiento sugiere que la red mantiene su funcionalidad bajo condiciones de mayor demanda, aunque a un costo significativamente mayor.
- **Con caudales quintuplicados:** El costo total aumentó en un 160%, reflejando el impacto considerable de los caudales extremos en el diseño. Sin embargo, la



resiliencia presentó una reducción marginal, inferior al 5%, lo que indica que el sistema sigue siendo operativo, aunque con mayores requerimientos estructurales.

La Figura 23 y la Figura 24 muestran que, a pesar de los aumentos en los caudales, la relación de llenado sigue siendo un factor determinante en la optimización del diseño, manteniendo patrones similares a los observados en condiciones normales. Esto destaca que, aunque las redes pueden adaptarse a escenarios extremos, los costos asociados son significativamente altos, y el índice de resiliencia no capta completamente los efectos de estas modificaciones.

## 6.2 Análisis de la red Chicó Norte

### 6.2.1 Condiciones topográficas y limitaciones

El diseño de la red Chicó Norte enfrentó restricciones significativas debido a su topografía, especialmente en las zonas cercanas a los cerros orientales, donde las pendientes alcanzan hasta un 27%. Esto generó velocidades superiores a los límites establecidos, requiriendo una modificación en las restricciones de velocidad máxima para obtener resultados.

### 6.2.2 Costo y resiliencia

La Figura 30 confirma que los costos disminuyen de forma significativa al aumentar la relación de llenado, debido a la menor cantidad de materiales requeridos. Por otro lado, la Figura 31 muestra que la resiliencia crece de manera marginal con relaciones de llenado más altas, lo que indica que el sistema mantiene su estabilidad sin grandes cambios en el desempeño funcional. Este comportamiento, aunque consistente con los resultados observados en Chicó Sur, subraya una limitación importante del índice de resiliencia: su falta de sensibilidad para reflejar las diferencias estructurales y funcionales en redes con condiciones topográficas y geométricas complejas, como las de Chicó Norte. Además, este análisis sugiere que optimizar la relación de llenado puede ser una estrategia viable para equilibrar costos y resiliencia, siempre que se complementen con ajustes específicos en el diseño para abordar características únicas del terreno y la red.

## 6.3 Comparación entre redes de estudio

Al comparar las redes Chicó Sur y Chicó Norte, los patrones de comportamiento muestran similitudes en términos generales, pero con diferencias importantes en el detalle. En Chicó Sur se observó un mayor nivel de detalle en la obtención de los resultados, gracias a un monitoreo más exhaustivo de las variables y una mayor cantidad de simulaciones realizadas, lo que permitió identificar tendencias y ajustes específicos con mayor precisión.



---

Por el contrario, en Chicó Norte, el análisis estuvo condicionado por las complejidades topográficas, limitando la cantidad de iteraciones y generando resultados menos detallados.

Los costos en Chicó Norte son significativamente mayores debido a su gran extensión y a las condiciones topográficas más complejas que requieren ajustes adicionales en el diseño, como tuberías de mayor diámetro y mayores longitudes. Por otro lado, el índice de resiliencia muestra valores ligeramente superiores en Chicó Norte, lo que sugiere que esta red puede ser más estable frente a fallas localizadas. Sin embargo, estas diferencias en resiliencia no son lo suficientemente significativas como para justificar la complejidad adicional del diseño y el aumento de costos. Esto resalta la necesidad de optimizar los criterios de diseño para lograr un balance adecuado entre costos, funcionalidad y resiliencia, especialmente en redes con retos topográficos similares.



## 7 CONCLUSIONES

- El índice de resiliencia propuesto Mugume et al. (2015) demostró ser funcional en escenarios básicos, pero su baja sensibilidad a las variaciones en la estructura de las redes evaluadas limita su aplicabilidad para reflejar diferencias funcionales significativas, especialmente en redes complejas.
- La metodología actual no considera adecuadamente la conectividad ni el peso crítico de las tuberías con mayor caudal, lo que podría generar un enfoque subóptimo en el diseño y la evaluación de redes.
- La optimización de la relación de llenado resultó ser una estrategia efectiva para reducir costos, ya que una relación de llenado cercana a 0.7 logró disminuir el uso de materiales sin afectar la resiliencia del sistema, lo que podría ser implementado de manera consistente en diseños futuros.
- Bajo escenarios de caudal reducido, duplicado y quintuplicado, el índice de resiliencia presentó variaciones mínimas. Esta situación resalta de manera drástica la falta de sensibilidad del índice para capturar las implicaciones de escenarios críticos.
- En la red Chicó Norte, las pendientes pronunciadas y las restricciones topográficas limitaron los ajustes posibles y complicaron los cálculos. Esto evidenció la necesidad de contemplar modificaciones especiales a las restricciones que inicialmente se habían establecido, por lo que existe la posibilidad de que los datos obtenidos se encuentren sesgados.
- En Chicó Sur se alcanzó un nivel de detalle mayor en la obtención de los resultados, lo que permitió identificar ajustes específicos y tendencias más claras en la optimización del sistema. Este enfoque detallado debería replicarse en otras redes para lograr resultados más precisos y confiables. Además, permitiría la comparación, por ejemplo, con escenarios y características propias de otras regiones.



