

**TESIS DE MAESTRÍA  
INGENIERÍA CIVIL**

**DISEÑO OPTIMIZADO DE REDES DE DRENAJE URBANO. CASOS  
DE ESTUDIO VARIANDO LA TOPOGRAFÍA DEL TERRENO, LA  
DENSIDAD DE VIVIENDAS, LOS COEFICIENTES DE  
IMPERMEABILIDAD Y LA RUGOSIDAD DE LAS TUBERÍAS**

**PRESENTADO POR:**

**JESÚS DAVID ZAMBRANO BRIONES**

**ASESOR: JUAN G. SALDARRIAGA**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
JUNIO 2019**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis padres, Carol y Jesús, por todo el apoyo que me han dado en todo este tiempo.*

*Al amor de mi vida, Nataly, pieza fundamental de este logro, y cuya paciencia y amor me dieron las fuerzas necesarias para alcanzar este objetivo.*

*A mi asesor, profesor y jefe, Juan Saldarriaga, por confiar en mi trabajo y guiarme en este proceso de investigación.*

*A todas las personas que me ayudaron y colaboraron en mi tesis, especialmente a Andrés Aguilar, por ayudarme en la programación de la metodología.*

*Al estado ecuatoriano, SENESCYT e IFTH, por la ayuda económica.*

*A todos quienes hicieron de esta maestría una experiencia única en mi vida.*

*Gracias a todos.*

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos.....	3
1.1.1	Objetivo General.....	3
1.1.2	Objetivos Específicos.....	3
2	Marco teórico.....	4
2.1	Sistema de drenaje urbano.....	4
2.1.1	Significado e importancia.....	4
2.1.2	Componentes de un sistema de drenaje urbano.....	4
2.2	Generalidades sobre el diseño hidráulico de los sistemas de alcantarillado.....	6
2.2.1	Suposiciones de diseño.....	6
2.2.2	Ecuaciones de diseño.....	7
2.2.3	Restricciones de diseño.....	11
2.2.4	Función de Costo.....	13
3	Metodología para el diseño optimizado de sistemas de drenaje urbano.....	14
3.1	Introducción.....	14
3.2	Antecedentes.....	16
3.3	Metodología de diseño optimizado desarrollado en el CIACUA (UTOPIA).....	19
3.3.1	Definición del problema.....	19
3.3.2	Selección del trazado.....	22
3.3.3	Diseño hidráulico.....	24
3.4	Metodología propuesta para la elección del trazado.....	27
3.4.1	Descripción del caso de estudio original. Red Chicó sur.....	27
3.4.2	Aplicación de la metodología de Duque (2015) a la red de Chicó sur.....	29
3.4.3	Inclusión de la topografía del terreno como variable en la elección del trazado.....	31
3.4.4	Trazado inicial.....	36
3.4.5	Iteraciones e integración de la metodología.....	40
3.5	Conclusiones.....	41



---

4	Resultados.....	42
4.1	Casos de estudio .....	42
4.1.1	Red Chicó sur .....	42
4.1.2	Red Cedritos 1 .....	45
4.1.3	Red Esmeralda.....	51
4.1.4	Red Tumaco.....	56
4.1.5	Red Tumaco modificada .....	62
4.2	Comparación de la metodología exhaustiva de Duque (2015) para el diseño hidráulico con respecto al programa SewerGEMS .....	67
4.3	Desarrollo de costos en iteraciones posteriores .....	70
5	Análisis de resultados .....	71
5.1	Análisis general .....	71
5.2	Red Chicó sur .....	73
5.3	Red Cedritos 1 .....	75
5.4	Red Esmeralda.....	77
5.5	Red Tumaco original y modificada .....	78
6	Conclusiones.....	80
7	Recomendaciones y pasos a seguir .....	82
8	Referencias .....	83
9	Anexos.....	85
9.1	Datos de entrada para los casos de estudio .....	85
9.1.1	Red Chicó sur .....	85
9.1.2	Red Cedritos 1 .....	86
9.1.3	Red Esmeralda.....	88
9.1.4	Red Tumaco.....	93
9.1.5	Red Tumaco modificado .....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.- Interacción entre el medio ambiente y la población (Butler y Davies, 2011. Adaptado).....</i>	4
<i>Figura 2.- Componentes de una sección circular parcialmente llena .....</i>	7
<i>Figura 3.- Flujo uniforme en tuberías.....</i>	9
<i>Figura 4.- Diferencia entre grafos dirigidos y no dirigidos. (Duque, 2015, p. 26) .....</i>	19
<i>Figura 5.- Red de alcantarillado. (Duque, 2015, p. 28) .....</i>	20
<i>Figura 6.- Posible trazado para la red presentada en la Figura 2.....</i>	21
<i>Figura 7.- Diseño hidráulico de una tubería. (Duque, 2015, p. 31).....</i>	21
<i>Figura 8.- Tipo de tuberías para cada tramo de una red de alcantarillado. (Duque, 2015, p. 34).....</i>	22
<i>Figura 9.- Grafo para la selección del trazado de una red de alcantarillado. (Duque, 2015, p. 35).....</i>	23
<i>Figura 10.- Posibles variables de decisión por tramo. (Duque, 2015., p. 35).....</i>	24
<i>Figura 11.- Conjunto de nodos que pertenecen a un mismo pozo de inspección. (Duque, 2015, p. 44).....</i>	25
<i>Figura 12.- Solución para el diseño hidráulico de una red de 4 pozos y una salida. (Duque, 2015, p. 67).....</i>	25
<i>Figura 13.- Metodología desarrollada por Duque (2015). (Aguilar, 2016, p. 23) .....</i>	26
<i>Figura 14.- Ubicación de la red Chico sur, Bogotá.....</i>	27
<i>Figura 15.- Ubicación de pozos y tuberías de la red de Chico Sur.....</i>	28
<i>Figura 16.- Topografía del terreno de la red de Chicó sur. Curvas principales (rojas) cada metro .....</i>	28
<i>Figura 17.- Desarrollo de costos para un trazado inicial aleatorio utilizando la ecuación de Navarro .....</i>	29
<i>Figura 18.- Mejor resultado encontrado para la red de Chico sur .....</i>	30
<i>Figura 19.- Trazado alternativo propuesto siguiendo la topografía natural del terreno .....</i>	31
<i>Figura 20.- Gráfica de los costos y caudal de cada tramo en la red de Chicó sur evaluada .....</i>	33
<i>Figura 21.- Metodología propuesta para determinar el coeficiente <math>c</math> y <math>a</math> de las tuberías continuas.....</i>	35
<i>Figura 22.- Suposición de tramo <math>ij</math> para determinar los valores del coeficiente <math>m</math>.....</i>	37
<i>Figura 23.- Esquema para la asignación del coeficiente <math>m</math> a través del criterio 7 .....</i>	39
<i>Figura 24.- Diagrama de flujo de la metodología propuesta.....</i>	40
<i>Figura 25.- Trazado para la red Chicó sur con el criterio 3. En magenta las tuberías de inicio y en azul las continuas .....</i>	43
<i>Figura 26.- Regresión lineal de los costos por metro lineal de las tuberías continuas y su caudal de diseño ..</i>	44
<i>Figura 27.- Trazado resultante para Chicó sur en la iteración 1 .....</i>	45
<i>Figura 28.- Ubicación de la Red Cedritos 1, Bogotá.....</i>	46

---

<i>Figura 29.- En la parte izquierda la ubicación de manholes y tuberías de la red, y en la parte derecha la topografía del terreno. Curvas principales (rojas) cada metro.....</i>	47
<i>Figura 30.- Trazado inicial para Cedritos 1 utilizando el criterio 5. En magenta los tramos de inicio o arranque y en azul las continuas.....</i>	49
<i>Figura 31.- Regresión lineal de los costos por metro lineal de las tuberías continuas y su caudal de diseño en la red Cedritos 1, criterio 5 .....</i>	50
<i>Figura 32.- Trazado resultante para la red Cedritos 1 en la iteración 1 .....</i>	51
<i>Figura 33.- Ubicación de la Red Esmeralda .....</i>	52
<i>Figura 34.- Ubicación de los pozos y tuberías de la red Esmeralda .....</i>	52
<i>Figura 35.- Topografía del terreno de la red Esmeralda. Curvas de nivel principal (rojas) cada metro .....</i>	53
<i>Figura 36.- Trazado inicial para red Esmeralda utilizando el criterio 6. En magenta los tramos de inicio o arranque y en azul las continuas.....</i>	54
<i>Figura 37.- Regresión lineal de los costos por metro lineal de las tuberías continuas y su caudal de diseño en la red Esmeralda, criterio 6.....</i>	55
<i>Figura 38.- Trazado resultante para la red Esmeralda en la iteración 1.....</i>	56
<i>Figura 39.- Ubicación de la red Tumaco .....</i>	57
<i>Figura 40.- Topografía del terreno de la red Tumaco. Curvas de nivel principal (rojas) cada metro .....</i>	57
<i>Figura 41.- Ubicación de pozos y tramos en la red Tumaco.....</i>	58
<i>Figura 42.- Trazado inicial para red Tumaco utilizando el criterio 7. En magenta los tramos de inicio o arranque y en azul las continuas.....</i>	60
<i>Figura 43.- Regresión lineal de los costos por metro lineal de las tuberías continuas y su caudal de diseño en la red Tumaco, criterio 7 .....</i>	61
<i>Figura 44.- Trazado resultante para la red Tumaco en la iteración 1 .....</i>	62
<i>Figura 45.-Topografía del terreno de la red Tumaco modificada. Curvas de nivel principal (rojas) cada metro .....</i>	63
<i>Figura 46.- Trazado inicial para red Tumaco modificada utilizando el criterio 6. En magenta los tramos de inicio o arranque y en azul las continuas .....</i>	64
<i>Figura 47.- Regresión lineal de los costos por metro lineal de las tuberías continuas y su caudal de diseño en la red Tumaco, criterio 6 .....</i>	65
<i>Figura 48.- Trazado resultante para la red Tumaco modificada en la iteración 1 .....</i>	66
<i>Figura 49.- Distribución de diámetros para el diseño obtenido con el programa UTOPIA en la red Chicó sur .....</i>	68
<i>Figura 50.- Distribución de diámetros para el diseño obtenido con el programa SewerGEMS en la red Chicó sur .....</i>	68
<i>Figura 51.- Cobertura promedio del diseño obtenido con el programa UTOPIA en la red Chicó sur.....</i>	69



---

<i>Figura 52.- Cobertura promedio del diseño obtenido con el programa SewerGEMS en la red Chicó sur.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 53.- Tuberías continuas en el trazado inicial (criterio 3) para la red Chicó sur .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 54.- Tuberías continuas en el trazado de la iteración 1 para la red Chicó sur .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 55.- Tuberías continuas para el trazado inicial (criterio 5) en la red Cedritos 1 .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 56.- Tuberías continuas para el trazado de la iteración 1 en la red Cedritos 1 .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 57.- Tuberías continuas del trazado inicial (criterio 6) para la red Esmeralda .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 58.- Tuberías continuas del trazado definido en la iteración 1 para la red Esmeralda .....</i>	<i>78</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.-</i> Suposiciones de flujo en alcantarillados .....	6
<i>Tabla 2.-</i> Restricciones hidráulicas para el diseño de redes de drenaje urbano en Ecuador y Colombia .....	12
<i>Tabla 3.-</i> Diámetro real interno de las tuberías de PVC comerciales disponible en Colombia .....	12
<i>Tabla 4.-</i> Resultados del diseño hidráulico para los 9 trazados iniciales de Chicó sur .....	43
<i>Tabla 5.-</i> Resultados del diseño hidráulico para el trazado inicial e iteración 1 de la red de Chicó sur .....	45
<i>Tabla 6.-</i> Resultados del diseño hidráulico para los 9 trazados iniciales de Cedritos 1 y el obtenido con la metodología de Duque (2015) .....	48
<i>Tabla 7.-</i> Resultados del diseño hidráulico para el trazado inicial e iteración 1 de la red de Cedritos 1 .....	51
<i>Tabla 8.-</i> Resultados del diseño hidráulico para los 6 criterios usados para determinar el trazado inicial de la red Esmeralda .....	54
<i>Tabla 9.-</i> Resultados del diseño hidráulico para el trazado inicial e iteración 1 de la red de Cedritos 1 .....	56
<i>Tabla 10.-</i> Resultados del diseño hidráulico para los 7 criterios usados para determinar el trazado inicial de la red Tumaco y los resultados obtenidos con la metodología de Duque (2015) .....	59
<i>Tabla 11.-</i> Resultados del diseño hidráulico para el trazado inicial, iteración 1 y metodología Duque (2015) de la red Tumaco .....	62
<i>Tabla 12.-</i> Resultados del diseño hidráulico para los 7 criterios usados para determinar el trazado inicial de la red Tumaco modificada y los resultados obtenidos con la metodología de Duque (2015) .....	64
<i>Tabla 13.-</i> Resultados del diseño hidráulico para el trazado inicial, iteración 1 y metodología Duque (2015) de la red Tumaco modificada .....	66
<i>Tabla 14.-</i> Resultados del diseño hidráulico obtenido con el programa UTOPIA y SewerGEMS .....	67
<i>Tabla 15.-</i> Desarrollo de costos en las iteraciones para la metodología propuesta en la red Chicó sur .....	70
<i>Tabla 16.-</i> Resumen de resultados en los trazados iniciales de los casos de estudio .....	72
<i>Tabla 17.-</i> Resultados para la red Cedritos 1 con topografía plana sin desnivel .....	75



## ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1</i> .....	7
<i>Ecuación 2</i> .....	7
<i>Ecuación 3</i> .....	8
<i>Ecuación 4</i> .....	8
<i>Ecuación 5</i> .....	8
<i>Ecuación 6</i> .....	8
<i>Ecuación 7</i> .....	8
<i>Ecuación 8</i> .....	9
<i>Ecuación 9</i> .....	9
<i>Ecuación 10</i> .....	9
<i>Ecuación 11</i> .....	10
<i>Ecuación 12</i> .....	10
<i>Ecuación 13</i> .....	10
<i>Ecuación 14</i> .....	11
<i>Ecuación 15</i> .....	13
<i>Ecuación 16</i> .....	23
<i>Ecuación 17</i> .....	32
<i>Ecuación 18</i> .....	34
<i>Ecuación 19</i> .....	35
<i>Ecuación 20</i> .....	36
<i>Ecuación 21</i> .....	36
<i>Ecuación 22</i> .....	38
<i>Ecuación 23</i> .....	38
<i>Ecuación 23</i> .....	38
<i>Ecuación 25</i> .....	39
<i>Ecuación 26</i> .....	39

## 1 INTRODUCCIÓN

El diseño optimizado de redes de drenaje urbano es un problema que, históricamente, ha sido poco estudiado en comparación con otros tipos de problemas de la ingeniería hidráulica, como por ejemplo, las redes de abastecimiento de agua potable que es un problema resuelto. La complejidad del problema radica en la necesidad de descomponer el diseño en dos partes: la elección del trazado y el diseño hidráulico, cada uno de estos con variables, restricciones y datos de entrada diferentes. Esta complejidad ha conllevado que el diseño optimizado de esta infraestructura aún no sea considerado un problema resuelto, llevando a la necesidad de que las instituciones de educación superior, en especial en América latina, se interesen en este tipo de investigaciones. A diferencia de otras partes del mundo, en América latina existe una carencia en la cobertura de saneamiento y, particularmente en Ecuador, esta no es accesible para toda la población debido a los altos costos en las soluciones propuestas por no implementar metodologías de optimización que conlleva a diseños hidráulicamente funcionales pero muy costosos.

El trazado de un sistema de drenaje urbano es comúnmente definido por la experiencia del diseñador, el cual toma como referencia la topografía del terreno, la ubicación de la descarga final y la longitud de los tramos principales hacia esa descarga (Torres, 2013). Lo anterior implica que el proceso de construcción del trazado sea subjetivo, careciendo de cualquier método o criterio de optimización que permita garantizar una solución cercana a la óptima. Pocas investigaciones han tratado de abarcar este problema principalmente por el reto de encontrar una función de costo que permita representar los costos del diseño hidráulico (diámetros y profundidades de excavación de las tuberías) con las variables y datos disponibles en la elección del trazado como los son: el caudal, la topología de la red y la topografía del terreno. Con respecto al diseño hidráulico, el problema ha sido mejor estudiado llegando a tener herramientas computacionales comerciales como SewerGEMS que utilizan heurísticas para resolver el problema o metodologías exhaustivas como la de Duque (2015), el cual se tratará en esta investigación.

De acuerdo a lo anterior, se pretende proponer una metodología para la elección del trazado que tome en cuenta todos los datos conocidos para este problema como son los caudales de entrada a los pozos, la topología de la red y la topografía del terreno. Esta metodología será una extensión a la propuesta por Duque (2015), es decir, programación lineal entera mixta, cambiando la función de costos a utilizar por una más general que pueda ser aplicada a redes de diferentes tamaños, caudales de entrada (aguas servidas y pluviales), densidad de viviendas y topografía del terreno. Para esto se propone 5 casos de estudio representativos donde la metodología propuesta es aplicada

El documento está organizado de la siguiente manera: el capítulo 1 incluye esta introducción y los objetivos de la investigación; el capítulo 2 abarca el marco teórico donde se puntualiza las principales suposiciones y restricciones en el diseño de un sistema de drenaje urbano; el capítulo 3 explica la metodología propuesta iniciando con una breve revisión a la metodología de Duque (2015) y la justificación de los cambios realizados a la función de costo en la elección del trazado, además, la metodología se descompone en dos parte: el trazado inicial e iteración; en el capítulo 4 se describen



---

los casos de estudio y los resultados encontrados al aplicar la metodología, además se presenta una comparación entre la metodología usada en el diseño hidráulico por Duque (2015) y el programa SewerGEMS; el capítulo 5 analiza los resultados encontrados en el capítulo 4 con un informe global de todos los casos de estudio y luego puntualiza el análisis en cada red; en el capítulo 6 se escriben las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada; finalmente, el capítulo 7 muestra los anexos en donde se incluye la información de los casos de estudio.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

- Desarrollar una metodología para la elección del trazado como una extensión a la propuesta por Duque (2015) incluyendo una función de costo aplicable a cualquier tipo de red con diferentes características de entrada.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Establecer el marco teórico que fundamente las principales suposiciones y restricciones de cálculo para el diseño óptimo de redes de drenaje urbano.
- Detallar la metodología de Duque (2015) para entender las variables, parámetros, restricciones y función objetivo que utiliza los dos componentes del diseño optimizado de redes de drenaje urbano.
- Analizar la función de costo para la elección del trazado de la metodología de Duque (2015) aplicándola a diferentes redes de drenaje.
- Proponer cambios en la función de costo de la elección del trazado para incluir la topografía del terreno y topología de la red en los coeficientes de esta.
- Definir un trazado inicial en base a la información disponible para este componente mediante diferentes criterios y ecuación de costo que permita obtener un resultado cercano al óptimo.
- Aplicar la metodología propuesta a diferentes casos de estudio con diferentes características de entrada.
- Analizar los resultados obtenidos y establecer las conclusiones y recomendaciones de la investigación.
- Comparar los resultados del diseño hidráulico de la metodología de Duque (2015) con el programa SewerGEMS.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Sistema de drenaje urbano

Un sistema de drenaje urbano es una obra civil conformada por un conjunto de redes de tuberías y obras complementarias, destinados a la recolección de aguas lluvias y/o residuales producto de la constante interacción del hombre con el agua, y que están técnicamente diseñadas para que, en lo posible, funcionen a gravedad.

#### 2.1.1 Significado e importancia

El sistema de drenaje urbano es necesario debido a la constante interacción entre el ser humano y el ciclo hidrológico, es decir, el ser humano utiliza el agua proveniente del ciclo natural para satisfacer sus necesidades formando de esta manera aguas residuales. Dado que estas aguas contienen materiales sólidos de diversos tamaños, e incluso disueltos, es necesario que después de su uso sean drenadas adecuadamente para evitar problemas de salud pública (Butler y Davies, 2011). Recíprocamente, el proceso de urbanización produce una alteración de los sistemas de drenaje naturales, lo que puede provocar inundaciones y daños a la población. El propósito de las redes de drenaje urbano es minimizar posibles problemas causados a seres humanos o al ambiente (Butler y Davies, 2011).

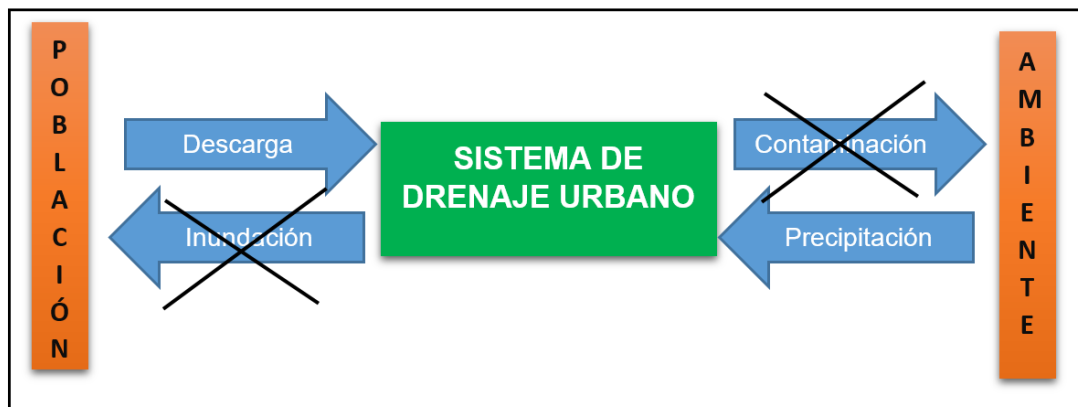


Figura 1.- Interacción entre el medio ambiente y la población (Butler y Davies, 2011. Adaptado)

#### 2.1.2 Componentes de un sistema de drenaje urbano

Todo sistema de drenaje urbano debe tener varios componentes que cumplan funciones específicas y que en conjunto ayuden al buen comportamiento del mismo. Entre los componentes tenemos:

- Componentes de captación
- Componentes de conducción
- Componentes de inspección
- Componentes de regulación y alivio
- Componentes de bombeo

### 2.1.2.1 Componentes de captación

La captación de las aguas residuales se realiza de forma directa ya sean estas de origen doméstico, comercial o industrial a través de cajas terciarias y conducidas desde el punto de descarga hasta la red de alcantarillado por medio de tuberías. Asimismo, las aguas lluvias son captadas en función del área de aportación las cuales pueden ser: pequeñas superficies o nivel domiciliario, en donde es común el uso de canaletas y bajantes en los techados para conducir el agua lluvia hacia una caja terciaria y luego al alcantarillado pluvial o combinado; y superficies grandes, en donde la escorrentía superficial es captada por medio de sumideros de diferentes tipos y dimensiones en función del caudal a captar.

### 2.1.2.2 Componentes de conducción

Los componentes de conducción corresponden a las tuberías que se encargan de transportar el agua a lo largo y ancho de la red de drenaje urbano. Estas conforman el mayor porcentaje de área de la red y son su componente principal (Duque, 2013).

Las tuberías son fabricadas de diversos materiales entre los que tenemos:

- Hierro Dúctil
- Concreto Reforzado
- Arcilla vitrificada
- Termoplásticos.
  - ✓ PVC
  - ✓ Polietileno
  - ✓ Polipropileno
- Fibra de Vidrio
- Poliéster reforzado con fibra de vidrio.
- Acero
- Mortero plástico reforzado.