## 8 RECOMENDACIONES

- Incorporar factores que reflejen el peso relativo de las tuberías críticas, las conexiones clave y la capacidad de adaptación del sistema frente a fallas localizadas.
- Diseñar redes con relaciones de llenado cercanas al 0.7 como estándar, considerando que esta configuración equilibra costos y funcionalidad sin comprometer la resiliencia evaluada a partir del índice utilizado.
- Implementar metodologías que evalúen el comportamiento de las redes bajo variaciones estacionales, eventos climáticos extremos y demandas atípicas.
- Modificar los modelos actuales para incluir variables específicas de redes topográficamente complejas, como ajustes automáticos en pendientes críticas y restricciones dinámicas.
- Aplicar el nivel de detalle alcanzado en Chicó Sur a todas las redes, asegurando que los resultados reflejen patrones y tendencias de manera precisa y confiable.
- Realizar investigaciones futuras que contrasten diferentes configuraciones de red y criterios de selección en redes urbanas e interurbanas, explorando nuevas perspectivas en resiliencia y sostenibilidad.



---

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, A. (2016). *Evaluación de funciones objetivo en la metodología exhaustiva desarrollada por el CIACUA para el diseño optimizado de alcantarillados* (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes, Bogotá. Repositorio Uniandes.
- Aguilar, A. (2019). *Metodología para el Diseño Optimizado de Redes de Alcantarillado* (Tesis de maestría). Universidad de los Andes, Bogotá. Repositorio Uniandes.
- Bermúdez, G. (2023). *Optimal sewer network design using utopia: modifications in geometry and mass criteria of the current methodology* (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes, Bogotá. Repositorio Uniandes.
- Butler, D., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., Diao, K., & Astaraie-Imani, M. (2014). A new approach to urban water management: Safe and SuRe. *Procedia Engineering*, 89, 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.198>
- Duque, N. (2013). *Metodología para la optimización del diseño de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado* (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes, Bogotá. Repositorio Uniandes.
- Duque, N. (2015). *Metodología para el Diseño Optimizado de Redes de Alcantarillado* (Tesis de maestría). Universidad de los Andes, Bogotá. Repositorio Uniandes.
- Saldarriaga, J., & Herrán, J. (2023). Sewer network design framework for low-cost, resilient, and reliable designs. *Urban Water Journal*, 20(7), 943-952. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2218339>
- Haghighi, A., & Bakshipour, A. (2016). Reliability-based layout design of sewage collection systems in flat areas. *Urban Water Journal*, 13(8), 790-802. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1036085>.
- Mugume, S. N., Gomez, D. E., Fu, G., Farmani, R., & Butler, D. (2015). A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. *Water Research*, 81, 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.030>.
- Maurer, M., Wolfram, M., & Anja, H. (2010). Factors affecting economies of scale in combined sewer systems. *Water Science and Technology*, 62(1), 36-41.



---

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2022). *Informe Nacional de Coberturas de los Servicios Públicos de Acueducto, Alcantarillado y Aseo 2022*. Bogotá, Colombia.