### 2.1.2.3 Componentes de inspección

Entre los componentes de inspección más importante tenemos:

**Pozos de inspección:** Son estructuras hidráulicas con tapa removible que sirven para inspeccionar el correcto funcionamiento del alcantarillado y darle mantenimiento al mismo.

Adicionalmente se utilizan para:

- ✓ Cambios de dirección
- ✓ Cambios de pendiente
- ✓ Cambios de diámetro
- ✓ Conexiones con otras redes
- ✓ Aireación del alcantarillado.

**Pozos de caída:** Son estructuras diseñadas para generar una pérdida importante de energía en el flujo cuando este genere un salto hidráulico por encima de lo especificado en las normas, de tal manera que pueda proteger la infraestructura de la red contra impactos de flujo en las paredes.

#### 2.1.2.4 Componentes de regulación y alivio

Los componentes de regulación y alivio para sistemas de drenaje urbano son principalmente los disipadores de energía, los cuales son estructuras que tienen como objetivo disminuir o disipar la energía del fluido cuando esta, sea por razones de pendiente, rugosidad o velocidad, sea demasiada alta que pueda presentar un riesgo de socavación local o erosión en los puntos de descarga. Generalmente estas estructuras pueden ser cajas reductoras de velocidad o tanquillas rompecargas.

#### 2.1.2.5 Componentes de bombeo

Los componentes de bombeo son estructuras que se diseñan para elevar el nivel de la línea piezométrica (energía), cuando la conducción de las aguas residuales o pluviales no sea factible por gravedad. Estos componentes se encuentran en una estación de bombeo siendo el más importante las bombas.

## 2.2 Generalidades sobre el diseño hidráulico de los sistemas de alcantarillado

### 2.2.1 Suposiciones de diseño

Antes de realizar los cálculos hidráulicos en cualquier diseño de redes de drenaje urbano se debe suponer un tipo de flujo que describa su hidráulica, es decir, que establezca cómo es el comportamiento hidráulico de un flujo en espacio y tiempo (Duque, 2013).

Con respecto al espacio, el flujo puede ser uniforme o variable; asimismo, el flujo puede ser constante en el tiempo dando lugar al flujo permanente, o puede ser no constante teniendo así el flujo no permanente. Por lo consiguiente se puede tener hasta 4 tipos de flujo que se detallan en la Tabla 1.

	<b>Flujo Permanente</b>	<b>Flujo No-Permanente</b>
<b>Flujo Uniforme</b>	Flujo uniforme	Flujo Uniforme-No permanente
<b>Flujo Variable</b>	Flujo Variado-Permanente	Flujo Variado- No Permanente

*Tabla 1.- Suposiciones de flujo en alcantarillados*

En la realidad, el flujo variado-no permanente es imposible de lograr en la naturaleza, por lo que para suposición de fluidos en alcantarillados quedan las tres restantes (Saldarriaga, 2017). En la práctica, el flujo uniforme es el más fácil de tratar y resolver, y es el tipo de flujo que se supone al momento de realizar un diseño tradicional. Sin embargo, con la aparición de la informática y por ende de softwares computacionales con motores de cálculo muy potentes, el uso del flujo variado – permanente y flujo no permanente están siendo introducidos para obtener resultados mucho más exactos del comportamiento hidráulico del fluido dentro de las tuberías y constituyen diseños modernos.

## 2.2.2 Ecuaciones de diseño

### 2.2.2.1 Propiedades geométricas de tuberías circulares fluyendo parcialmente llenas

Para que los sistemas de drenaje urbano funcionen a gravedad es necesario que las tuberías funcionen bajo la condición de parcialmente llenas, teniendo las siguientes características:

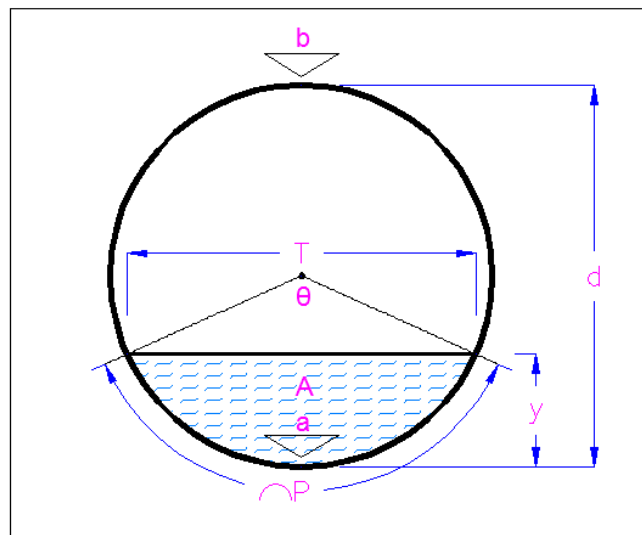
- Rugosidad absoluta constante a lo largo de la superficie interna de la tubería:

$$k_s = Cte$$

*Ecuación 1*

- La forma del área transversal es independiente de la coordenada longitudinal, es decir, la sección transversal es igual a lo largo de toda la tubería.

Este tipo de flujo es un caso especial del flujo en canales abiertos, por lo cual aplican las mismas teorías (Butler y Davies, 2011). La Figura 2 muestra los componentes que se presentan en una sección transversal circular:



*Figura 2.- Componentes de una sección circular parcialmente llena*

Las ecuaciones de diseño están en función de la profundidad de llenado ( $y$ ) y el diámetro de la tubería ( $d$ ), que forman un ángulo  $\theta$  con el cual se calcula el resto de las propiedades geométricas descritas a continuación:

- Ángulo:

$$\theta = \pi + 2 \arcsen \left( \frac{y_n - d/2}{d/2} \right)$$

*Ecuación 2*





- Área mojada:

$$A = \frac{1}{8}(\theta - \text{sen}\theta)d^2$$

*Ecuación 3*

- Perímetro mojado:

$$P = \frac{1}{2}\theta d$$

*Ecuación 4*

- Radio hidráulico:

$$R = \frac{d}{4}\left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right)$$

*Ecuación 5*

- Ancho de la superficie:

$$T = d \cos\left(\arcsen \frac{y_n - d/2}{d/2}\right)$$

*Ecuación 6*

- Profundidad hidráulica:

$$D = \frac{A}{T} = \frac{(\theta - \text{sen}\theta) d}{8 \cos\left(\arcsen \frac{y_n - d/2}{d/2}\right)}$$

*Ecuación 7*

Donde:

$\theta$ = Ángulo subtendido entre el centro de la sección transversal y los puntos de contacto entre la superficie libre y la circunferencia de la tubería (rad).

$y_n$ = Profundidad normal del agua (m).

$d$ = Diámetro interno real de la tubería (m).

$A$ = Área mojada transversal (m<sup>2</sup>).

$P$ = Perímetro mojado (m).

$R$ = Radio hidráulico (m).

$T$ = Ancho de la sección del canal en la superficie libre (m).

$D$ = Profundidad hidráulica (m).

Existen propiedades hidráulicas que están ligadas con las propiedades geométricas descritas anteriormente, las cuales son:

- Número de Froude:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD}}$$

*Ecuación 8*

- Número de Reynolds:

$$Re = \frac{4Q\rho}{\pi d\mu}$$

*Ecuación 9*

- Esfuerzo cortante en la pared:

$$\tau_0 = \rho gRS$$

*Ecuación 10*

Donde:

$\rho$ = Densidad del fluido que en este caso corresponde al agua.

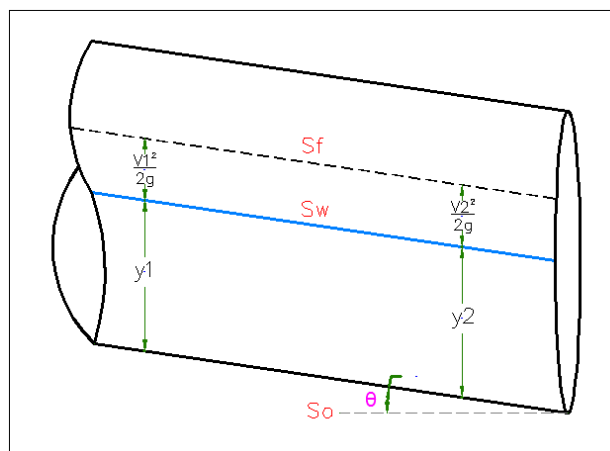
$g$ = La aceleración de la gravedad.

$R$ = Radio hidráulico.

$S$ = Pendiente de diseño

### 2.2.2.2 Flujo Uniforme

El diseño de tuberías fluyendo parcialmente llenas se hace suponiendo condiciones de flujo uniforme, ya que ese no cambia sus condiciones en tiempo ni espacio (Salcedo, 2012), siendo ésta una consideración adecuada al suponer que la lámina de agua sea constante en toda la longitud de la tubería (Chow, 2004).



*Figura 3.- Flujo uniforme en tuberías*

En este tipo de flujo tanto las fuerzas viscosas como las gravitacionales están en equilibrio lo cual hace que la superficie del agua ( $S_w$ ), la línea de energía total ( $S_f$ ) y la pendiente de fondo ( $S_0$ ) sean paralelas entre sí (Torres, 2013).

$$S_w = S_f = S_0$$

#### *Ecuación 11*

Cuando la ecuación anterior se cumple, las pérdidas por fricción serán iguales en cada tramo de tubería simplificando en gran medida los cálculos.

Bajo la suposición de flujo uniforme y tubería parcialmente llena se realiza el dimensionamiento de la sección transversal de la tubería, calculando la velocidad del flujo y posteriormente el caudal que puede transportar. Para realizar esto último, las normativas de cada país indican el tipo de ecuación a utilizar, por ejemplo, en Ecuador en “*Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes*” de la Secretaria del Agua recomienda el uso de la fórmula de Manning, sin embargo, otras normativas regionales y en general la literatura técnica recomienda el uso de ecuaciones físicamente basadas como Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White.

#### 2.2.2.2.1 Ecuación de Manning

La ecuación de Manning es una fórmula empírica propuesta por el ingeniero irlandés Roberto Manning en 1889, basada en trabajos de Darcy y Bazin en canales experimentales reales entre 1855 y 1860. Actualmente es una fórmula que se sigue utilizando para hallar la velocidad en canales abiertos y tuberías fluyendo parcialmente llenas únicamente para el caso de flujo turbulento hidráulicamente rugoso. La ecuación es la siguiente:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2}$$

#### *Ecuación 12*

Para hallar el caudal que pasa por dicho tramo, se multiplica por el área y se tiene:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2}$$

#### *Ecuación 13*

Donde:

$v$ = Velocidad media del flujo (m/s).

$n$ = Coeficiente de rugosidad de Manning ( $s/m^{1/3}$ ).

$Q$ = Caudal de flujo ( $m^3/s$ ).

$R$ = Radio hidráulico (m).

$A$ = Área mojada transversal ( $m^2$ ).

$S_0$ = Pendiente longitudinal de la tubería (m/m).

Actualmente, el uso del PVC y otros materiales lisos en tuberías de redes de drenaje urbano invalida la aplicación de la fórmula de Manning debido que fue planteada para flujo turbulento hidráulicamente rugoso, y con el uso de estos materiales se tiende a flujos turbulentos hidráulicamente lisos (Saldarriaga, 2017).

#### 2.2.2.2.2 Ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook White

Es una ecuación físicamente basada producto de la combinación de la ecuación de Darcy-Weisbach para pérdida de fricción en tuberías y la fórmula de Chezy, y que se resuelve en conjunto con la ecuación de Colebrook-White para hallar el factor de fricción ( $f$ ). La expresión es la siguiente:

$$Q = 2A\sqrt{8gRS_o} \log_{10} \left( \frac{k_s}{14.8R} + \frac{2.51\nu}{4R\sqrt{8gRS_o}} \right)$$

*Ecuación 14*

Donde:

Q= Caudal del flujo (m<sup>3</sup>/s).

R= Radio hidráulico (m).

A= Área mojada transversal (m<sup>2</sup>).

So= Pendiente longitudinal de la tubería (m/m).

$\nu$  = Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s).

Esta ecuación es válida para cualquier tipo de flujo, desde el flujo turbulento hidráulicamente liso hasta el flujo turbulento hidráulicamente rugoso, por lo que su aplicación hoy en día es mayor a la ecuación de Manning.

### 2.2.3 Restricciones de diseño

Además de que el diseño concebido funcione desde el punto de vista hidráulico, este debe cumplir con ciertas restricciones que aseguren un correcto funcionamiento y operación de la infraestructura a lo largo de su vida útil. Cada país dentro de su normativa indica las restricciones de diseño para los sistemas de drenaje urbano y a pesar de que desde el punto de vista técnico estas deben ser parecidas, existen ciertas variaciones. Las restricciones de diseño se pueden dividir en hidráulicas y comerciales y en esta sección se hablará de la normativa de Ecuador y Colombia. Para el primero se usará la “Norma para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes” publicada por la Secretaría del Agua de Ecuador, mientras que para el segundo se usará el “Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS” publicado por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia.

#### 2.2.3.1 Restricciones hidráulicas

Las restricciones hidráulicas buscan garantizar que el diseño de las redes de alcantarillado cumpla con la capacidad de demanda y aseguren un proceso de auto-limpieza de la red (Duque, 2013). Estas son:

- Diámetro mínimo
- Velocidad mínima
- Velocidad máxima
- Profundidad a cota clave de la tubería
- Distancia entre pozos
- Esfuerzo cortante mínimo

El resumen de las restricciones hidráulicas se presenta en la Tabla 2:

Restricciones de diseño	Ecuador		Colombia	
	A. Sanitario	A. Pluvial	A. Sanitario	A. Pluvial
<b>Diámetro Mínimo</b>	200 mm	250 mm	170 mm	215 mm
<b>Velocidad mínima</b>	0.45 m/s	0.90 m/s	0.45 m/s	0.75 m/s
<b>Velocidad máxima</b>	4.5 m/s	>4.5 m/s	5 m/s	10 m/s
<b>Esfuerzo Cortante mínimo</b>	s/n	s/n	1.0 Pa	2.5 Pa
<b>Profundidad a cota clave de la tubería</b>	1.2	1.2	0.75 -1.20m	
<b>Distancia entre pozos</b>	100-200 metros		120-200 metros	

*Tabla 2.- Restricciones hidráulicas para el diseño de redes de drenaje urbano en Ecuador y Colombia*

### 2.2.3.2 Restricciones comerciales

Corresponde al conjunto de diámetros comerciales disponibles en la zona de estudio que pueden ser considerados en el diseño y el valor debe corresponder al diámetro real interno de la tubería. De manera general, para la presente investigación se tomará los siguientes diámetros que corresponden a los comercializados en Colombia de PVC:

Novafort D(m)	Novaloc D(m)
0.227	1.180
0.284	1.271
0.327	1.363
0.362	1.423
0.407	1.586
0.452	
0.595	
0.670	
0.747	
0.824	
0.900	
0.978	
1.054	

*Tabla 3.- Diámetro real interno de las tuberías de PVC comerciales disponible en Colombia*

## 2.2.4 Función de Costo

Para poder realizar la comparación entre diferentes diseños es necesario estimar de manera aproximada los costos constructivos de cada una de las alternativas y poder definir el diseño óptimo. Esto es comúnmente realizado por medio de una función o ecuación de costos, que en la mayoría de la literatura técnica está en función del diámetro y profundidad de instalación de la tubería. En la presente investigación se usará la ecuación de costo comúnmente utilizada en el Centro de Investigación de Acueductos y Alcantarillado de la Universidad de los Andes denominada ecuación de Navarro.

### 2.2.4.1 Ecuación de Navarro

La ecuación fue estimada de acuerdo a información extraída de las bases de datos del Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), del Fondo de Proyectos de Desarrollo (FONADE) y de empresas encargadas de prestar el servicio de alcantarillado, por medio de un estudio de análisis de inversiones en acueducto y alcantarillado, desarrollado por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (Navarro, 2009). La ecuación es la siguiente:

$$C_{ij} = a(9579.31 d_{ij}^{0.5737} l_{ij} + 1163.77V_{ij}^{1.31})$$

#### *Ecuación 15*

Donde:

$C_{ij}$ = Costo del tramo ij en COP

$d_{ij}$ =diámetro del tramo ij en metros

$V_{ij}$ = Volumen de excavación del tramo ij en metros cúbicos

$a$ = Factor de conversión de pesos de diciembre de 2007 a julio del 2018 igual a 1.53

Ponderadamente, la ecuación de Navarro le da mayor peso a los costos asociados con la profundidad de excavación que a los costos de las tuberías.

## 3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO OPTIMIZADO DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO

### 3.1 Introducción

Durante el desarrollo de la investigación, el problema del diseño optimizado de redes de drenaje urbano fue abarcado de varias maneras. Inicialmente, la metodología se basó en aplicar las heurísticas desarrolladas en antiguas tesis a varias redes con diferentes características como la topografía del terreno y los caudales de entrada en cada uno de los pozos del sistema. Estas metodologías fueron recogidas de la tesis de maestría de Duque (2015) y posteriormente modificada y adaptada por Aguilar (2016) en su tesis de pregrado, metodologías que fueron materializadas en el software denominado UTOPIA, que es el programa que se usó para la primera parte de la investigación. Sin embargo, una vez aplicada esta metodología a redes patrones estudiadas en el CIACUA (Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados), de la Universidad de los Andes, se pudo constatar que el procedimiento usado para la elección del trazado no seguía criterios topográficos, dando como resultado trazados que no son costo-efectivos, especialmente cuando la topografía no es plana.

Bajo este punto de vista, el problema de la elección del trazado, uno de los dos componentes del diseño de sistema de redes de drenaje urbano, podría tratarse de dos maneras: cuando la topografía del terreno es plana y cuando es ondulada o accidentada. Para la primera, Duque (2015) acierta proponiendo un modelo de programación lineal entera mixta para resolver el problema denominado diseño de redes o NDP (Network Design Problem), donde la función objetivo a minimizar está conformada únicamente por el caudal, es decir, minimiza el costo por unidad de flujo transportado en la red. Vale recalcar que cuando se refiere a topografía del terreno plana no se considera que todos los pozos tienen su nivel de tapa en la misma cota. Para la segunda, cuando se tiene una topografía ondulada o accidentada, tener una función objetivo que sólo tome en cuenta el caudal como variable de decisión es un error, ya que la mejor forma de conducir el caudal por una red casi nunca coincidirá con las pendientes naturales del terreno lo que conllevaría a profundidades de excavación excesivas y por lo tanto diseños de alto costo o no factibles desde la reglamentación local.

De acuerdo a Haghighi y Bakhshipour (2015), “en el caso de cuencas empinadas, basados en criterios de ingeniería es posible crear un trazado costo-efectivo” (p. 790), es decir que, en redes ubicadas en terrenos con topografía ondulada, empinada o accidentada el ingeniero puede guiarse con la pendiente natural exterior definiendo un trazado factible y cercano al óptimo. Sin embargo, el diseño del trazado es subjetivo y depende de la experiencia del diseñador llevando a diferentes propuestas que difieren en sus costos, unas más económicas que otras. Además, dentro de los *criterios de ingeniería* pueden existir algunos en los cuales el ingeniero se puede basar para determinar el trazado, por ejemplo: tramos de mayor pendiente natural, tramos de mayor diferencia de cotas de tapa entre pozos, distancia al punto de desagüe final del sistema, número de arranques o tuberías de inicio, entre otros. Por lo tanto, sea la topografía plana o no, es necesario tener una metodología que abarque de forma integral todos los componentes involucrados en el problema de la elección del trazado y cómo se podrían explicar sus variables de la función objetivo con las del diseño hidráulico.



En este capítulo se presenta la segunda parte de la investigación realizada, en donde se propone una metodología que abarque los problemas encontrados en la elección del trazado como una extensión a la metodología propuesta por Duque (2015). El capítulo está organizado de la siguiente manera: antecedentes, en donde se hace una revisión del desarrollo histórico del problema de la optimización de redes de drenaje urbano encontrados en la literatura técnica y, principalmente, aquellos asociados a la elección del trazado tanto para zonas planas como accidentadas; explicación detallada de la metodología de Duque (2015) para que el lector comprenda la características principales usadas para resolver el problema del diseño hidráulico y la elección del trazado; la metodología propuesta para resolver el problema de la elección del trazado en donde se incluye a la topografía como una variable en la función objetivo y donde se divide el problema en la elección del trazado inicial e iteraciones posteriores para mejorarlo y, finalmente, las conclusiones del capítulo.



### 3.2 Antecedentes

Partiendo del concepto de que el problema de diseño optimizado puede ser dividido en dos componentes: el diseño hidráulico y la elección del trazado, históricamente los esfuerzos investigativos se han concentrado en el primero de estos. Guo, Godfrey y Savic (2008) afirman que su concepto fue propuesto por primera vez a mediados de la década de 1960 (Deininger, 1966; Holland, 1966), cuando los avances en la potencia de los ordenadores brillaron a la luz de la investigación en ingeniería. Diseños integrales y rentables que incorporan modelos de simulación temprana y tecnologías de optimización se convirtieron en computacionalmente factibles entre 1970 y 1980, al desarrollar varias técnicas de optimización como programación lineal (LP) (Deininger, 1966; Dajani y Hasit, 1974), no lineal (PNL) (Holland, 1966; Price, 1978) y la programación dinámica (DP) (Mays y Yen, 1975; Walters y Templeman, 1979).

Según Guo et al. (2008) estas metodologías fueron rápidamente descartadas debido a la complejidad en cuanto a variables continuas y discretas, y porque no ofrecían resultados satisfactorios y completos. A finales de 1980, algunas de las herramientas de diseño computacionales que empezaron a surgir van desde el modelo de hoja de cálculo (Brown y Koussis, 1987; Miles y Heaney, 1988) hasta programas informáticos de fácil uso (Yen et al., 1984; Chau, 1992). Aunque los modelos informáticos producen soluciones más precisas y satisfactorias, sujetos por las tecnologías de la época en las disciplinas correspondientes, las prácticas de diseño generalmente implicaban muchas limitaciones y simplificaciones del modelo. Por lo general, mantener la continuidad del sistema y la satisfacción de las diferentes restricciones planteaba considerables dificultades prácticas en el diseño. Asimismo, las soluciones no garantizaban el óptimo global, porque algunos métodos evaluaban muy pocas opciones y se detenían una vez encontraban una solución factible (Heaney et al., 2002).

Beneficiándose de la evolución de la Inteligencia Artificial (AI) y la Investigación de Operaciones (OR), diversas técnicas de optimización innovadoras, especialmente algoritmos metaheurísticos, surgieron y se aplicaron ampliamente para problemas de optimización de la ingeniería. Cembrowicz y Krauter (1987) desarrollaron un intento de utilizar computación evolutiva (CE) para la optimización de alcantarillado, siendo este enfoque, en particular los algoritmos genéticos (GAs), las técnicas más populares y exitosas de optimización (Walters y Lohbeck, 1993; Heaney et al., 1999; Afshar et al., 2005). En comparación con las técnicas de optimización surgidas anteriormente, los algoritmos genéticos abarcaban muchas ventajas importantes como el planteamiento de algoritmos multiobjetivos, que permitían un diseño óptimo con diferentes enfoques, ya sean estos hidráulicos o de seguridad, además del manejo de variables discretas.

Más recientemente, el uso de técnicas metaheurísticas para resolver la parte del diseño hidráulico sigue siendo muy popular, en ese aspecto se destacan Pan y Kao (2009) y Haghghi y Bakhshipour (2012) con el uso de algoritmos genéticos. Una variante de los algoritmos genéticos fue introducida por Hassan, Jassem y Mohammed (2017) usando una combinación con programación heurística (GA-HP) y Bakhshipour, Makaremi y Dittmer (2017) utilizando un algoritmo genético con clasificación no dominada (NSGA-II). Otras técnicas destacables son la optimización por enjambre de partículas que fue desarrollada por Ahmadi, Zolfagharipoor y Nafisi (2018); autómatas celulares



desarrollado por Afshar, Zaheri y Kim (2016) y búsqueda tabú y recocido simulado por Yeh, Chu, Chang y Lin (2013).

Refiriéndose al problema de la elección del trazado, una de las primeras investigaciones que tuvo mucho éxito fue la realizada por Li y Mathew (1990). En su artículo de investigación, estos autores proponen una metodología para resolver los dos componentes del diseño óptimo a través de un método no lineal denominado búsqueda de direcciones para la elección del trazado y, posteriormente, programación dinámica diferencial discreta (DDDP) para resolver el diseño hidráulico. Además, para poner a prueba su metodología, los autores proponen una red teórica que se convertiría en una red patrón estudiada hasta el día de hoy por investigadores interesados en el problema de la optimización de alcantarillados. Esta red teórica fue probada nuevamente por Haghighi (2013) utilizando para la elección del trazado un algoritmo denominado *loop-by-loop cutting algorithm*, basado en la teoría de grafos, donde la red es representada como un grafo con circuitos cerrados y no dirigidos, y el método se apoya con algoritmos genéticos para obtener mejores resultados.

Posteriormente, la metodología iba a ser perfeccionada por Haghighi y Bakhshipour (2015), utilizando el mismo algoritmo *loop-by-loop cutting* para la elección del trazado, pero complementando la metodología con la resolución del diseño hidráulico. Para esto, los autores utilizaron un algoritmo adaptativo que tiene en cuenta el cumplimiento de las restricciones de máxima velocidad y lo simplifica en un problema no lineal combinatorio resuelto con la técnica de búsqueda tabú, que es una técnica que no garantiza encontrar el óptimo global. Otras metodologías desarrolladas para la elección del trazado fueron presentadas por Navin y Mathur (2016), los cuales se basaron en la aplicación de algoritmos para la formación de *spanning tree*, es decir, trazados factibles que no poseen recirculación de agua para luego realizar el diseño hidráulico utilizando optimización por enjambre de partículas; Steele, Mahoney, Karovic y Mays (2016) proponen utilizar un modelo de programación entera mixta no lineal para resolver el problema de la elección del trazado que es resuelto mediante un sistema general de modelación algebraica (GAMS), el diseño hidráulico es resuelto por recocido simulado.

Con respecto al diseño hidráulico, la búsqueda bibliográfica ha compilado numerosos procedimientos basados principalmente en heurísticas como algoritmos genéticos, recocido simulado, búsqueda tabú, entre otros, los cuales tienen el problema de que no son metodologías exhaustivas, es decir, no garantizan el óptimo global. Una de las metodologías exhaustivas propuesta con éxito en los últimos años fue publicada por Duque, Duque y Saldarriaga (2016), en la cual utilizan programación dinámica para resolver el diseño hidráulico de una serie de tubería recorriendo de manera exhaustiva las tuberías y pozos por medio de la generación de arcos. Esta metodología fue completada en la tesis de maestría de Duque (2015) para la elección del trazado y que será explicada en detalle en la próxima sección.

Para la elección del trazado, las metodologías encontradas corresponden principalmente a la aplicación de la teoría de grafos para la generación de un trazado factible considerando una función objetivo que toma en cuenta, en la mayoría de casos, la longitud de los tramos, por lo tanto, el trazado resultante es aquel que minimiza la longitud de tuberías de la red. Esto podría ser correcto considerando dos factores: que la topografía sea plana, de hecho, la mayoría de los casos de aplicación



corresponden a redes con pozos a igual cota, es decir, sin desnivel alguno; lo segundo corresponde al trazado resultante, el cual, por el algoritmo utilizado, elimina tramos iniciales que impliquen una recirculación de flujo, lo cual no es factible desde el punto de vista hidráulico y de operación. Ambos factores podrían ser incorrectos para la aplicación de dichas metodologías en países de América latina, donde la mayoría de ciudades están ubicadas en terrenos con pendiente ondulada o empinada y, si es plano, en ningún caso las vías no tendrán pendiente alguna por lo que la suposición de pozos a igual cota se invalida. Asimismo, la legislación local obliga que en cada calle exista una tubería de alcantarillado ubicando los pozos en las esquinas, por lo que eliminar tuberías iniciales también se invalida, por lo tanto, aplicar un algoritmo que minimice la longitud de tuberías en una red no es posible porque la longitud del sistema es una propiedad física de esta y no se puede cambiar.

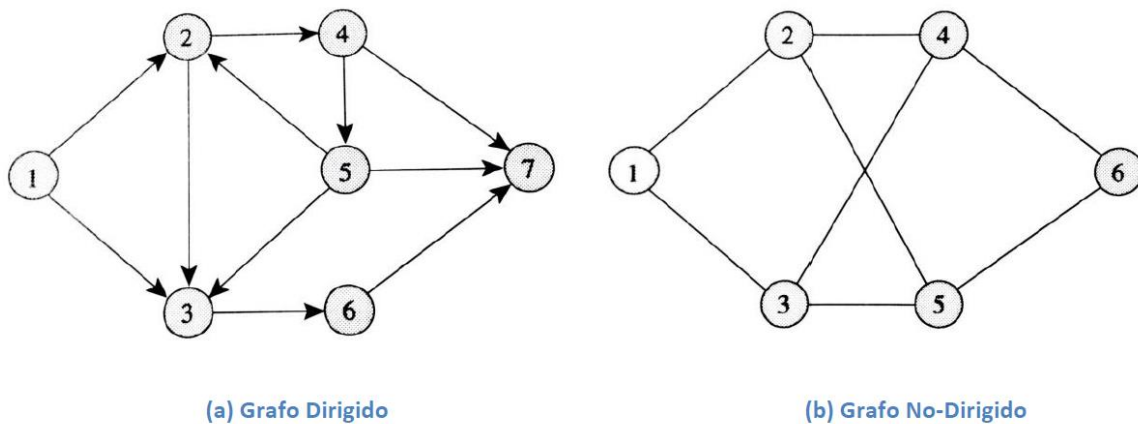
Por último, parte de las investigaciones recogidas en esta sección afirman que el problema de la elección del trazado debe reducirse exclusivamente a aquellas redes que son planas y no para las ubicadas en terrenos empinados, donde la experiencia del diseñador puede llevar a un trazado cercano al óptimo, siguiendo la topografía natural del terreno. Como se demostrará más adelante, en función del criterio que se utilice en redes ubicadas en topografías onduladas o accidentadas se puede variar el costo y mejorarlo, por lo que la suposición hecha en este caso también se puede considerar no pertinente.

### 3.3 Metodología de diseño optimizado desarrollado en el CIACUA (UTOPIA)

En esta sección se detallará la metodología desarrollada por Duque (2015), la cual servirá de base para la metodología propuesta en la presente investigación en lo referente a la elección del trazado, ya que el componente del diseño hidráulico es una parte que se considera prácticamente resuelta por el tipo de análisis y algoritmo que Duque realiza. La explicación detallada de la metodología pretende introducir al lector en la parte matemática del problema del diseño optimizado y toda las suposiciones y restricciones que este debe cumplir al momento de implementar un algoritmo de solución, por lo tanto, si se pretende formular una extensión de esta metodología es necesario iniciar con su explicación. Como punto inicial se realiza la definición del problema de optimización referente a sus dos componentes, para luego describir los métodos y algoritmos utilizados para la resolución del problema.

#### 3.3.1 Definición del problema

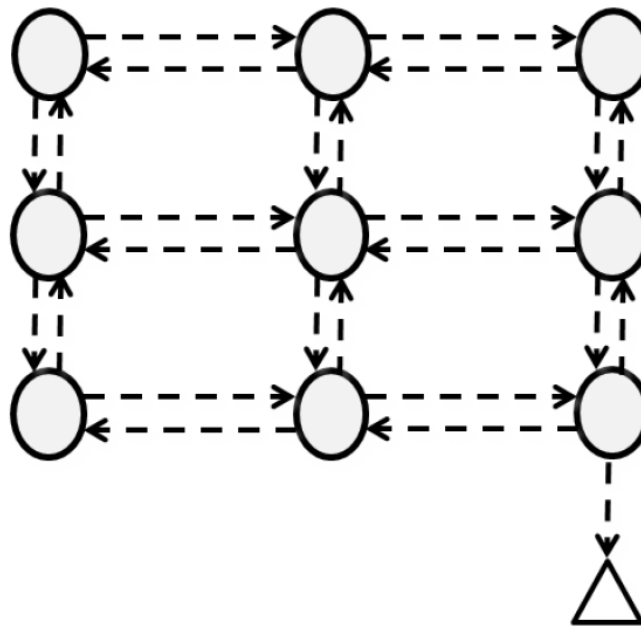
Como se ha planteado anteriormente, el problema del diseño optimizado de redes de drenaje urbano tiene dos componentes: el diseño hidráulico y la elección del trazado, y cada uno de estos componentes tienen restricciones y variables diferentes que deben ser abarcadas y resueltas con diferentes metodologías. En el caso de la elección del trazado, por la topología de las redes, el problema puede ser abarcado como uno de flujo de redes donde las tuberías son modeladas por medio de *grafos* no dirigidos y posteriormente resueltas a través de un algoritmo que tome en cuenta una función objetivo que minimice algún criterio (costos, longitudes, confiabilidad, etc.) y convertirlo en grafos dirigidos como muestra la siguiente figura:



*Figura 4.- Diferencia entre grafos dirigidos y no dirigidos. (Duque, 2015, p. 26)*

En la Figura 4 (a), los nodos numerados podrían considerarse los pozos y las flechas las tuberías, por lo tanto, se puede observar hacia donde fluye el agua, que en este caso es al nodo 7, pudiendo determinar el caudal que fluye por cada tubería. Como suposición inicial, se debe tener en cuenta que en cada calle debe existir una tubería y que en cada esquina un pozo donde ingresa el caudal de aportación, sea este de agua servida, lluvias o combinada. La restricción más importante

para la elección del trazado es que la red resultante debe tener forma de árbol, es decir, no debe poseer circuitos cerrados. Considerando la Figura 4 (a), el circuito 5-2-3 es un circuito cerrado y no se puede considerar ese trazado como factible, por lo tanto, es necesario introducir el concepto de tubería de inicio y continua. Una tubería de inicio es aquella que no tiene tramos conectados aguas arriba y su caudal de diseño está dado por el porcentaje de aportación del pozo aguas arriba; mientras que una tubería continua recibe aportaciones de tramos aguas arriba más el caudal que le aporta el pozo de donde sale. Considérese la siguiente red:



*Figura 5.- Red de alcantarillado. (Duque, 2015, p. 28)*

La red conformada por 9 pozos (círculos) y 1 salida (triángulo) está representada por medio de la teoría de grafos no dirigidos, pudiendo existir numerosas alternativas para definir el trazado, de tal manera que el agua que entra a los pozos sea dirigida a la descarga considerando la restricción de que el trazado resultante no posea circuitos cerrados. Una alternativa podría ser la siguiente:

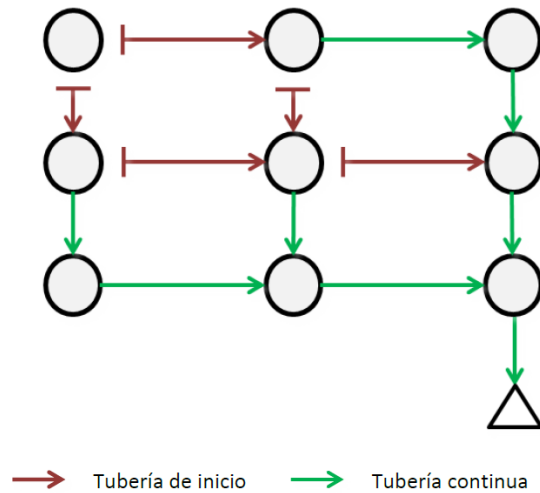


Figura 6.- Posible trazado para la red presentada en la Figura 5

Es claro en la Figura 6 como el uso de tuberías de inicio puede romper circuitos cerrados para generar un trazado factible sin eliminar ningún tramo de la red, además, una regla general para formar trazados abiertos es que de un pozo puede salir como máximo una tubería continua, como se puede observar claramente en el trazado propuesto en la figura anterior. Una vez definido el trazado es posible determinar el caudal de diseño de cada uno de los tramos, que será el dato de entrada para luego realizar el diseño hidráulico de cada uno de las tuberías. Finalmente, los datos de entrada en el problema de la elección del trazado sería la topología y topografía de cada pozo (coordenada x, y y z), caudal de entrada a los pozos y topología de la red (posibilidad de conexión entre pozos).

Con respecto al diseño hidráulico, Duque (2015) manifiesta, “una vez definido el trazado, se busca encontrar la combinación diámetro-pendiente para cada tubería que conforma la red, teniendo en cuenta que se quiere minimizar el costo total de construcción de la red y asegurar el funcionamiento de la misma” (p. 30), para lo cual debe cumplir con las restricciones de diseño que son definidas por la normativa local. Tomando como referencia un tramo de la red es posible realizar el siguiente esquema:

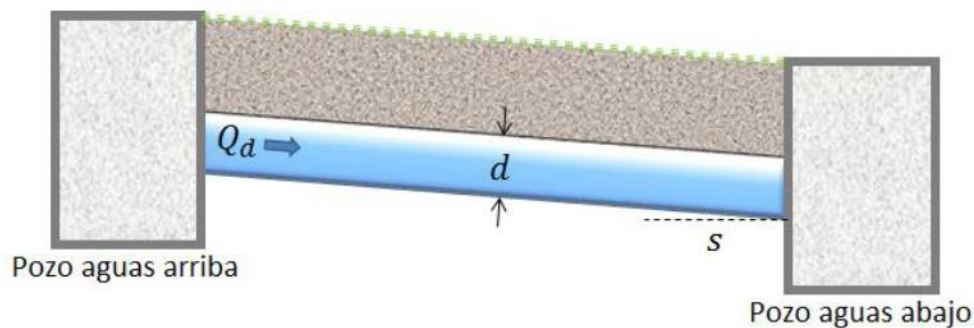
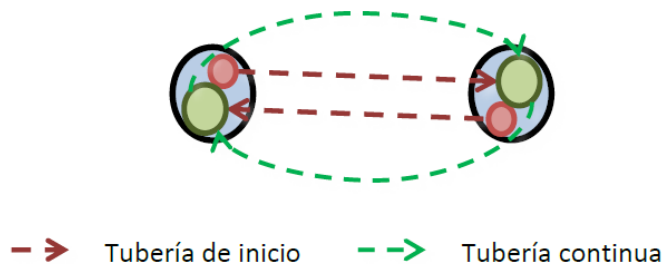


Figura 7.- Diseño hidráulico de una tubería. (Duque, 2015, p. 31)

Conocido el caudal de diseño del tramo es posible establecer la pendiente (s) y el diámetro (d) que tenga la capacidad para transportar el caudal de diseño (Qd); sin embargo, se debe considerar las restricciones de la normativa, además de las implícitas al momento de diseñar como que el flujo siempre vaya a favor de la gravedad, que la tubería aguas arriba conecte a una cota igual o superior a la cota de batea de las tuberías aguas abajo, que las tuberías de inicio conecten hacia la descarga, entre otras. Todo esto, más la lista de diámetros comerciales, profundidad de excavación, precisión del diseño y la ecuación de costo a utilizar hace que el campo de solución sea muy amplio, lo que requiere el uso de técnicas de optimización para resolver el problema. Por último, los datos de entrada para el problema del diseño hidráulico son: topología y topografía de los pozos (coordenada x, y, z), tipo de tubería (inicio o continua), topología de la red, caudal de diseño del tramo, conjunto de diámetros comerciales disponibles, características físicas de la tubería y del fluido a modelar.

### 3.3.2 Selección del trazado

Con respecto al problema de la selección del trazado, Duque (2015) utiliza programación lineal entera mixta modelando la red como un problema de diseño de redes (Network Design Problem), que define la dirección del flujo, el caudal y el tipo de conexión de cada tubería que conforma la red de drenaje. El modelo de un tramo se realiza con base en la teoría de grafos pudiendo existir 4 tipos diferentes: inicio y continua y en ambos sentidos como muestra la Figura 8.



*Figura 8.- Tipo de tuberías para cada tramo de una red de alcantarillado. (Duque, 2015, p. 34)*

Si se tiene una red como la mostrada en la Figura 5, el conjunto de grafos para elegir el trazado sería la siguiente:

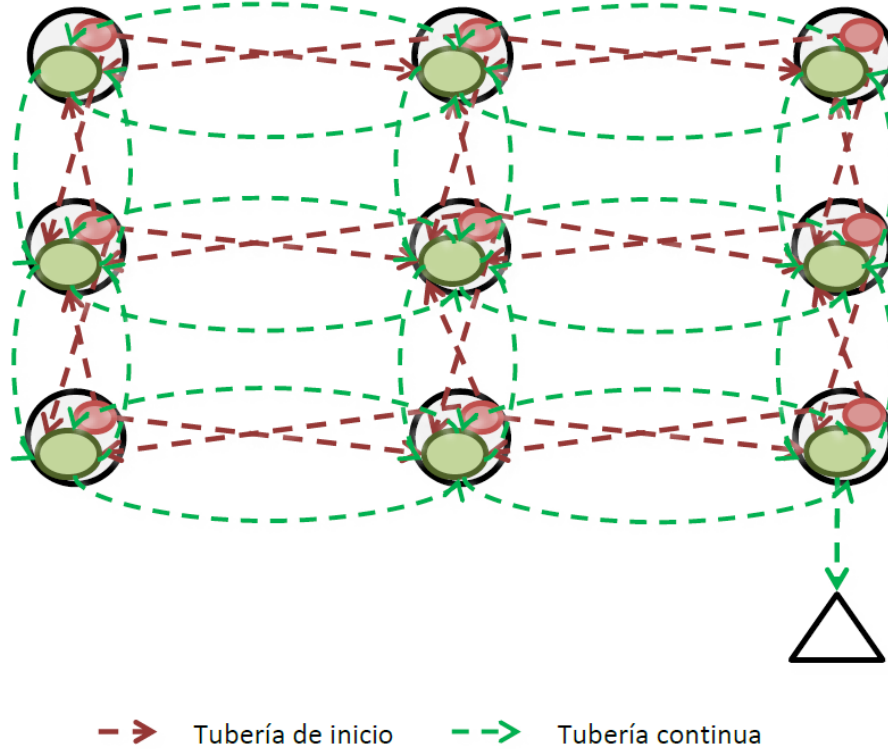


Figura 9.- Grafo para la selección del trazado de una red de alcantarillado. (Duque, 2015, p. 35)

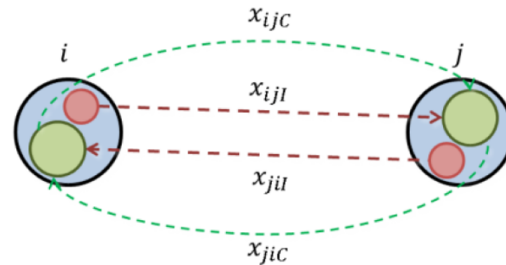
Para resolver el problema, la metodología utiliza una función objetivo que toma en cuenta 2 variables: la variable de decisión que modela el flujo (costos de transportar el caudal por la red) y variable de decisión que modela la elección de un sentido de flujo (variable binaria de asignación). La función objetivo que se busca minimizar es la siguiente:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_L} c_{ij} q_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_L} a_{ij} x_{ijt}$$

Ecuación 16

Lo anterior implica que para cada arco posible  $ij$  en la Figura 9 debe estar asociado un costo  $c_{ij}$  que represente el costo por unidad de flujo transportado y que afecte al caudal en el primer sumando de la ecuación. Para el segundo sumando, el coeficiente  $a_{ij}$  representará el costo por la existencia del arco  $ij$ , teniendo en cuenta que la variable  $x_{ijt}$  es binaria (toma valor de 0 o 1) en función de qué arco defina el trazado final. Con respecto a esto último, la siguiente figura ilustra de mejor manera esta variable:





*Figura 10.- Posibles variables de decisión por tramo. (Duque, 2015., p. 35).*

De los 4 arcos posibles entre dos pozos sólo uno definirá el trazado final, para dicho arco el valor de  $x_{ijt}$  tomará el valor de 1 mientras que los otros tomarán el valor de 0. En conclusión, la Ecuación 16 es una función objetivo lineal cuyas variables de decisión representan el costo por unidad de flujo transportada por la red, por lo tanto, minimizar esa función objetivo implica que el trazado resultante sea aquel que diversifique el caudal por toda la red. Para determinar los parámetros  $c$  y  $a$ , Duque (2015) propone realizar una regresión lineal de los costos del diseño hidráulico con el caudal transportado correspondiente, es decir, cada tramo de tubería diseñada tendrá un costo total y un caudal asociado, y al final se tendrán tantos puntos como tramos de la red. Graficando los puntos, una regresión lineal determinará la pendiente de la tendencia, así como el intercepto, constituyendo el valor de  $c$  y  $a$ , respectivamente. Lo anterior se aplica para la primera iteración, a partir de la segunda la regresión lineal es aplicada a cada tramo y se tendrá un coeficiente  $c$  y  $a$  para cada uno de estas. Las restricciones del problema de optimización se detallan con claridad en su informe de tesis y no se estudiará con detalle en esta sección, pero resume las restricciones necesarias para que la metodología defina un trazado factible donde no haya circuitos cerrados.

### 3.3.3 Diseño hidráulico

Definido el trazado, es posible determinar el caudal de diseño de cada una de las tuberías para proceder al diseño hidráulico. Para resolver esta parte, Duque (2015) propone un modelo de programación dinámica y abarca el problema como un Problema de Ruta Más Corta (RMC) generando en cada tramo grafos, existiendo tantos grafos como combinación de diámetros y pendientes posibles definidas por el usuario inicialmente. Bajo este punto de vista, cada pozo será representado como un grupo de nodos creados a partir del conjunto de diámetros y profundidad posible del pozo, como muestra la siguiente figura:

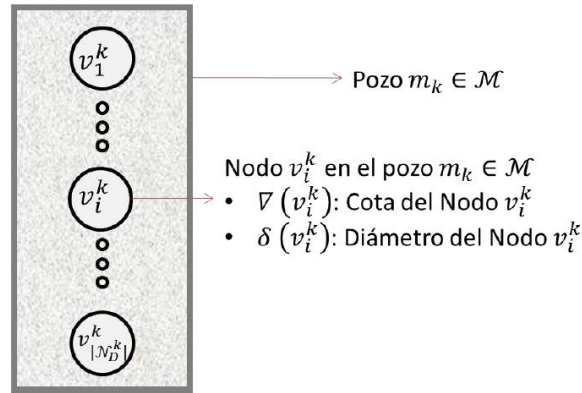


Figura 11.- Conjunto de nodos que pertenecen a un mismo pozo de inspección. (Duque, 2015, p. 44)

Creados los nodos en todos los pozos, estos se unirán por medio de grafos teniendo todas las combinaciones posibles, además, cada grafo tendrá asociado un costo ya que está definido por un diámetro y una pendiente, las dos variables más importantes para determinar el costo de construcción de un tramo. Definida una red a diseñar, la metodología utiliza el algoritmo de Bellmand Ford para recorrer y evaluar todos los caminos posibles y encontrar aquel de mínimo costo. Vale recalcar que, antes de realizar el recorrido, todos los grafos (tuberías) que no cumplan las restricciones hidráulicas o de capacidad son eliminadas, así como también aquellas que estén en contrapendiente. Dado que el algoritmo evalúa todas las alternativas creadas, la metodología es exhaustiva, es decir, para una ecuación de costo dada, el diseño hidráulico resultante es el óptimo global.