Saldarriaga, J., Zambrano, J., Herrán, J., & Iglesias-Rey, P. L. (2021). Layout Selection for an Optimal Sewer Network Design Based on Land Topography, Streets Network Topology, and Inflows. *Water*, 13(18), 2491. <https://doi.org/10.3390/w13182491>

## 10 ANEXOS

### Anexo 1: Patrones en tuberías de mayor flujo de caudal para los diferentes criterios

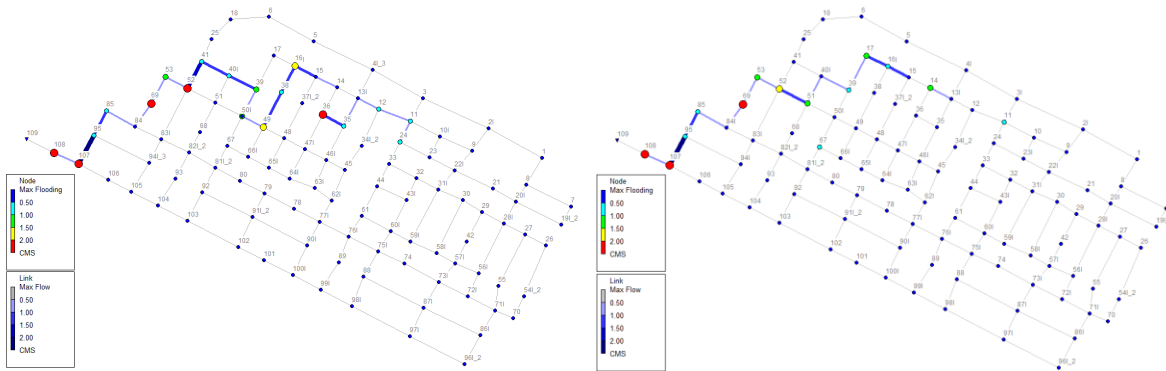


Figura 32. Identificación de tuberías con mayores caudales C2 y C3 – Chicó Sur

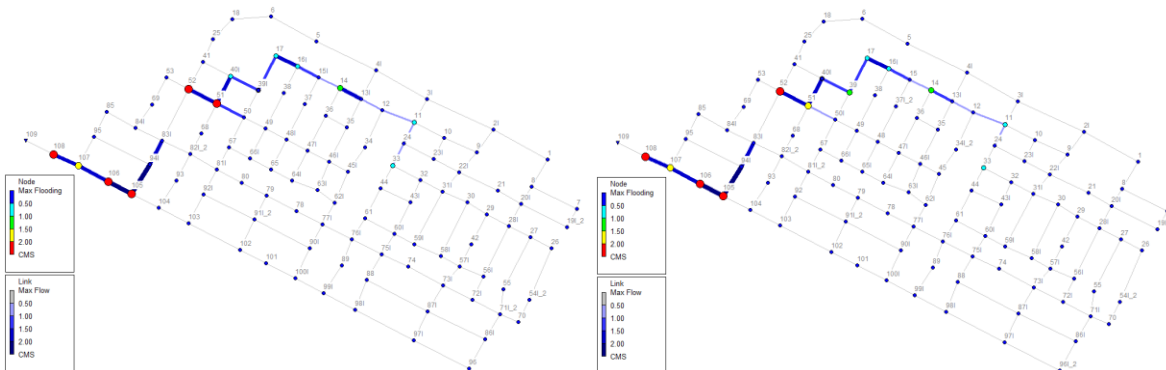


Figura 33. Identificación de tuberías con mayores caudales C10 y C18 – Chicó Sur

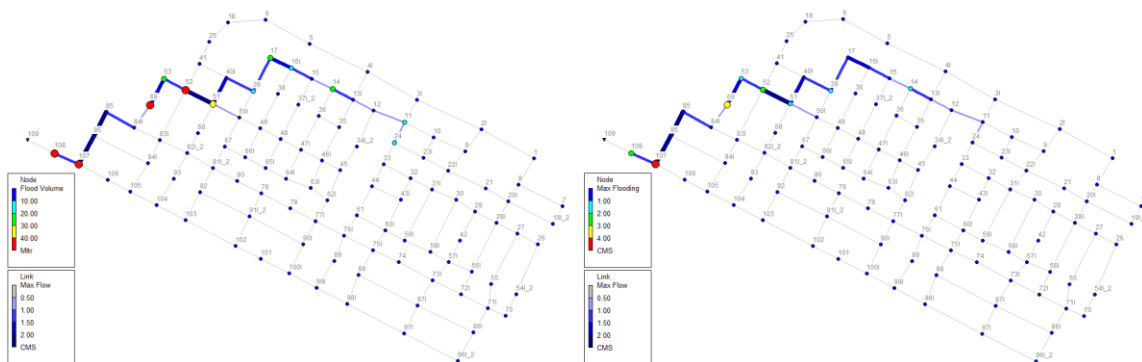


Figura 34. Identificación de tuberías con mayores caudales C22 y C28 – Chicó Sur