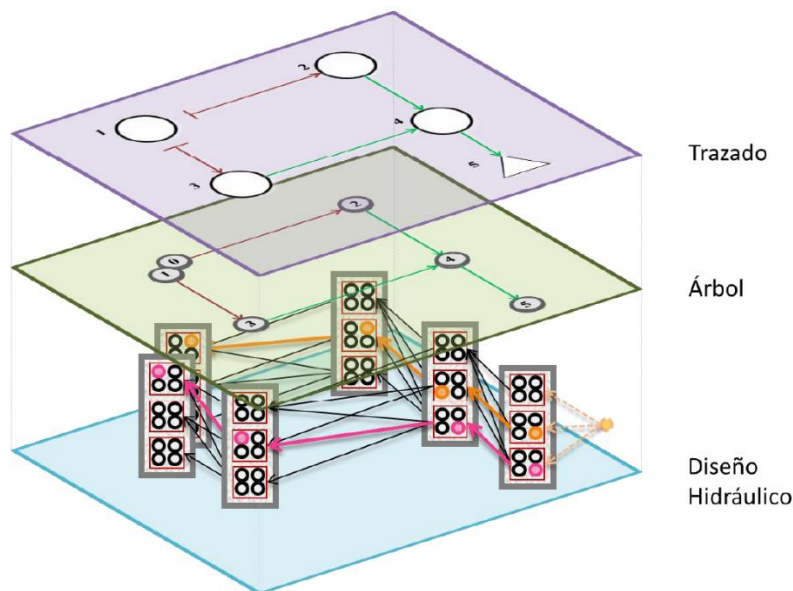
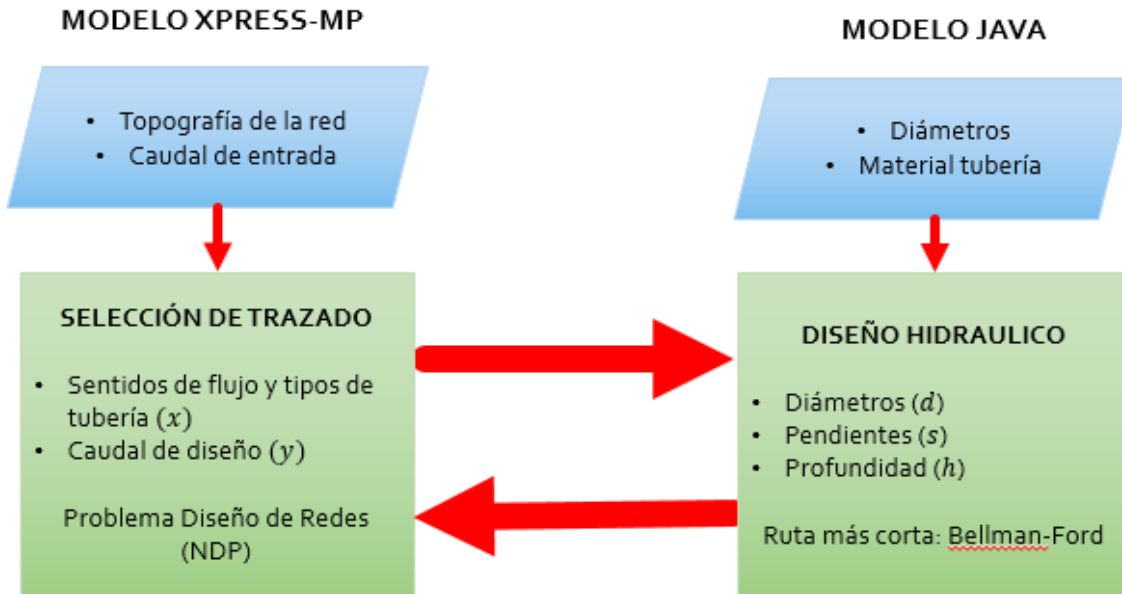


Figura 12.- Solución para el diseño hidráulico de una red de 4 pozos y una salida. (Duque, 2015, p. 67)

Cada una de las metodologías aplicadas para cada componente son integradas en un solo programa denominado UTOPIA (Underground Topography for Optimal Pipeline Infrastructure Assessment) resumido en el siguiente diagrama:



*Figura 13.- Metodología desarrollada por Duque (2015). (Aguilar, 2016, p. 23)*

La Figura 13 explica la integración de las metodologías a través de un proceso iterativo que parte de un *trazado inicial aleatorio* para alimentar el diseño hidráulico y el usuario determina el número de iteraciones que el programa utilizará para alimentar la base de datos y realizar las regresiones lineales respectivas. Duque (2015) destaca que, a medida que pasan las iteraciones, el método aprende de las iteraciones anteriores y el proceso mejora. Finalmente, su metodología es aplicada a una red plana (pozos a igual cota) teniendo resultados satisfactorios.

### 3.4 Metodología propuesta para la elección del trazado

En la sección 3.3 se realizó una explicación detallada de la metodología que en el inicio de la investigación iba a ser aplicada a diferentes tipos de redes con varias características topográficas y de variación de caudal para medir el impacto de estos datos de entrada en el diseño optimizado de redes de drenaje urbano. Este ejercicio fue desarrollado en el documento de tesis 1 y sus conclusiones determinaron que para redes que poseían una topografía ondulada o empinada la metodología original no representaba la mejor manera de plasmar los costos del diseño hidráulico en los costos de la elección del trazado. Por ende, la investigación se complementó con una revisión de la metodología y propuesta de una mejora que permita su aplicación de forma más general a la original. Para ello, en esta sección se explica la metodología desarrollada iniciando como antecedente los resultados encontrados en tesis 1 y luego la explicación de la extensión a la metodología desarrollada. En este proceso se presenta la red Chicó sur introducida para explicar la metodología.

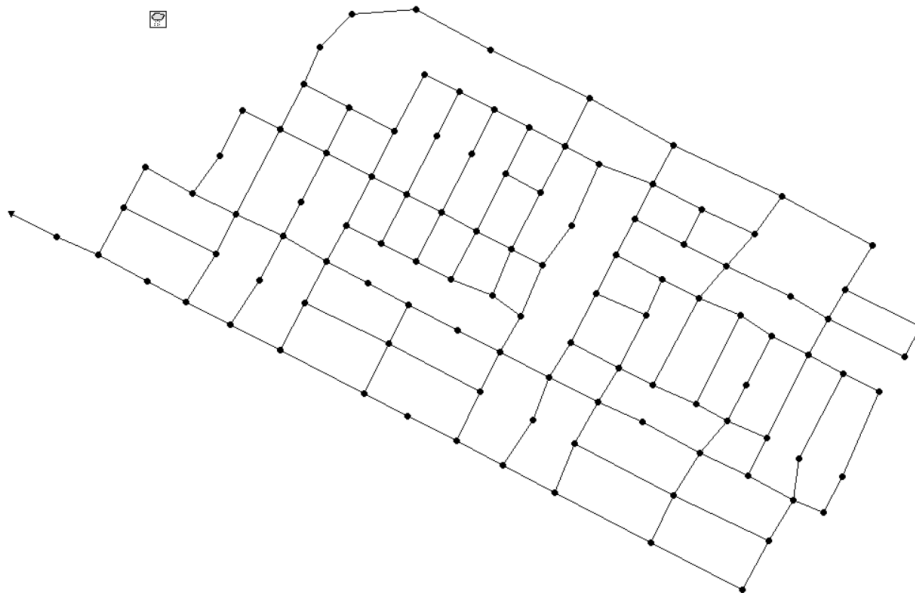
#### 3.4.1 Descripción del caso de estudio original. Red Chicó sur

La Red de Chicó sur es una red patrón comúnmente utilizada en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados para estudiar el problema del diseño optimizado de redes de drenaje urbano. Su localización se encuentra en Bogotá en el sector conocido como Chicó ubicado entre la calle 94 y 100 y entre la carrera séptima hasta la diagonal de la 97.

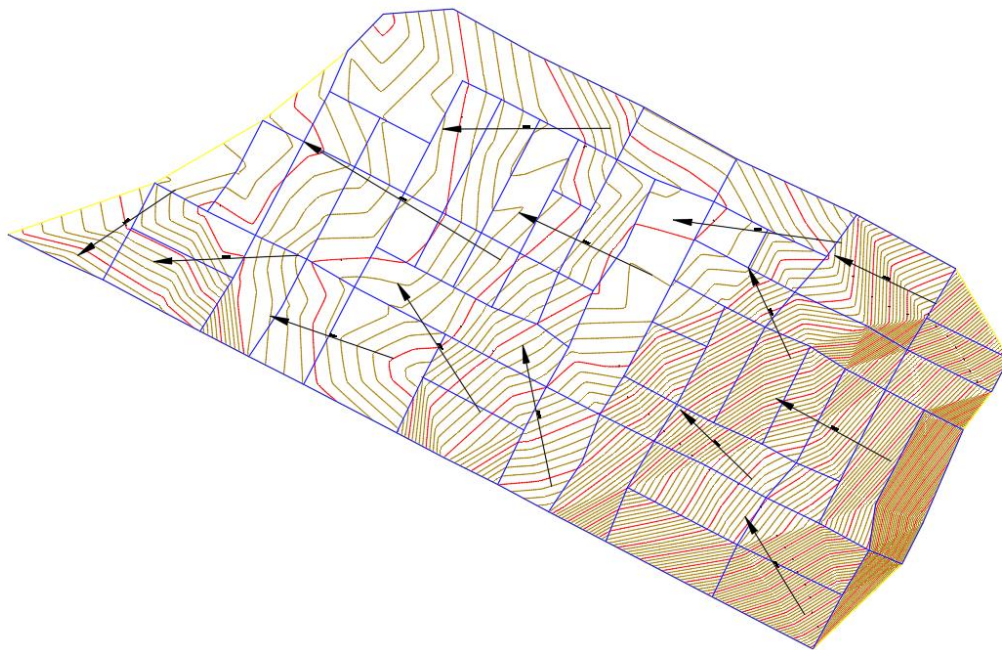


**Figura 14.- Ubicación de la red Chicó sur, Bogotá**

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 86 hectáreas.



**Figura 15.- Ubicación de pozos y tuberías de la red de Chico Sur**



**Figura 16.- Topografía del terreno de la red de Chicó sur. Curvas principales (rojas) cada metro**

Los datos correspondientes a las coordenadas x, y, z de la tapa de los pozos se detallan en los anexos y los caudales de entrada a los pozos fueron recogidos del artículo “*An exact methodology for sewer systems design*” presentado por Duque, Duque, Saldarriaga y Medaglia (2016) con un caudal de salida de  $1.524 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 3.4.2 Aplicación de la metodología de Duque (2015) a la red de Chicó sur

Se aplicó la metodología para los siguientes parámetros y restricciones de diseño:

- **Elección del trazado:** metodología Natalia Duque. (Trazado inicial aleatorio)
- **Ecuación de costo para el diseño hidráulico:** ecuación de Navarro.
- **Precisión en cota de manhole:** 10cm
- **Profundidad mínima:** 1.2m
- **Profundidad máxima:** 15m
- **Relación de llenado:** 0.7 ( $d < 0.6m$ ); 0.85 ( $d > 0.6m$ )
- **Velocidad máxima:** 5m/s
- **Velocidad mínima:** 0.45m/s
- **Ks:** 0.0000015 m
- **Diámetros comerciales:** {0.227, 0.407, 0.747, 1.054, 1.586}
- **Número de iteraciones:** 30

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente gráfica:



Figura 17.- Desarrollo de costos para un trazado inicial aleatorio utilizando la ecuación de Navarro

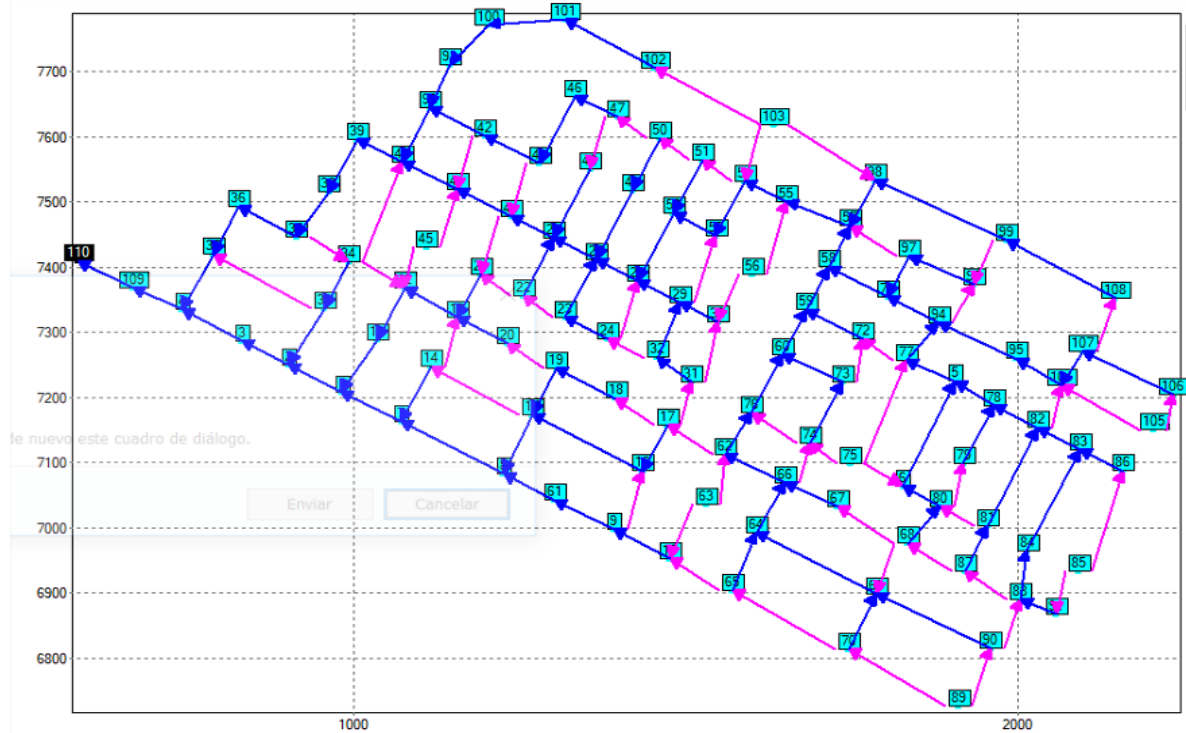
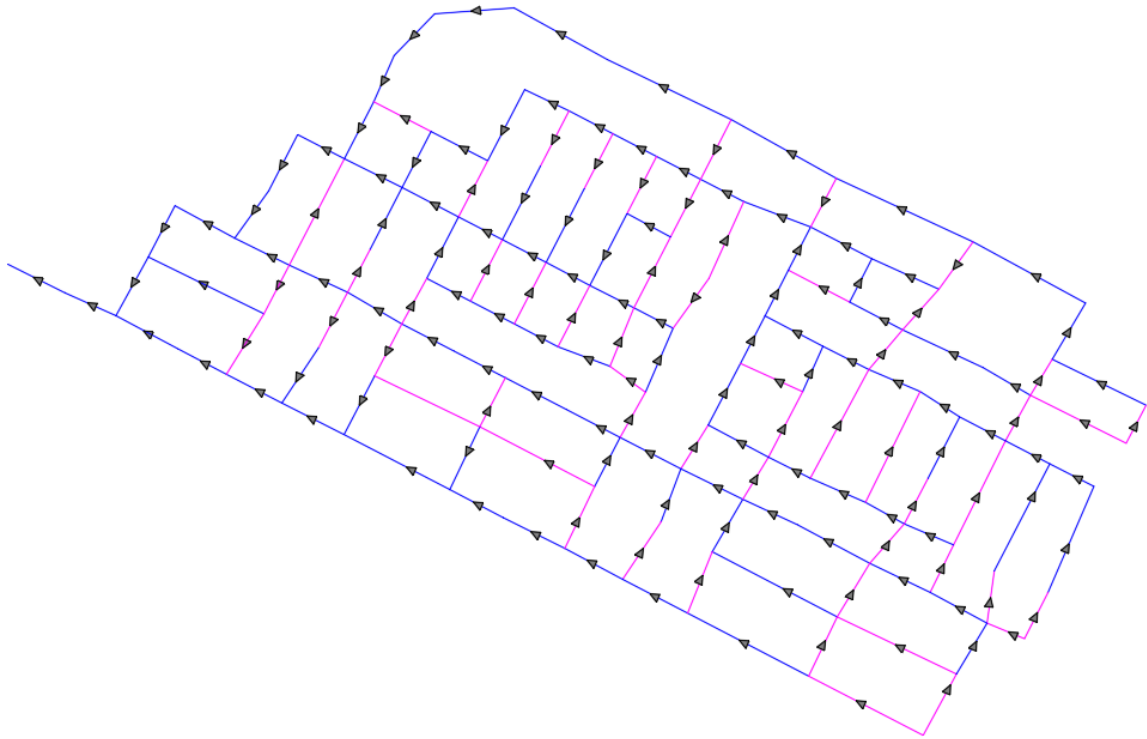


Figura 18.- Mejor resultado encontrado para la red de Chico sur

La Figura 17 muestra el desarrollo de costos de la red de Chico sur al aplicar la metodología original de Duque (2015) y, como era de esperarse, el trazado inicial aleatorio representó la red de mayor costo. Asimismo, a medida que la metodología iba alimentando la ecuación de costo de la elección del trazado los costos fueron reduciéndose hasta llegar a 359 millones de pesos, aproximadamente, por lo que en principio se puede considerar que la metodología funciona. La Figura 18 representa el trazado que obtuvo el menor costo en el diseño hidráulico y es el trazado que minimiza el costo por unidad de flujo en toda la red, en otras palabras, el trazado que conduce de manera óptima el caudal a lo largo del sistema. Sin embargo, al comparar el trazado resultante con la topografía del terreno detallada en la Figura 16, se logra identificar ciertos tramos que están en contrapendiente a la caída natural del terreno, lo que implicaría un aumento en las profundidades de excavación y, por lo tanto, un aumento en los costos del sistema.

Siguiendo las recomendaciones de Haghghi y Bakhshipour (2015), se propuso un trazado alternativo tratando de seguir la topografía natural del terreno y se aplicó la metodología de Duque (2015) solo para el diseño hidráulico. El trazado propuesto fue el siguiente:



**Figura 19.- Trazado alternativo propuesto siguiendo la topografía natural del terreno**

Al realizar la optimización del diseño hidráulico para el trazado propuesto en la figura anterior y utilizando las mismas suposiciones y restricciones de diseño, el costo de la red fue de 321'814.069,96 pesos colombianos, lo que representa un menor costo al mejor encontrado utilizando la metodología original de Duque (2015). La diferencia de costo entre los trazados pasa principalmente por la profundización de la red en la Figura 18, motivada por la topografía del terreno, donde la pendiente natural de esta no coincide con la manera óptima de transportar el caudal por la red. Dado que la función objetivo planteada por Duque (2015) para la elección del trazado solo toma en cuenta al caudal como variable, es necesario incluir un componente que tome en cuenta la topografía del terreno para elegir la dirección y tipo de tubería, especialmente cuando el terreno no es plano.

### **3.4.3 Inclusión de la topografía del terreno como variable en la elección del trazado**

La metodología que se propone es una extensión a la propuesta por Duque (2015) en su tesis de maestría, es decir, optimización lineal entera mixta, incluyendo las variables conocidas en el problema de la elección del trazado: el caudal, la topología de la red y la topografía del terreno. Utilizando la misma notación, la función de costos propuesta es la siguiente:





$$\min \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_L} c_{ij} q_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_L} a_{ij} x_{ijt} + \text{TOPOGRAFÍA}$$

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_L} c_{ij} q_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_L} a_{ij} x_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_L} m_{ijt} x_{ijt}$$

*Ecuación 17*

Donde:

$q_{ijt}$ : caudal que pasa por el tramo  $ij$ .

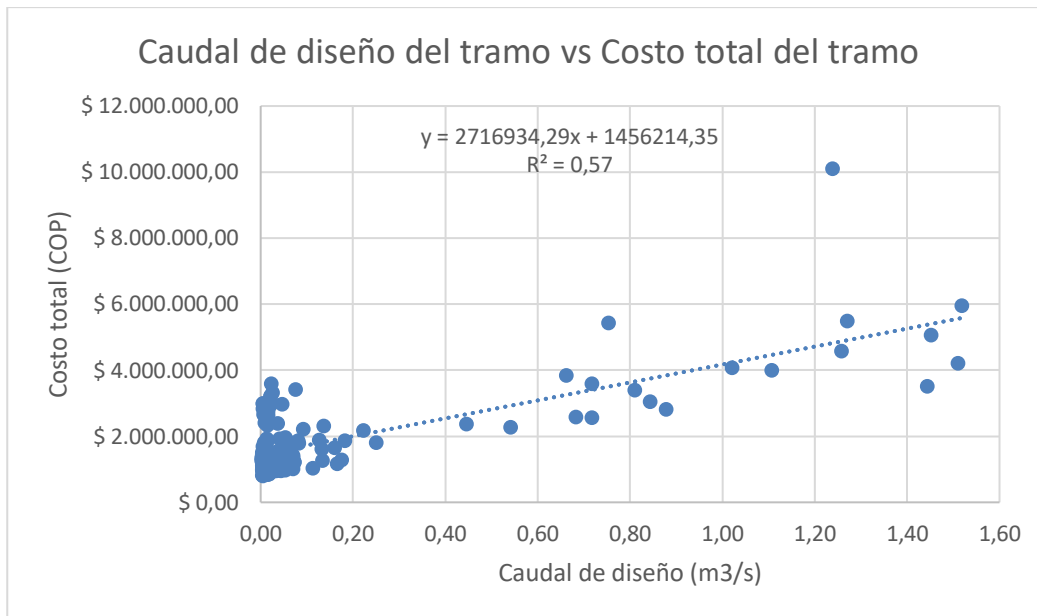
$$x_{ijt} \begin{cases} 1 & \text{si el arco } (i, j, t) \text{ define el trazado de la red} \\ 0 & \text{d.l.c} \end{cases}$$

$c_{ijt}$ ,  $a_{ijt}$ : coeficientes que dependen del caudal del tramo  $ij$ .

$m_{ijt}$ : coeficiente que depende de la topografía del terreno.

Los primeros dos sumando de la Ecuación 17 corresponden a los costos asociados con el caudal, tal como lo define la metodología original de Duque (2015), pero como se verá más adelante, la forma de determinar los coeficientes  $c$  y  $a$  será diferente; mientras que el tercer sumando es el costo asociado con la topografía del terreno y, más específicamente, con la pendiente del terreno en el tramo que será instalado.

El desafío principal detrás de utilizar la Ecuación 17 se puede destacar en dos partes: la consideración de linealidad entre los costos del diseño hidráulico y el caudal, y explicar el coeficiente  $m$  con los datos de entrada conocidos en la elección del trazado. Para la primera, por lo general la ecuación de costos utilizada para calcular el costo constructivo de un tramo es no lineal, donde las variables comunes como diámetro y profundidad de instalación son elevadas a potencias diferentes a 1 como, por ejemplo, la ecuación de Navarro presentada en el marco teórico. En su metodología, Duque (2015) propone realizar una regresión lineal entre los costos constructivos y el caudal para determinar los coeficientes  $c$  y  $a$ ; sin embargo, al momento de considerar un trazado dado y su respectivo diseño hidráulico para la red de Chicó sur se puede obtener la siguiente gráfica con respecto a sus costos y caudal de diseño de cada tramo:



**Figura 20.- Gráfica de los costos y caudal de cada tramo en la red de Chicó sur evaluada**

Para cada tramo de la red se tendrá un punto en la gráfica que en el caso de Chicó sur son 159. En la Figura 20, los coeficientes  $c$  y  $a$  serían definidos por la pendiente y el intercepto de la regresión lineal, respectivamente; sin embargo, al observar el coeficiente de ajuste de bondad en 0.57 se puede afirmar que una regresión lineal no representa de la mejor forma la relación entre los costos constructivos del tramo y el caudal de diseño de este. Que una regresión lineal no se ajuste de buena manera en la gráfica no solo se debe a la función de costo utilizada en el diseño hidráulico sino también a dos factores que son: graficar los costos de las tuberías de inicio implica la concentración de puntos en la parte inicial del eje de las abscisas y la heterogeneidad de longitudes en los tramos implica que para un mismo caudal de diseño se tenga diferentes costos por la longitud que pueden ser muy diferentes.

Como se afirmó anteriormente, el objetivo principal de realizar la regresión lineal de los costos en el diseño hidráulico es determinar los coeficientes que la función objetivo de la elección trazado utilizará para minimizar el costo por unidad de flujo; sin embargo, utilizar una regresión para determinar el costo constructivo de una *tubería de inicio* es un error, porque determinar este costo podría no ser tan complejo debido a que en estos tramos por lo general se utiliza el diámetro mínimo así como también la profundidad mínima de excavación, siendo su costo por metro lineal casi constante en toda la red. Bajo esta suposición, es posible que para la Ecuación 17 el costo de las tuberías de inicio se calcule directamente sin la necesidad de definir el coeficiente  $c$  y  $a$  que están en función del caudal, sino que a través del tercer sumando se lo determine explícitamente. Por lo tanto, para los dos arcos de inicio especificados en la Figura 10 se asociará directamente un costo constructivo a través del coeficiente  $m$ , siendo el coeficiente  $c$  y  $a$  igual a 0.

Para determinar el coeficiente  $m$  de las tuberías de inicio se debe tener como información un diseño hidráulico inicial que será explicado de forma más detallada en secciones posteriores, en donde

se define un trazado inicial eficiente sin la necesidad de iniciar el proceso con un trazado aleatorio que por su naturaleza es no eficiente. Teniendo la información de un diseño hidráulico inicial es posible determinar el costo promedio por metro lineal de las tuberías de inicio y, con ello, determinar el costo que se le asignará a los arcos para la elección del trazado de la siguiente iteración. Lo anterior es correcto cuando la pendiente del terreno es mayor, o por lo menos igual, a la pendiente promedio de instalación de las tuberías de inicio en la iteración anterior, cuando esto no sucede es posible que la tubería se haya profundizado, lo que implica un aumento en su costo constructivo, el cual debe ser considerado por medio del mismo coeficiente  $m$ . Esta consideración puede plasmarse por medio de una penalización por el sobrecosto asociado al arco, dato que puede ser calculado aproximadamente con la pendiente del terreno, pendiente promedio de instalación de las tuberías de inicio, diámetro mínimo y ecuación de costo. Esta penalización es importante especialmente cuando la dirección del arco inicial está en contrapendiente a la del terreno, lo que para topografías onduladas o empinadas es un error grave y donde incluso se puede dar una mayor penalización en el costo. En resumen:

Para arcos iniciales, los coeficientes  $c$  y  $m$  valen 0 y el coeficiente  $m$  se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Si } S_{\Delta} \geq S_I \text{ entonces } m_{ijl} = \text{Costo promedio de tubería inicial por metro lineal} * l_{ij}$$

$$\text{d.l.c. } m_{ijl} = \text{Costo promedio de tubería inicial por metro lineal} * l_{ij} + \text{penalización}$$

#### *Ecuación 18*

Donde:

$S_{\Delta}$ = Pendiente del terreno

$S_I$ = Pendiente promedio de instalación de las tuberías de inicio en la iteración anterior.

$l_{ij}$ =longitud del tramo  $ij$  en metros.

$m_{ijl}$ =Coeficiente  $m$  de los arcos de inicio en la función objetivo de la elección del trazado.

Con lo explicado anteriormente, es posible eliminar las tuberías de inicio para realizar la regresión lineal propuesta en la Figura 20. Para evitar el error asociado a la heterogeneidad de las longitudes en los tramos de la red, la metodología propone realizar una regresión lineal entre los costos por metro lineal y el caudal del tramo. Volviendo a graficar los datos de la Figura 20 con las correcciones anteriores se tiene:

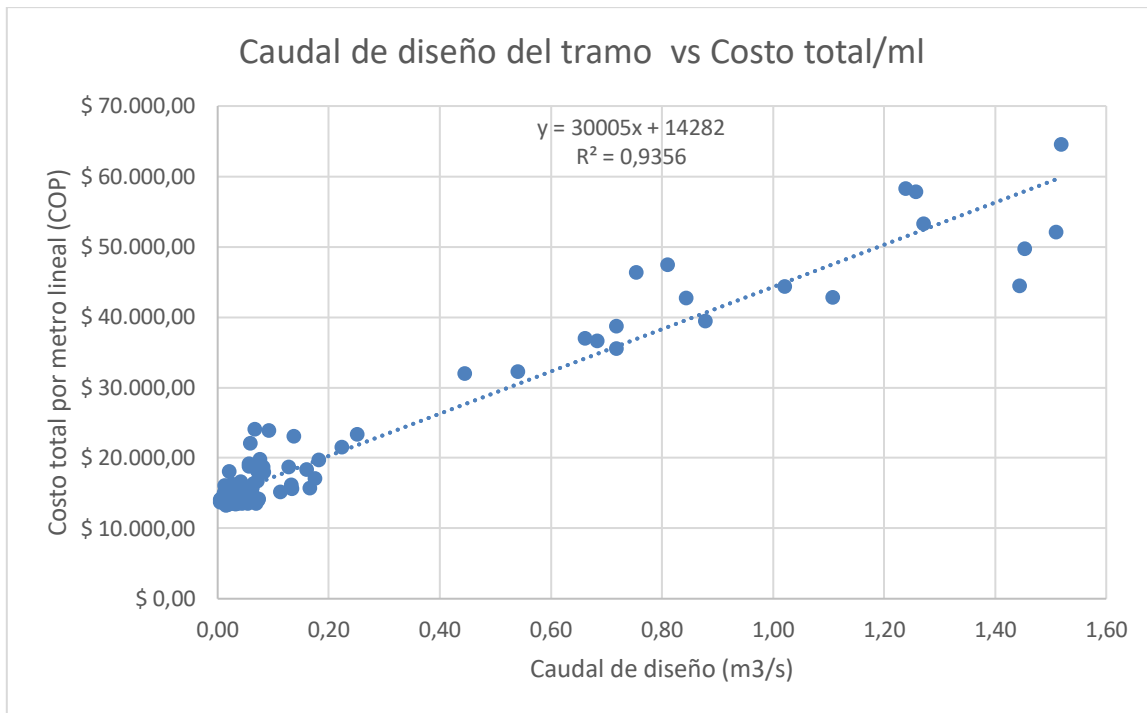


Figura 21.- Metodología propuesta para determinar el coeficiente c y a de las tuberías continuas

Como se puede observar en la figura anterior, eliminando las tuberías de inicio y dividiendo los costos por la longitud de los tramos, la regresión lineal se ajusta mejor a los datos y las variaciones son producto netamente de la no linealidad de la función de costo utilizada en el diseño hidráulico; sin embargo, por la metodología a utilizar, programación lineal entera mixta, la suposición podría considerarse correcta. Por lo tanto, para las tuberías continuas el costo por unidad de flujo por metro lineal de tubería podría determinarse con una regresión lineal, donde el coeficiente c estaría determinado por la pendiente de la función lineal y el coeficiente a sería el intercepto. Como los costos se dividieron para la longitud del tramo, la Ecuación 17 se cambia introduciendo la longitud del tramo como sigue:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_L} c_{ij} l_{ij} q_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_L} a_{ij} l_{ij} x_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_L} m_{ijt} x_{ijt}$$

Ecuación 19

Al igual que las tuberías de inicio, cuando se tiene una red ubicada en un terreno ondulado o empinado existe la posibilidad que la metodología, al tratar de minimizar el costo por unidad de flujo, elija ciertas tuberías continuas cuya dirección está en contra de la pendiente natural del terreno. En este caso se tiene el mismo problema de profundización del tramo, el cual debe ser considerado en la Ecuación 19 con la misma naturaleza que la de las tuberías de inicio, es decir, como una penalización. Asimismo, a diferencia de las tuberías de inicio, en un tramo continuo no se tiene certeza de la

profundidad de excavación que se tiene especialmente en terrenos no planos y, por lo tanto, el coeficiente  $c$  y a tendrían que absorber esa incertidumbre; sin embargo, lo claro es que dada una red y topografía del terreno, un trazado inicial muy bueno determinará la pendiente promedio óptima de instalación de las tuberías, lo que permite asumir que cuando la pendiente del terreno es mayor a la pendiente promedio de instalación posiblemente la profundidad acumulada del tramo aguas arriba disminuya por esa pendiente a favor. Lo anterior implica que en ese caso se tendrá una reducción de costos asociada con la profundidad de excavación y, también, debe considerarse a través de un bono en la Ecuación 19. En otras palabras, el coeficiente  $m$  debe recoger, para las tuberías continuas, un bono o penalización en función de la pendiente del terreno y la pendiente promedio de instalación de las tuberías continuas.

Para determinar el bono o penalización se debe calcular el volumen de excavación aproximado que se perderá o ganará. Para esto, mediante el cálculo de pendientes es posible determinar la profundidad que aumenta o disminuye y con el diámetro promedio de las tuberías continuas calcular el volumen aproximado. Posteriormente, se aplica la ecuación de costo del diseño hidráulico y se determina el costo que será incluido como bono o penalización a través del coeficiente  $m$ . Resumiendo:

$$\text{Si } S_{\Delta} \geq S_c \text{ entonces } m_{ijc} = \text{Bono}$$

$$\text{d.l.c. } m_{ijc} = \text{Penalización}$$

#### *Ecuación 20*

Donde:

$S_{\Delta}$  = Pendiente del terreno

$S_c$  = Pendiente promedio de instalación de las tuberías de continuas en la iteración anterior.

$m_{ijc}$  = Coeficiente  $m$  de los arcos continuos en la función objetivo de la elección del trazado.

### 3.4.4 Trazado inicial

En la sección anterior se explicó la extensión propuesta a la metodología de Duque (2015), de tal modo que esta sea aplicable a redes ubicadas tanto en terrenos planos como ondulados y accidentados. El cálculo de los coeficientes  $c$ ,  $a$  y  $m$  requieren de un diseño hidráulico inicial y, por ende, un trazado inicial el cual Duque (2015) propone sea aleatorio. Sin embargo, los resultados mostrados demuestran que el trazado inicial aleatorio es deficiente, especialmente en terrenos empinados, por lo tanto, en esta sección se explica una alternativa para determinar un trazado inicial cercano al óptimo utilizando una variante de la Ecuación 19. La alternativa propone utilizar sólo el tercer sumando de la función objetivo propuesta para la elección del trazado, es decir:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in A_L} m_{ijt} x_{ijt}$$

#### *Ecuación 21*

Como la variable  $x$  es binaria, el problema se reduce a uno de optimización por asignación que será resuelto en función del peso que se le ubique a cada uno de los 4 posibles arcos entre dos pozos, a través del coeficiente  $m$ . De los resultados encontrados preliminarmente en el documento de tesis 1 y parte de tesis 2 se llegó a la conclusión que, por un lado, para redes en terrenos con topografía ondulada o accidentada, el criterio más importante era el topográfico, es decir, que el trazado inicial trate de minimizar los costos asociados con la profundidad de excavación y esto podía ser plasmado siguiendo la topografía del terreno; por otro lado, para terrenos planos el criterio a optimizar era el de minimizar la longitud de las series principales de la red al punto de descarga final. Por consiguiente, se desarrollaron 6 diferentes criterios para asignar los pesos a los arcos (coeficiente  $m$ ) cuando la topografía no es plana y 3 criterios cuando es plana que son explicados a continuación.

#### 3.4.4.1 Criterio 1

Para este criterio se asignarán valores  $-1$  y  $1$  en función de la pendiente del terreno. Dado que la función objetivo es minimizar se asignará el valor de  $-1$  para los tramos con pendiente de terreno positiva y el valor de  $1$  para aquellas en contrapendiente, con esto se minimizarán los tramos en contrapendiente reduciendo los costos. Asimismo, para este criterio las tuberías de inicio y continua serán de igual costo.

Gráficamente:

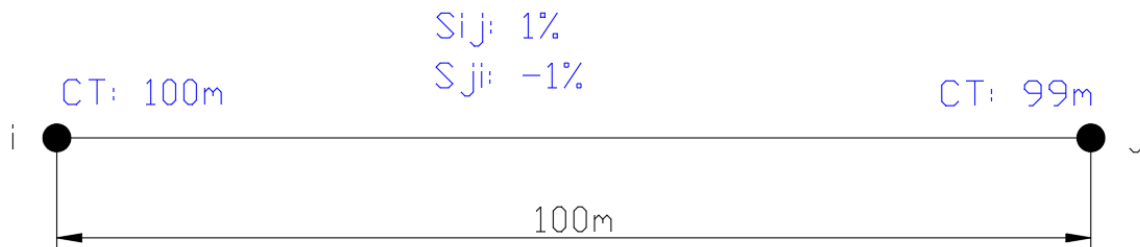


Figura 22.- Suposición de tramo  $ij$  para determinar los valores del coeficiente  $m$

$$x_{ijC} \rightarrow m_{ijC} = -1$$

$$x_{ijI} \rightarrow m_{ijI} = -1$$

$$x_{jiC} \rightarrow m_{jiC} = +1$$

$$x_{jiI} \rightarrow m_{jiI} = +1$$

#### 3.4.4.2 Criterio 2

Se multiplica el valor de  $-1$  por la pendiente del terreno. A diferencia del criterio anterior, la función de costo priorizará aquellos tramos de mayor pendiente de terreno en caso de un conflicto. Las tuberías de inicio y continua siguen siendo de igual costo.

Utilizando la Figura 22, los coeficientes quedarían de la siguiente manera:

$$x_{ijC} \rightarrow m_{ijC} = -0.01$$



$$x_{ijl} \rightarrow m_{ijl} = -0.01$$

$$x_{jic} \rightarrow m_{jic} = +0.01$$

$$x_{jil} \rightarrow m_{jil} = +0.01$$

#### 3.4.4.3 Criterio 3

Es igual al criterio 2, pero las tuberías de inicio serán afectadas por un coeficiente que penalizará su costo para maximizar el número de tuberías continuas.

Utilizando la Figura 22, los coeficientes quedarían de la siguiente manera:

$$x_{ijc} \rightarrow m_{ijc} = -0.01$$

$$x_{ijl} \rightarrow m_{ijl} = -0.01T$$

$$x_{jic} \rightarrow m_{jic} = +0.01$$

$$x_{jil} \rightarrow m_{jil} = +0.01T$$

*Ecuación 22*

#### 3.4.4.4 Criterio 4

Para hallar los coeficientes  $m$  de cada arco se usa la misma metodología del criterio 3, pero penalizando a las tuberías continuas para maximizar el número de tuberías de inicio.

Los coeficientes quedarían de la siguiente manera:

$$x_{ijc} \rightarrow m_{ijc} = -0.01T$$

$$x_{ijl} \rightarrow m_{ijl} = -0.01$$

$$x_{jic} \rightarrow m_{jic} = +0.01T$$

$$x_{jil} \rightarrow m_{jil} = +0.01$$

*Ecuación 23*

#### 3.4.4.5 Criterio 5

En este criterio se usa la misma convección que en el criterio 2, es decir, multiplicar por -1 a la pendiente del terreno pero, además, por la longitud del tramo, tratando en este criterio de involucrar la energía disponible para transportar el caudal por un arco determinado, es decir, priorizar los tramos con mayor diferencia de cota o energía. La fórmula sería:

$$x_{ijT} \rightarrow m_{ijT} = S_{ijT} * -1 * L$$

*Ecuación 24*

Si se toma en cuenta la Figura 22, los coeficientes quedarían de la siguiente manera:

$$x_{ijc} \rightarrow m_{ijc} = -1$$

$$x_{ijl} \rightarrow m_{ijl} = -1$$

$$x_{jic} \rightarrow m_{jic} = +1$$

$$x_{jil} \rightarrow m_{jil} = +1$$

### 3.4.4.6 Criterio 6

Realizando una combinación de los criterios anteriores, los coeficientes  $m$  de cada arco serán obtenidos multiplicando por  $-1$  la pendiente del terreno, por la longitud del tramo y penalizando las tuberías de inicio para maximizar el número de tuberías continuas. Las ecuaciones serían:

$$x_{ijc} \rightarrow m_{ijc} = S_{ijT} * -1 * L$$

$$x_{ijl} \rightarrow m_{ijl} = S_{ijT} * -1 * L * T$$

Ecuación 25

### 3.4.4.7 Criterio 7

El primer criterio para redes ubicadas en terrenos planos es el criterio 7, en donde el coeficiente  $m$  es calculado como la distancia entre el pozo aguas abajo del tramo en donde se le asignará el peso y el punto de descarga final como se esquematiza en la Figura 23. Con este criterio se busca minimizar la longitud de las series principales de la red con respecto al punto de descarga final, para minimizar la profundidad de excavación final. En este criterio, las tuberías de inicio tienen el mismo peso que las continuas.

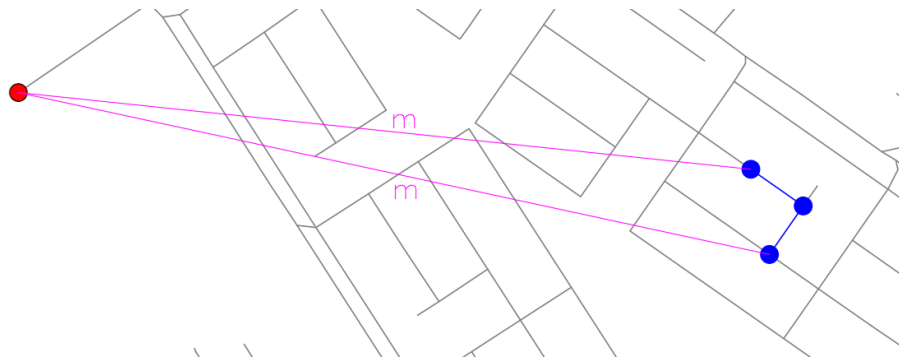


Figura 23.- Esquema para la asignación del coeficiente  $m$  a través del criterio 7

### 3.4.4.8 Criterio 8

Este criterio es igual al criterio 7, pero penalizando las tuberías de inicio para maximizar el número de tuberías continuas.

### 3.4.4.9 Criterio 9

El criterio 9 minimiza la longitud de los tramos continuos maximizando el número de tuberías de inicio. Para lograr esto, el coeficiente  $m$  para las tuberías continuas será igual a la longitud del tramo, mientras que para las de inicios valdrá 0 cambiando un poco la Ecuación 21, como sigue:

$$\min \sum_{C \in T} \sum_{(i,j) \in A_L} m_{ijc} x_{ijc}$$

Ecuación 26

Donde  $m_{ijc}$  es la longitud entre el tramo  $ij$  continuo



### 3.4.5 Iteraciones e integración de la metodología

En esta sección se resumirá la metodología propuesta para el diseño optimizado de redes de drenaje urbano. La propuesta original de Duque (2015) proponía realizar algunas iteraciones para alimentar la base de datos de los costos del diseño hidráulico y representar de mejor manera los coeficientes planteados en la elección del trazado. Los resultados encontrados preliminarmente mostraron que utilizando los criterios explicados en la sección anterior para determinar el trazado inicial se llegaba a un muy buen primer diseño, especialmente, si la topografía es ondulada, por lo tanto, si el diseño inicial está cercano al óptimo y la metodología explicada en la sección 3.4.3 logra representar los costos del diseño hidráulico en la función objetivo de la elección del trazado no será necesario más de 1 iteración para comprobar si el diseño inicial puede ser mejorado o no. Resumiendo, la metodología propuesta quedaría de la siguiente manera:

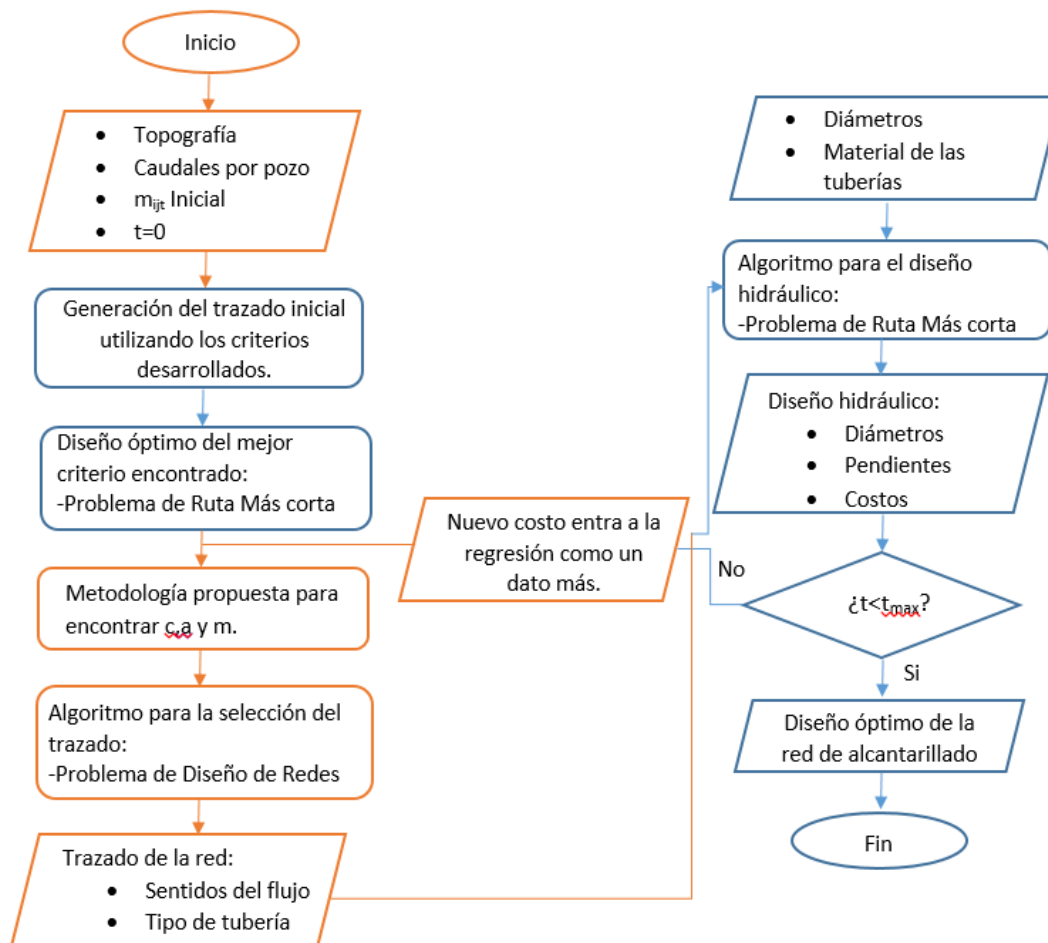


Figura 24.- Diagrama de flujo de la metodología propuesta

### 3.5 Conclusiones

El problema del diseño optimizado de redes de drenaje urbano ha sido estudiado históricamente en sus dos componentes, principalmente, utilizando algoritmos heurísticos que no garantizan el óptimo global. De los pocos estudios que han demostrado una metodología exhaustiva destaca el propuesto por Duque (2015), cuyo componente del diseño hidráulico podría considerarse robusto y funcional, pero que para la elección del trazado la metodología carece de precisión cuando la red es ubicada en un terreno con topografía irregular. Los resultados mostraron que la función objetivo utilizada para la elección del trazado toma en cuenta como variable el caudal, el cual no considera los caminos topográficos naturales de la red que conlleva a una profundización del sistema y aumento en sus costos. Por tal motivo, el objetivo de la investigación se centró en modificar esa función objetivo para generalizar su aplicación, de tal forma que tome en cuenta las variables conocidas para la elección del trazado: el caudal, la topología de la red y la topografía del terreno.

La metodología propuesta tomó como base la de Duque (2015), es decir, optimización lineal entera mixta que usa una función objetivo lineal y cuyo reto principal se deriva en representar de mejor manera sus parámetros y variables con las relacionadas al costo constructivo de la red en el diseño hidráulico. Para lograr esto se introdujo un sumando adicional a la función objetivo que represente los costos asociados con la topografía del terreno, de tal manera que tome en cuenta la reducción o aumento de costos por definir un tramo con pendiente a favor o en contra del terreno. Asimismo, el costo por unidad de flujo (caudal) se modificó de tal manera que una regresión lineal se aproxime mejor a los costos reales en el diseño hidráulico. El cambio introducido para modificar lo anterior fue retirar los costos de las tuberías de inicio en la regresión lineal, así como también eliminar la incertidumbre producida por la heterogeneidad de las longitudes al considerar el costo del tramo por metro lineal, con lo cual se alcanzan los resultados esperados y se mejora el coeficiente de ajuste de bondad de la regresión.

Para la metodología propuesta, el trazado inicial no es aleatorio y se lo determina con base en una modificación de la ecuación original propuesta, de tal manera que el problema se reduzca a una de optimización por asignación en donde el peso de cada arco estará determinado por varios criterios en función de la clase de topografía dada. Analizado todos los criterios, se escoge el mejor trazado inicial para aplicar la metodología completa, la cual establece que si los costos del diseño hidráulico son representados de manera correcta en los coeficientes de la función objetivo de la elección del trazado, el procedimiento permitirá comprobar si el costo del trazado inicial se puede mejorar o no. Con base en lo anterior, aplicar una sola iteración deberá ser suficiente para optimizar el trazado de la red. El procedimiento desarrollado deberá ser aplicado a redes con diferentes topografías y caudales para validar su funcionamiento o adaptarla en función del tipo de red que se tenga.

## 4 RESULTADOS

La metodología desarrollada en la sección 3.4 es probada para diferentes casos de estudio que son presentadas en las secciones posteriores. Se escogió 5 redes con diferentes características que cubren la mayoría de escenarios en la que un ingeniero puede enfrentar en su vida profesional y comprobar si la metodología es capaz de reducir los costos para todas las redes.

### 4.1 Casos de estudio

#### 4.1.1 Red Chicó sur

La descripción de la red se la realizó en la sección 3.4.1.

##### 4.1.1.1 Trazado inicial

Se aplicó la metodología explicada en la sección 3.4.4 para calcular el coeficiente  $m$  para los 9 criterios desarrollados. Para cada criterio se obtuvo un trazado que minimizó la función objetivo y se realizó el diseño hidráulico con las siguientes suposiciones y restricciones:

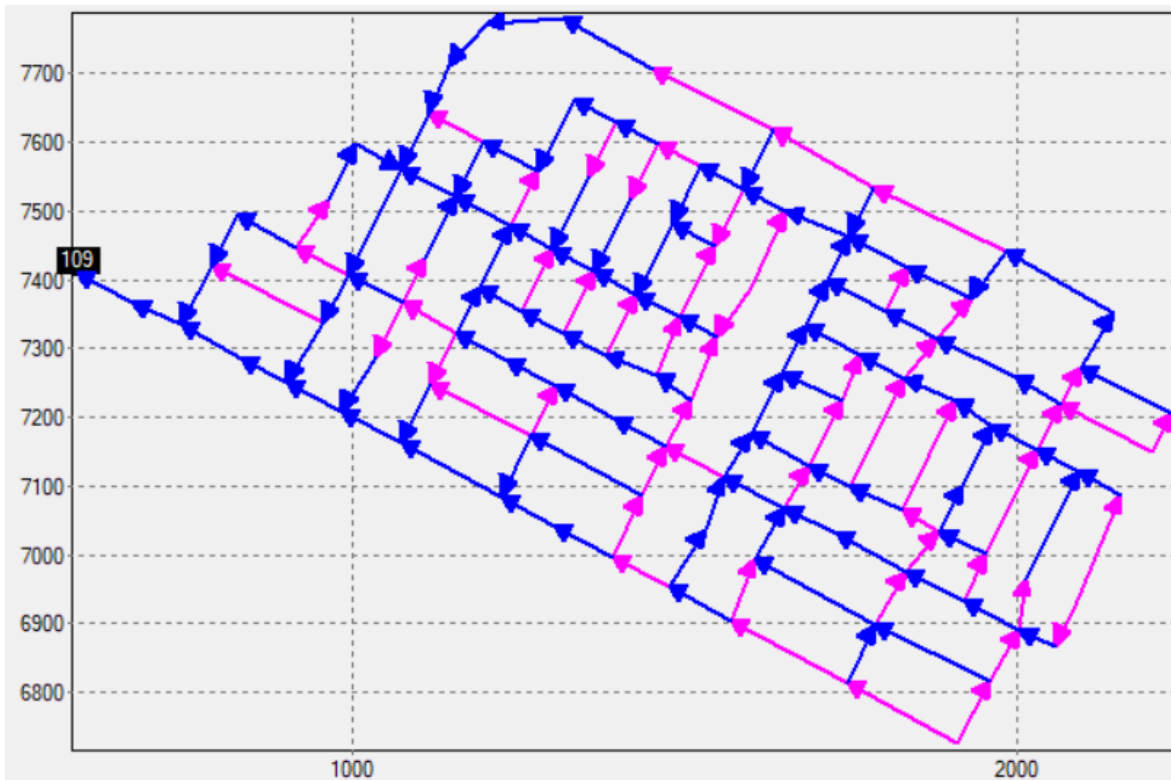
- **Elección del trazado:** metodología desarrollada (9 criterios)
- **Ecuación de costo para el diseño hidráulico:** ecuación de Navarro.
- **Precisión en cota de manhole:** 10cm
- **Profundidad mínima:** 1.2m
- **Profundidad máxima:** 5m
- **Relación de llenado:** 0.7 ( $d < 0.6m$ ); 0.85 ( $d > 0.6m$ )
- **Velocidad máxima:** 5m/s
- **Velocidad mínima:** 0.45m/s
- **Ks:** 0.0000015 m
- **Diámetros comerciales:** {0.227, 0.284, 0.327, 0.362, 0.407, 0.452, 0.595, 0.670, 0.747, 0.824, 0.900, 0.978, 1.054, 1.18, 1.271, 1.363, 1.423, 1.586}

Los costos constructivos de cada red obtenida se muestran a continuación:

Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
<b>Criterio 1</b>	\$313,269,245.21	1.329	2.528	0.323	0.227	0.900	102	58
<b>Criterio 2</b>	\$311,518,025.39	1.318	2.528	0.321	0.227	0.900	101	59
<b>Criterio 3</b>	\$297,743,813.40	1.327	2.528	0.303	0.227	0.900	104	56
<b>Criterio 4</b>	\$316,731,769.24	1.314	2.325	0.327	0.227	0.900	101	59
<b>Criterio 5</b>	\$316,004,543.09	1.311	1.951	0.327	0.227	0.900	101	59
<b>Criterio 6</b>	\$297,904,105.93	1.314	2.228	0.310	0.227	0.900	104	56
<b>Criterio 7</b>	\$397,898,969.63	1.936	5.416	0.320	0.227	0.900	105	55
<b>Criterio 8</b>	\$479,768,803.10	2.237	9.423	0.336	0.227	0.900	108	52
<b>Criterio 9</b>	\$433,306,069.09	1.945	7.036	0.344	0.227	0.978	76	84

**Tabla 4.- Resultados del diseño hidráulico para los 9 trazados iniciales de Chicó sur**

El mejor costo constructivo se obtuvo con el criterio 3, el cual prioriza los tramos de mayor pendiente del terreno y minimiza el número de tuberías de inicio o arranque. El trazado se muestra a continuación:

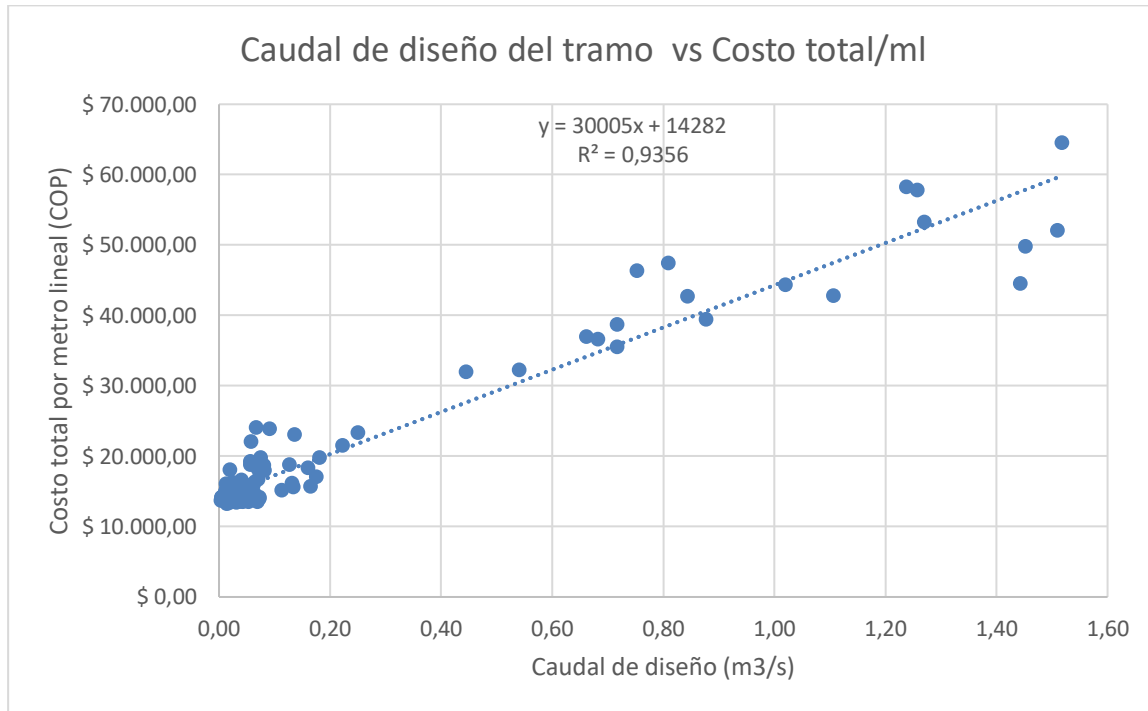


**Figura 25.- Trazado para la red Chicó sur con el criterio 3. En magenta las tuberías de inicio y en azul las continuas**

#### 4.1.1.2 Iteraciones

Con el trazado de la Figura 25 se realiza el diseño hidráulico para obtener la solución de mínimo costo y poder aplicar la metodología propuesta. Como punto de arranque se determina los costos por metro

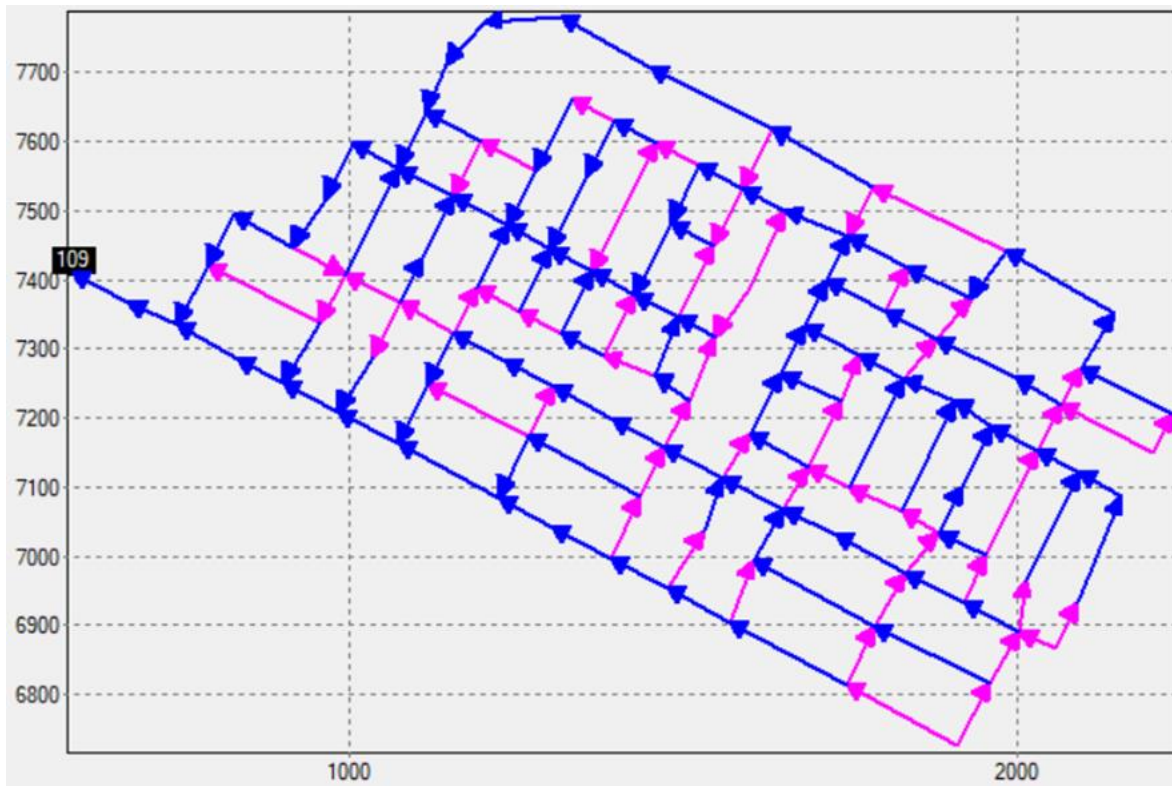
lineal de cada tramo de tubería continua con su correspondiente caudal de diseño para poder graficar los puntos y realizar la regresión lineal. La gráfica resultante se muestra a continuación:



**Figura 26.- Regresión lineal de los costos por metro lineal de las tuberías continuas y su caudal de diseño**

En base a la gráfica anterior, los coeficientes  $c$  y  $a$  de las tuberías continuas serían 30005 y 14282, respectivamente. Para las tuberías de inicio estos coeficientes son igual a 0. Para calcular el coeficiente  $m$  de las tuberías continuas se determina la pendiente promedio de instalación de los tramos continuos en el trazado inicial, el cual fue calculado en 1.27%, es decir, para todos los tramos continuos cuya pendiente del terreno sea mayor a 1.27% se calculará un bono con la ecuación de Navarro para prever el posible ahorro en los costos constructivos por una disminución en los costos de excavación de ese tramo. Asimismo, si la pendiente del terreno es menor a 1.27% se calculará una penalización del arco continuo calculado de manera similar al bono. Para las tuberías de inicio, el costo promedio por metro lineal del trazado inicial fue de \$14465COP y se observa muy poca variación en los tramos como se esperaba, por lo tanto, el coeficiente  $m$  de los arcos de inicio se puede calcular multiplicando ese costo promedio por la longitud de este. De igual manera que los arcos continuos, en los arcos iniciales se puede adicionar al coeficiente  $m$  una penalización calculado de manera similar a los continuos con la ecuación de Navarro, en este caso, no se tendrá bonos por ser tramos iniciales.

Explicados los coeficientes  $c$ ,  $a$  y  $m$  para la iteración 1 en la función de costo propuesta para la elección del trazado, el resultado obtenido es el siguiente:



*Figura 27.- Trazado resultante para Chicó sur en la iteración 1*

Al aplicar las mismas restricciones y suposiciones definidas para el trazado inicial en el diseño hidráulico del trazado de la Figura 27 se obtienen los siguientes resultados:

Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
Criterio 3	\$297,743,813.40	1.327	2.528	0.303	0.227	0.900	104	56
Iter 1	\$293,613,930.36	1.324	2.205	0.302	0.227	0.824	103	57

*Tabla 5.- Resultados del diseño hidráulico para el trazado inicial e iteración 1 de la red de Chicó sur*

En la iteración 1, el diseño hidráulico reflejó menores costos que el trazado inicial.

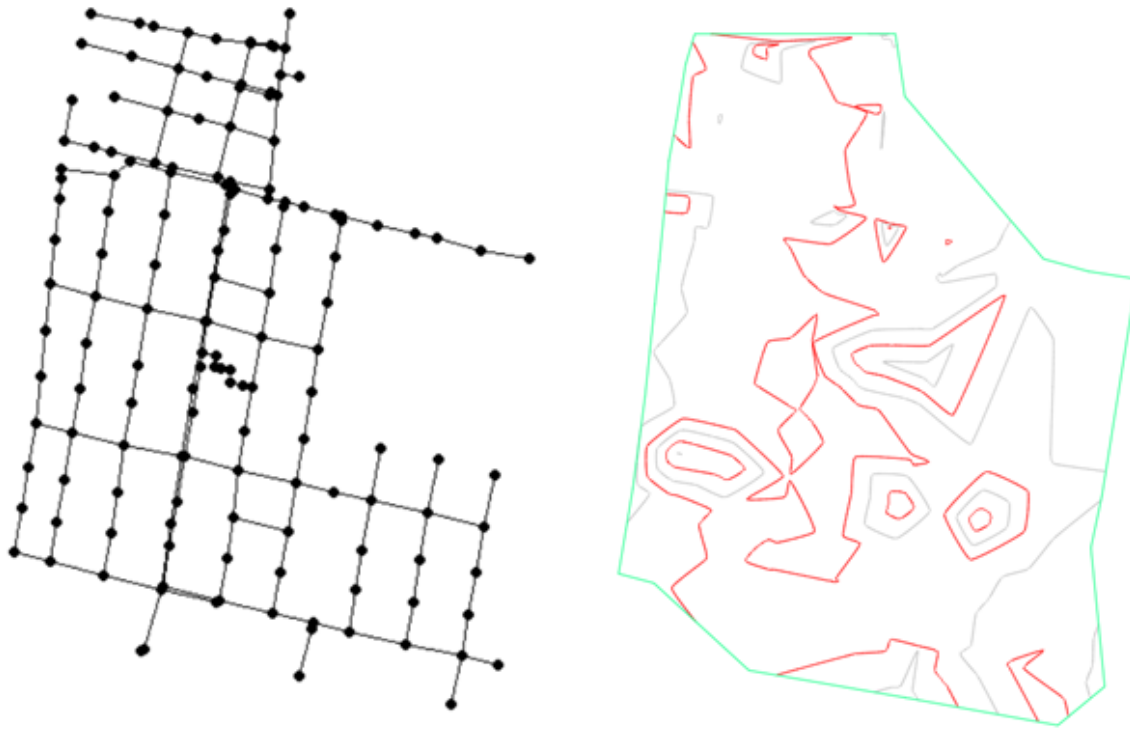
#### 4.1.2 Red Cedritos 1

La red Cedritos 1 es una red de alcantarillado sanitario ubicada al norte de la ciudad de Bogotá entre la calle 163 y 172 y entre la carrera 16 hasta la autopista norte. Su cuenca tributaria es de aproximadamente 74 hectáreas.



**Figura 28.- Ubicación de la Red Cedritos 1, Bogotá**

La red cuenta con 146 manholes, 1 descarga y 171 tuberías con una longitud promedio de 65 metros y un máximo de 116 metros. Los datos x, y y z de los pozos son adjuntados en los anexos del presente documento. La topografía del terreno es relativamente plana, donde la diferencia de cota entre el punto mas alejado y la descarga es de aproximadamente 50 cm, pudiendo existir pequeñas elevaciones y depresiones en la parte intermedia de la red como muestra la siguiente figura:



**Figura 29.-** En la parte izquierda la ubicación de manholes y tuberías de la red, y en la parte derecha la topografía del terreno. Curvas principales (rojas) cada metro

Se calculó el área de aportación de cada uno de los pozos y se estableció la densidad de vivienda y dotación para calcular el caudal de entrada a cada uno de estos. Los caudales son mostrados en los anexos y el caudal de descarga final es de 78,7 l/s.

#### 4.1.2.1 Trazado inicial

Se calculó el coeficiente  $m$  para los 9 criterios desarrollados en la metodología propuesta y se realizó el respectivo diseño hidráulico de cada trazado. Adicionalmente, se aplicó la metodología de Duque (2015) con un total de 30 iteraciones para obtener el mejor trazado y poder comparar sus resultados. Las suposiciones y restricciones usadas se detallan a continuación:

- **Elección del trazado:** metodología desarrollada (9 criterios), metodología Duque (2015)
- **Ecuación de costo para el diseño hidráulico:** ecuación de Navarro.
- **Precisión en cota de manhole:** 10cm
- **Profundidad mínima:** 1.2m
- **Profundidad máxima:** 10m
- **Relación de llenado:** 0.7 ( $d < 0.6m$ ); 0.85 ( $d > 0.6m$ )
- **Velocidad máxima:** 5m/s
- **Velocidad mínima:** 0.45m/s
- **Ks:** 0.0000015 m



- **Diámetros comerciales:** {0.227, 0.284, 0.327, 0.362, 0.407, 0.452, 0.595, 0.670, 0.747, 0.824, 0.900, 0.978, 1.054, 1.18, 1.271, 1.363, 1.423, 1.586}
- **Iteraciones para metodología de Duque (2015):** 30

Los costos constructivos de cada red obtenida se muestran a continuación:

Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
<b>Criterio 1</b>	\$246,961,486.14	2.355	5.338	0.260	0.227	0.362	116	55
<b>Criterio 2</b>	\$216,483,755.74	2.025	4.393	0.253	0.227	0.407	112	59
<b>Criterio 3</b>	\$213,984,983.67	2.056	5.223	0.248	0.227	0.327	117	54
<b>Criterio 4</b>	\$218,211,869.99	2.037	4.393	0.254	0.227	0.407	112	59
<b>Criterio 5</b>	<b>\$211,595,951.44</b>	<b>2.047</b>	<b>5.816</b>	<b>0.248</b>	<b>0.227</b>	<b>0.284</b>	<b>113</b>	<b>58</b>
<b>Criterio 6</b>	\$217,831,692.79	2.084	5.323	0.250	0.227	0.327	119	52
<b>Criterio 7</b>	\$234,759,023.25	2.306	4.473	0.252	0.227	0.407	122	49
<b>Criterio 8</b>	\$246,415,728.11	2.469	6.323	0.249	0.227	0.327	124	47
<b>Criterio 9</b>	\$236,064,752.76	2.245	6.123	0.256	0.227	0.327	101	70
<b>Menor costo metodología Duque (2015)</b>	\$218,865,712.25	2.141	5.416	0.248	0.227	0.284	111	60

*Tabla 6.- Resultados del diseño hidráulico para los 9 trazados iniciales de Cedritos 1 y el obtenido con la metodología de Duque (2015)*

Para la red de Cedritos 1, el mejor criterio para definir el trazado inicial fue priorizar los tramos de mayor diferencia de nivel entre pozos o energía disponible, dando un costo constructivo menor al mejor obtenido por la metodología de Duque (2015) a pesar de poseer topografía plana.

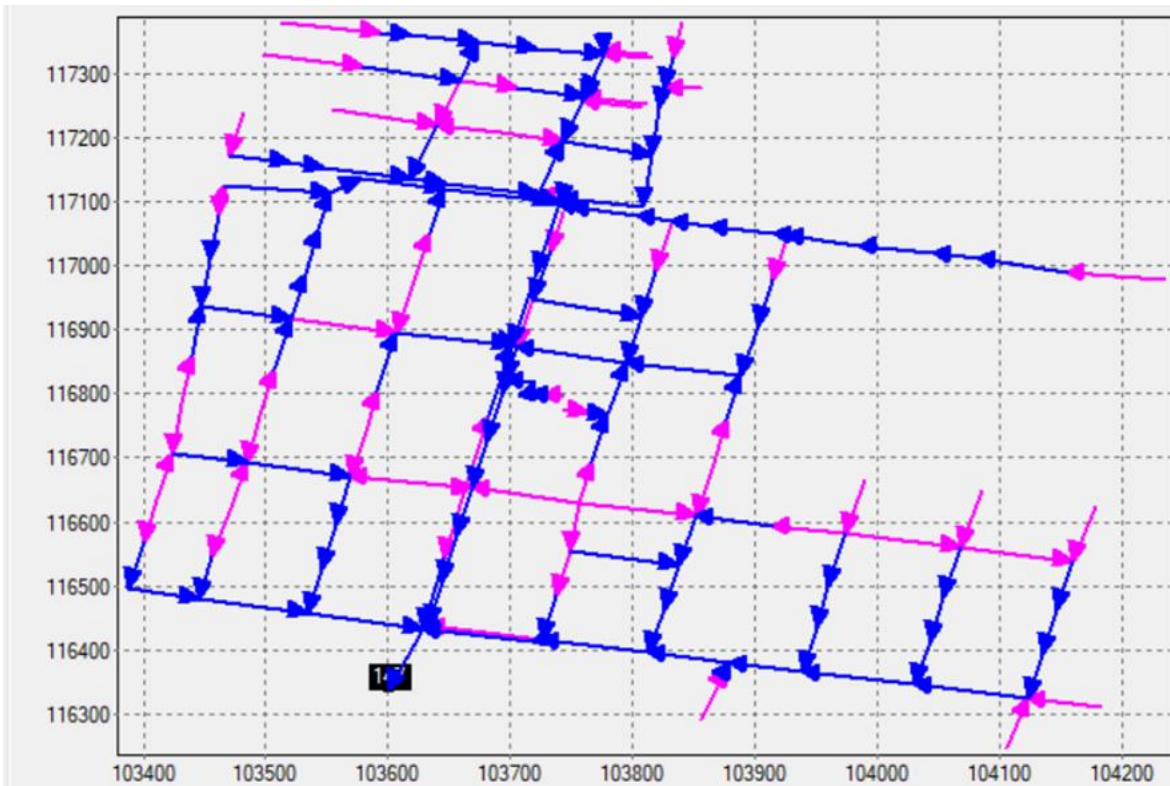
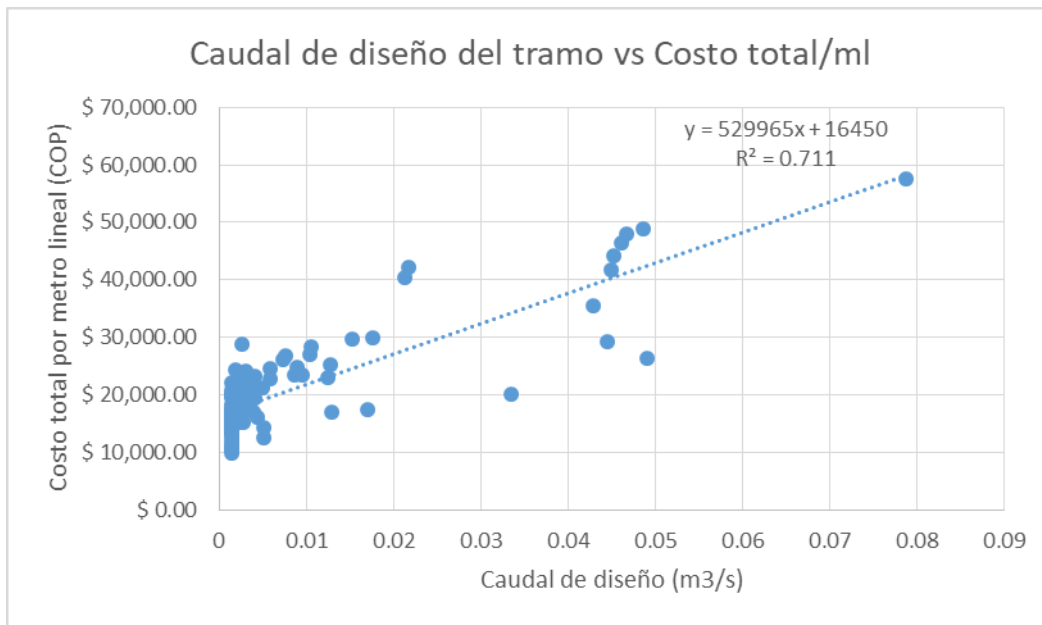


Figura 30.- Trazado inicial para Cedritos 1 utilizando el criterio 5. En magenta los tramos de inicio o arranque y en azul las continuas

#### 4.1.2.2 Iteraciones

Al igual que la red de Chicó sur, los resultados obtenidos del trazado inicial se procesan para obtener la regresión lineal de los costos por metro lineal y el caudal de diseño de los tramos continuos. Graficando:

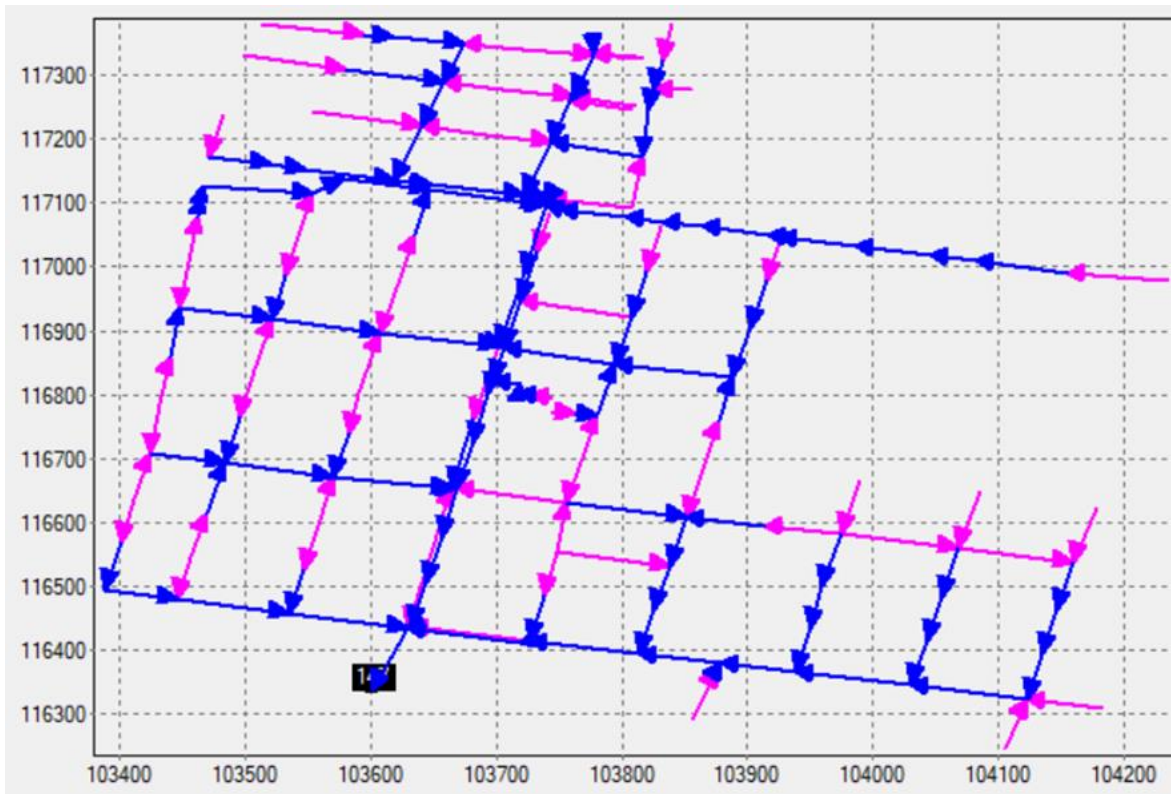


**Figura 31.- Regresión lineal de los costos por metro lineal de las tuberías continuas y su caudal de diseño en la red Cedritos 1, criterio 5**

Obtenida la regresión lineal y procesado los datos del diseño hidráulico del trazado inicial, es posible determinar los coeficientes  $c$ ,  $a$  y  $m$  de igual manera que la red de Chicó sur y como se detalla en la sección 3.4.3. Los coeficientes y parámetros usados para alimentar la función de costo en la elección del trazado se muestran a continuación:

- $c = \$529,965 \text{ COP/m}^3 \cdot \text{ml}$
- $a = \$16,450 \text{ COP/ml}$
- $S_c = 0.5\%$
- $S_i = 0.93\%$
- $d_{\text{promedio}} = 0.233 \text{ m}$
- Costo por metro lineal de las tuberías de inicio =  $\$13,745 \text{ COP/ml}$

Aplicando la Ecuación 19 propuesta en la metodología se define un nuevo trazado para la iteración 1. El trazado resultante es el siguiente:



*Figura 32.- Trazado resultante para la red Cedritos 1 en la iteración 1*

A la red anterior se realiza el diseño hidráulico óptimo y se la compara con el trazado inicial, teniendo:

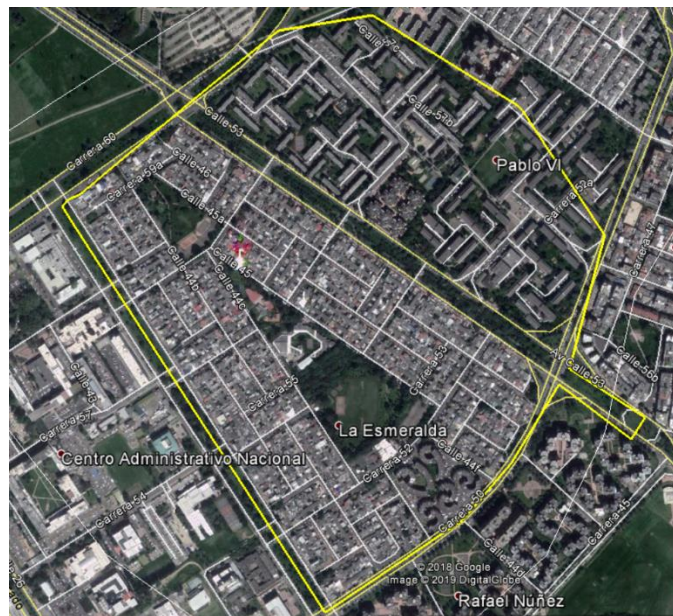
Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
<b>Criterio 5</b>	\$211,595,951.44	2.047	5.816	0.248	0.227	0.284	113	58
<b>Iter 1</b>	\$204,918,284.58	1.973	5.716	0.246	0.227	0.284	107	64

*Tabla 7.- Resultados del diseño hidráulico para el trazado inicial e iteración 1 de la red de Cedritos 1*

La red de la iteración 1 es menos costosa que el trazado inicial propuesto.

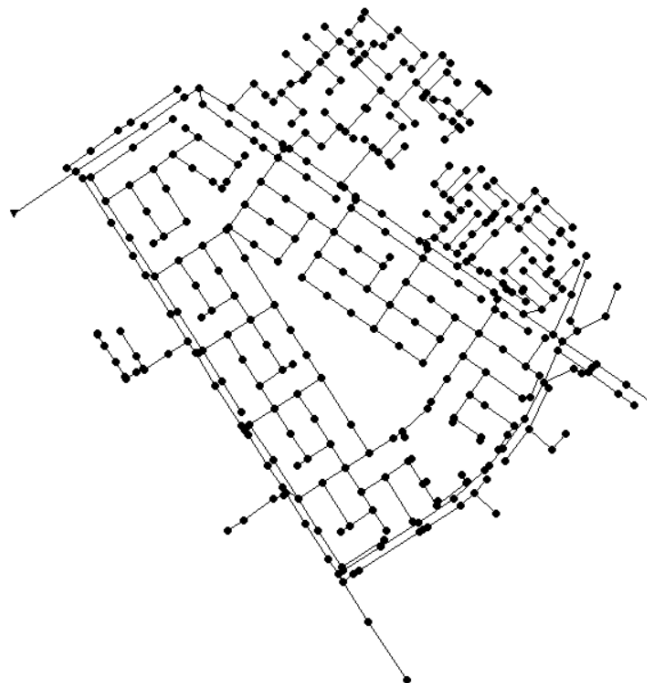
#### 4.1.3 Red Esmeralda

Esta red de alcantarillado pluvial está localizada en la ciudad de Bogotá y sirve a un área completamente residencial de 120 hectáreas aproximadamente. Su extensión va desde la calle 44 hasta la calle 58 y entre la carrera 50 y 60.



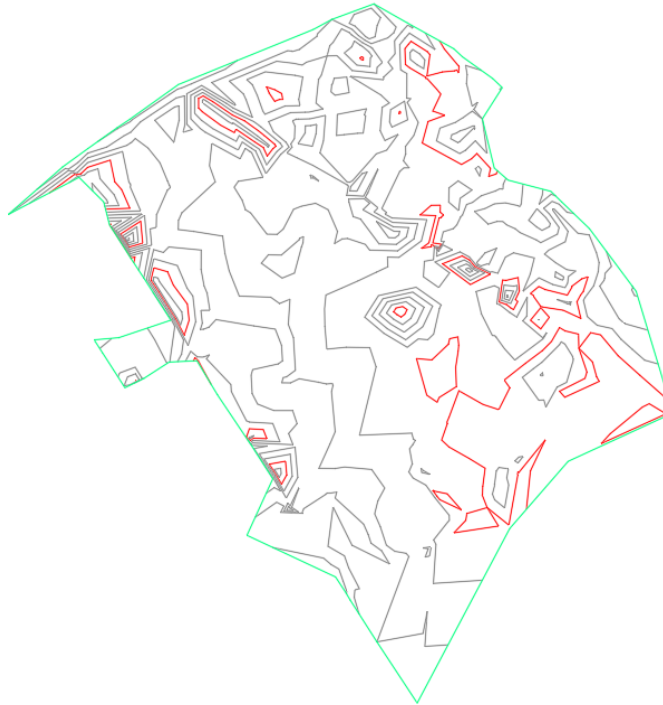
**Figura 33.- Ubicación de la Red Esmeralda**

El sistema está conformado por 384 pozos, 1 descarga y 413 tuberías que tienen una longitud promedio de 50 metros.



**Figura 34.- Ubicación de los pozos y tuberías de la red Esmeralda**

La topografía del terreno es plana con una diferencia de nivel de 1 metro entre la descarga y el pozo más lejano, sin embargo, la red cuenta con depresiones de hasta 1 metro a lo largo de toda la red. Los caudales de aportación de aguas lluvias a cada pozo fueron recogidos de la tesis de maestría de Rincón (2016) que son detallados junto a las coordenadas x, y y z de los pozos en los anexos.



*Figura 35.- Topografía del terreno de la red Esmeralda. Curvas de nivel principal (rojas) cada metro*

#### *4.1.3.1 Trazado inicial*

Para la red de Esmeralda se aplicaron 6 criterios para determinar el coeficiente  $m$ , eliminando los criterios 1, 2 y 4 que resultaron poco eficientes en las redes anteriores. El costo constructivo de las redes iniciales obtenidas por la metodología propuesta así como también las suposiciones y restricciones utilizadas se detallan a continuación:

- **Elección del trazado:** metodología desarrollada (6 criterios)
- **Ecuación de costo para el diseño hidráulico:** ecuación de Navarro.
- **Precisión en cota de manhole:** 10cm
- **Profundidad mínima:** 1.2m
- **Profundidad máxima:** 10m
- **Relación de llenado:** 0.7 ( $d < 0.6m$ ); 0.85 ( $d > 0.6m$ )
- **Velocidad máxima:** 5m/s
- **Velocidad mínima:** 0.45m/s

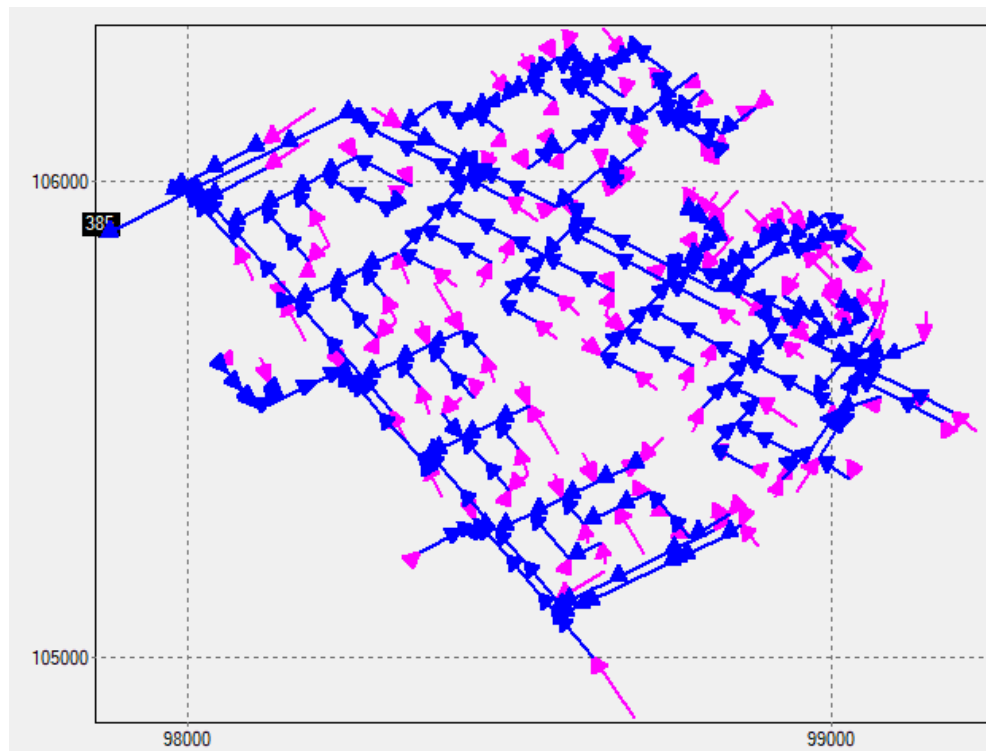
- **Ks:** 0.0000015 m
- **Diámetros comerciales:** {0.227, 0.284, 0.327, 0.362, 0.407, 0.452, 0.595, 0.670, 0.747, 0.824, 0.900, 0.978, 1.054, 1.18, 1.271, 1.363, 1.423, 1.586}

Los costos constructivos de cada red obtenida se muestran a continuación:

Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
Criterio 3	\$554,450,036.50	1.477	3.337	0.416	0.227	1.363	281	132
Criterio 5	\$540,885,111.83	1.467	3.337	0.406	0.227	1.363	280	133
<b>Criterio 6</b>	<b>\$540,715,706.26</b>	<b>1.469</b>	<b>3.337</b>	<b>0.405</b>	<b>0.227</b>	<b>1.363</b>	<b>280</b>	<b>133</b>
Criterio 7	\$554,767,230.64	1.502	3.329	0.422	0.227	1.271	293	120
Criterio 8	\$592,179,605.10	1.562	4.029	0.424	0.227	1.271	296	117
Criterio 9	\$852,413,798.26	1.609	3.450	0.499	0.227	2.500	269	144

*Tabla 8.- Resultados del diseño hidráulico para los 6 criterios usados para determinar el trazado inicial de la red Esmeralda*

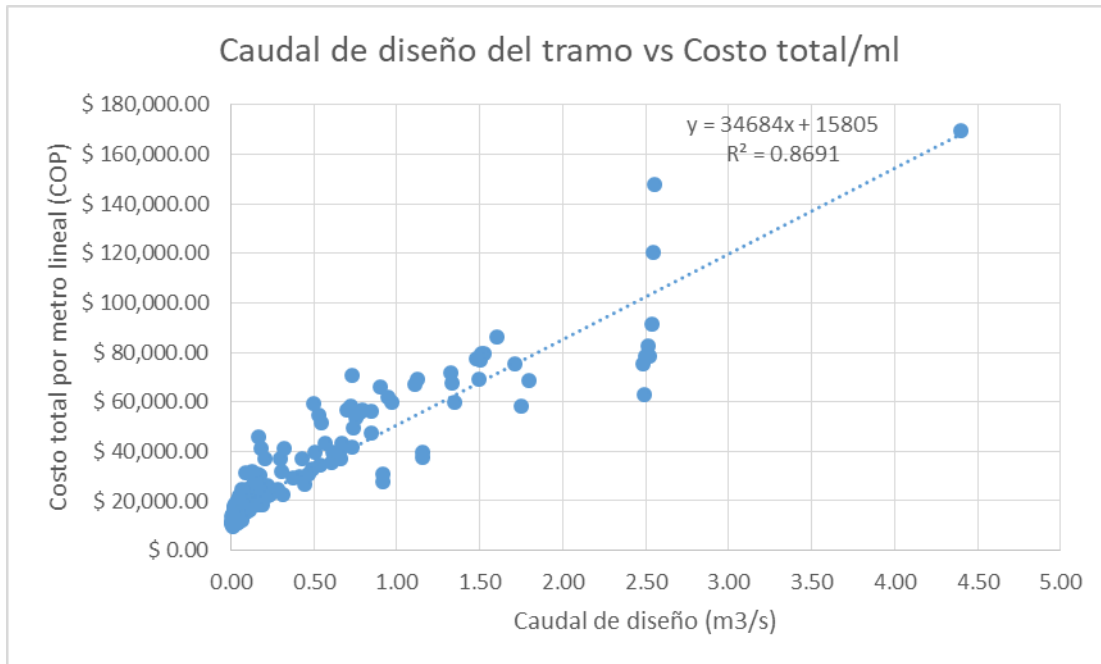
El mejor trazado inicial para la red Esmeralda fue obtenida utilizando el criterio 6, es decir, un trazado que priorice los tramos con mayor diferencia de nivel o energía. El trazado obtenido con el criterio antes descrito se muestra a continuación:



*Figura 36.- Trazado inicial para red Esmeralda utilizando el criterio 6. En magenta los tramos de inicio o arranque y en azul las continuas*

#### 4.1.3.2 Iteraciones

Se procede a graficar los costos por metro lineal de las tuberías continuas con su respectivo caudal de diseño para calcular la regresión lineal. Los resultados se muestran en la siguiente gráfica:



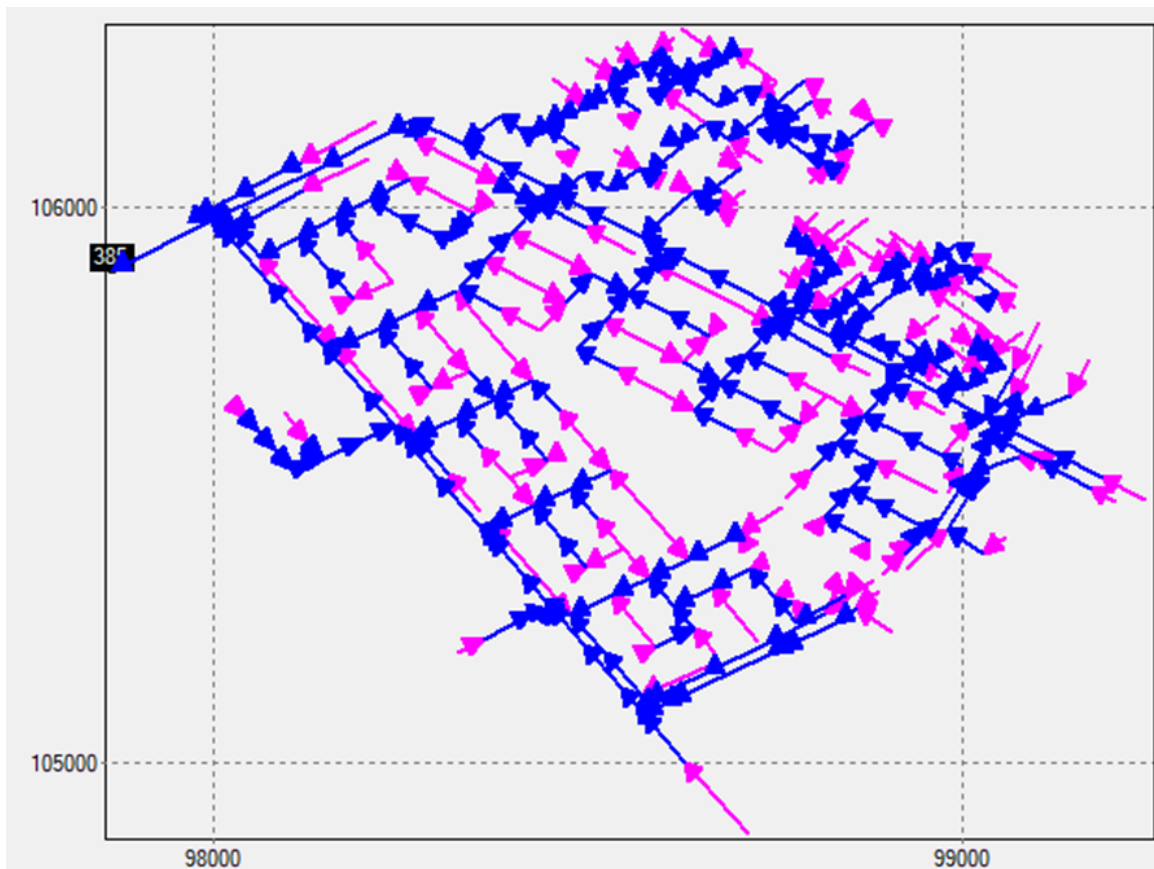
**Figura 37.- Regresión lineal de los costos por metro lineal de las tuberías continuas y su caudal de diseño en la red Esmeralda, criterio 6**

Se procesa los datos y se define el coeficiente  $m$  para todos los arcos posibles en el problema de la elección del trazado con los siguientes valores:

- $c = \$34,684 \text{ COP/m}^3 \cdot \text{ml}$
- $a = \$15,805 \text{ COP/ml}$
- $S_c = 0.35\%$
- $S_f = 0.46\%$
- $d_{\text{promedio}} = 0.492 \text{ m}$
- Costo por metro lineal de las tuberías de inicio =  $\$12,941 \text{ COP/ml}$

Aplicando la Ecuación 19 propuesta en la metodología se define un nuevo trazado para la iteración 1. El trazado resultante es el siguiente:





*Figura 38.- Trazado resultante para la red Esmeralda en la iteración 1*

A la red anterior se realiza el diseño hidráulico óptimo y se la compara con el trazado inicial, teniendo:

Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
<b>Criterio 6</b>	\$540,715,706.26	1.469	3.337	0.405	0.227	1.363	280	133
<b>Iter 1</b>	\$522,024,234.69	1.490	3.329	0.385	0.227	1.271	276	137

*Tabla 9.- Resultados del diseño hidráulico para el trazado inicial e iteración 1 de la red de Cedritos 1*

La red de la iteración 1 es menos costosa que el trazado inicial propuesto.

#### 4.1.4 Red Tumaco

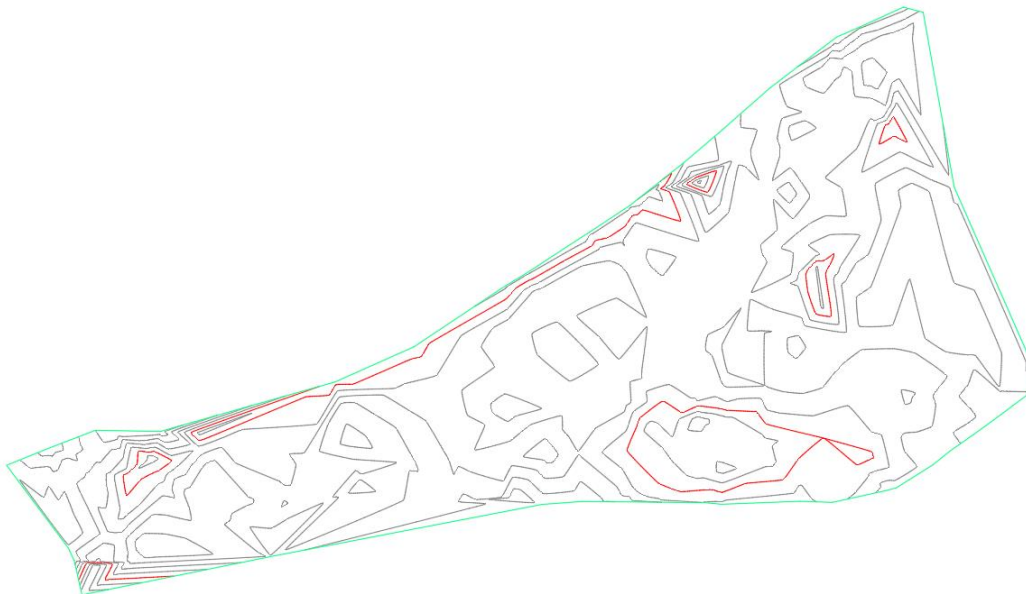
La red de Tumaco es una red de alcantarillado sanitario que a diferencia de las anteriores no es una red construida sino que actualmente se encuentra en proceso de diseño en el municipio de Tumaco. Su ubicación se encuentra en el sureste de Colombia en el departamento de Nariño a orillas del océano

Pacífico y constituye la totalidad de la denominada isla Tumaco con una extensión aproximada de 194 hectáreas.



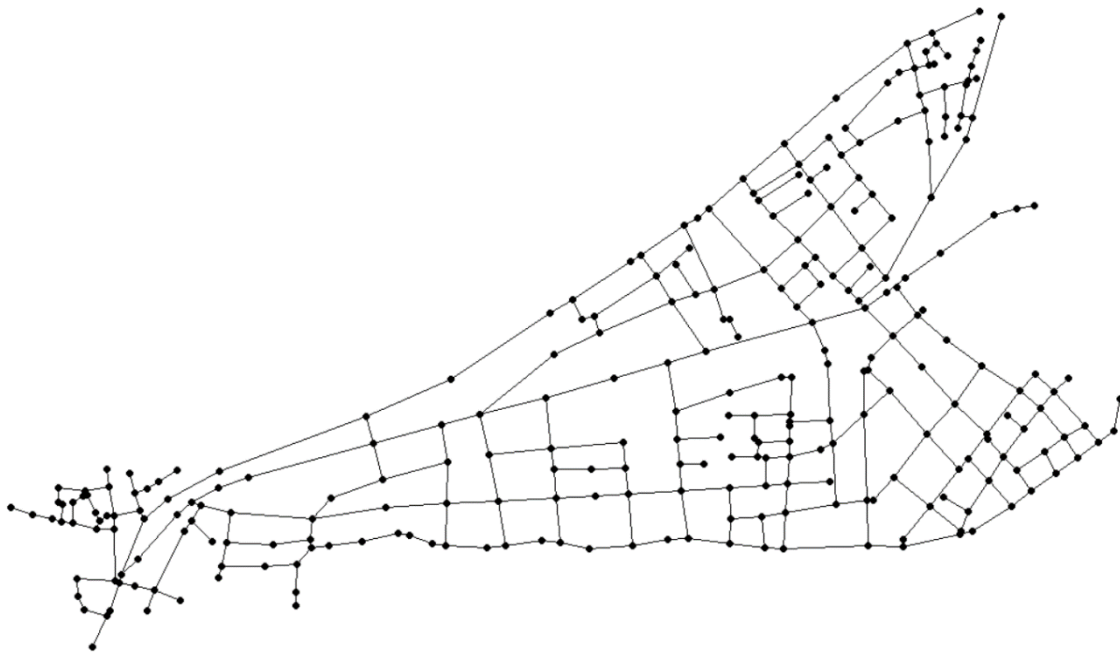
*Figura 39.- Ubicación de la red Tumaco*

La ubicación de los posibles pozos y tramos fueron determinados en base a un prediseño que fue facilitado por la empresa consultora a cargo del proyecto para fines investigativos. La red fue escogida debido a que se trata de un problema real, siendo la topografía del terreno muy plana por ser una isla. La topografía se detalla a continuación:



*Figura 40.- Topografía del terreno de la red Tumaco. Curvas de nivel principal (rojas) cada metro*

La descarga final de la red será una estación de bombeo ubicada en la parte inferior izquierda de la red que curiosamente es la parte más alta del sistema, estando a 1 metro encima del pozo más lejano ubicado en la parte superior derecha. Asimismo, a pesar de que la topografía es muy plana, la caída natural mínima del terreno de la isla es desde el centro a las orillas de esta. Por todas las particulares descritas anteriormente, la red constituye un buen desafío para probar la metodología propuesta. En los anexos se adjunta la topología, topografía y caudal de aguas residuales de entrada a cada pozo, con un total de 278 pozos, 1 descarga, 351 tramos con una longitud promedio de 68 metros y un caudal de salida de  $0.725 \text{ m}^3/\text{s}$ .



*Figura 41.- Ubicación de pozos y tramos en la red Tumaco*

#### *4.1.4.1 Trazado inicial*

Para obtener los trazados iniciales de la red de Tumaco se aplicaron los 7 primeros criterios desarrollados en la metodología explicada en la sección 3.4.4, excluyendo los criterios 8 y 9 debido a la poca eficiencia que han mostrado en las redes anteriores. Al igual que la red Cedritos 1, se aplicó la metodología de Duque (2015) para comparar la eficiencia de los trazados iniciales obtenidos. Las suposiciones y restricciones de diseño usadas se muestran a continuación:

- **Elección del trazado:** metodología desarrollada (7 criterios), metodología de Duque (2015)
- **Ecuación de costo para el diseño hidráulico:** ecuación de Navarro.
- **Precisión en cota de manhole:** 10cm
- **Profundidad mínima:** 1.2m
- **Profundidad máxima:** 10m

- **Relación de llenado:** 0.7 ( $d < 0.6\text{m}$ ); 0.85 ( $d > 0.6\text{m}$ )
- **Velocidad máxima:** 5m/s
- **Velocidad mínima:** 0.45m/s
- **Ks:** 0.0000015 m
- **Diámetros comerciales:** {0.227, 0.284, 0.327, 0.362, 0.407, 0.452, 0.595, 0.670, 0.747, 0.824, 0.900, 0.978, 1.054, 1.18, 1.271, 1.363, 1.423, 1.586}
- **Iteraciones para metodología de Duque (2015):** 30

Los costos constructivos de cada red obtenida se muestran a continuación:

Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
<b>Criterio 1</b>	\$710,889,698.65	2.017	8.026	0.339	0.227	0.824	216	135
<b>Criterio 2</b>	\$760,324,151.38	2.107	8.453	0.350	0.227	0.747	217	134
<b>Criterio 3</b>	\$834,539,218.46	2.151	8.626	0.367	0.227	0.824	221	130
<b>Criterio 5</b>	\$673,146,008.30	1.971	8.126	0.326	0.227	0.824	217	134
<b>Criterio 6</b>	\$704,946,286.24	1.940	7.826	0.339	0.227	0.824	218	133
<b>Criterio 7</b>	\$640,993,887.82	2.103	7.555	0.315	0.227	0.670	227	124
<b>Menor costo metodología Duque (2015)</b>	\$583,112,867.38	1.844	5.726	0.309	0.227	0.824	223	128

**Tabla 10.- Resultados del diseño hidráulico para los 7 criterios usados para determinar el trazado inicial de la red Tumaco y los resultados obtenidos con la metodología de Duque (2015)**

Para la red Tumaco, el criterio que mejor se ajustó fue el 7, el cual minimiza la longitud de los tramos principales al punto de descarga final, sin embargo, después de 30 iteraciones la metodología de Duque (2015) obtuvo un costo menor al mejor trazado inicial.

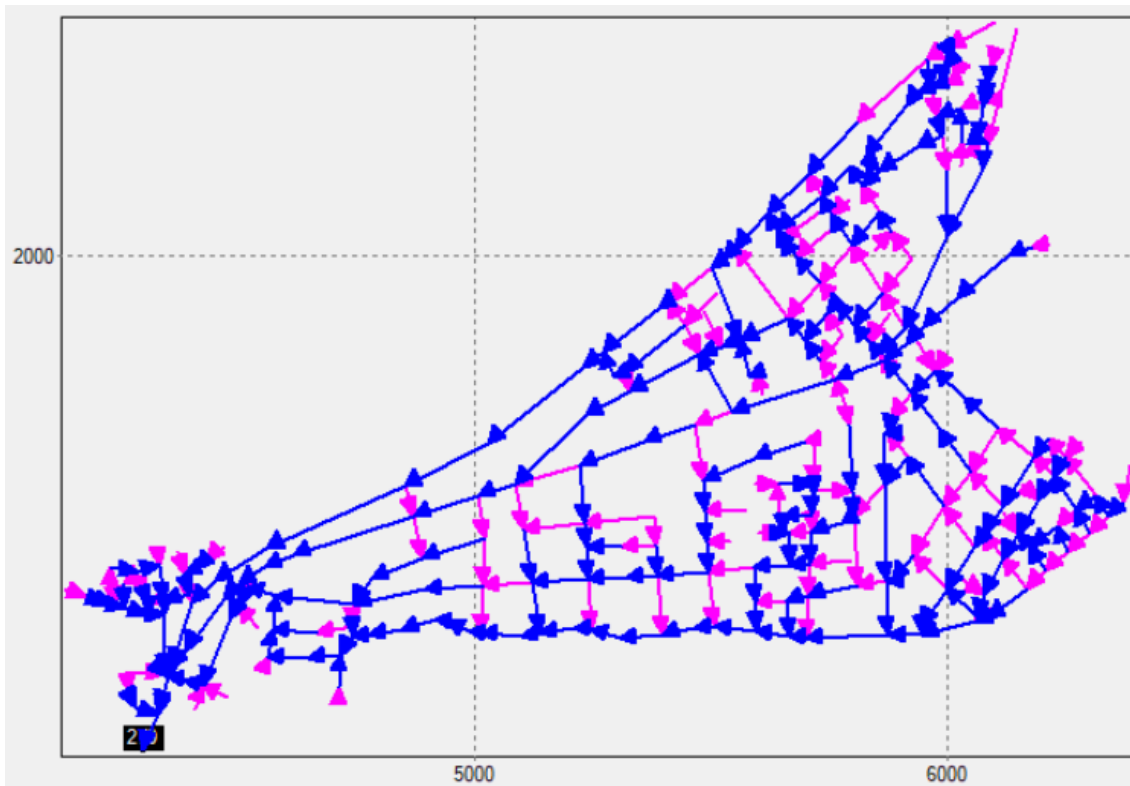
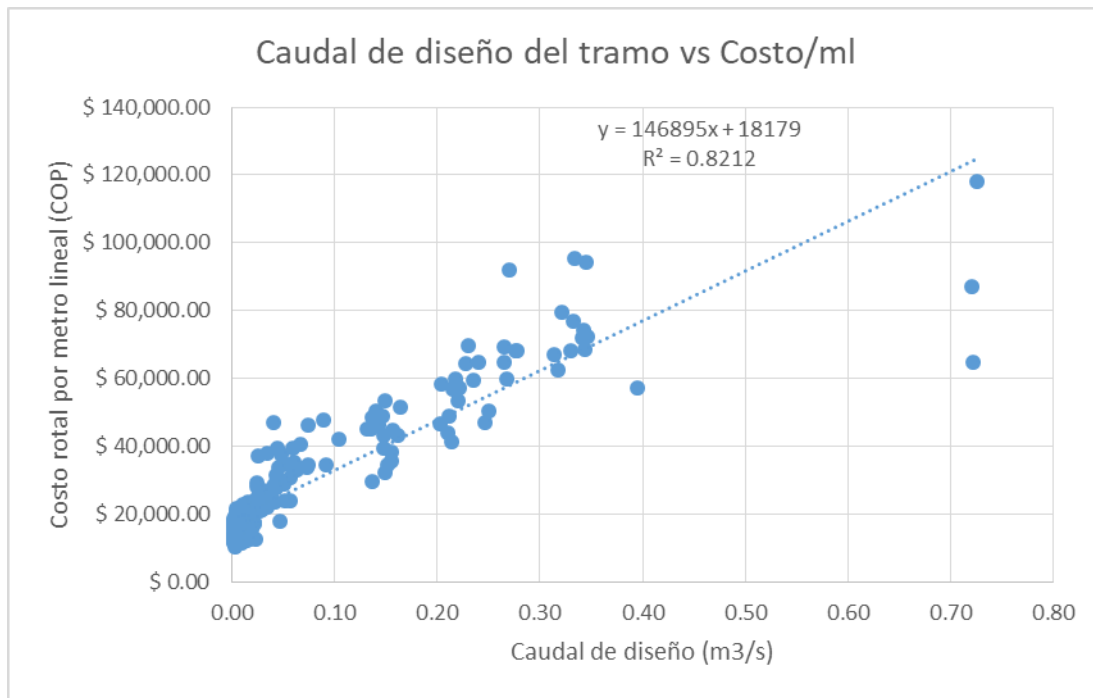


Figura 42.- Trazado inicial para red Tumaco utilizando el criterio 7. En magenta los tramos de inicio o arranque y en azul las continuas

#### 4.1.4.2 Iteraciones

La metodología propuesta elige el mejor trazado inicial para determinar los coeficientes  $c$ ,  $a$  y  $m$ , y a pesar de que la metodología de Duque (2015) resultó en menores costos, se utiliza la red diseñada con el trazado del criterio 7 para la regresión lineal de costos. Los resultados se muestran en la siguiente gráfica:

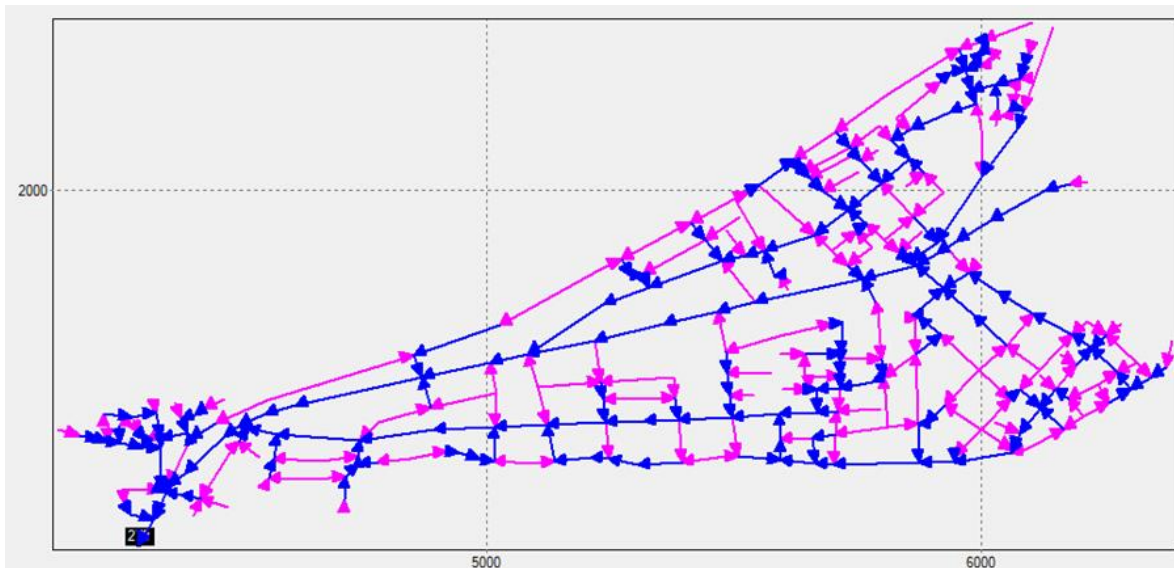


**Figura 43.- Regresión lineal de los costos por metro lineal de las tuberías continuas y su caudal de diseño en la red Tumaco, criterio 7**

Se procesa los datos y se define el coeficiente  $m$  para todos los arcos posibles en el problema de la elección del trazado con los siguientes valores:

- $c = \$146,895 \text{ COP/m}^3 \cdot \text{ml}$
- $a = \$18,179 \text{ COP/ml}$
- $S_c = 0.24\%$
- $S_l = 0.44\%$
- $d_{\text{promedio}} = 0.357 \text{ m}$
- Costo por metro lineal de las tuberías de inicio =  $\$13,859 \text{ COP/ml}$

Aplicando la Ecuación 19 propuesta en la metodología se define un nuevo trazado para la iteración 1. El trazado resultante es el siguiente:



**Figura 44.- Trazado resultante para la red Tumaco en la iteración 1**

A la red anterior se realiza el diseño hidráulico óptimo y se la compara con el trazado inicial y el resultado obtenido con la metodología de Duque (2015), teniendo:

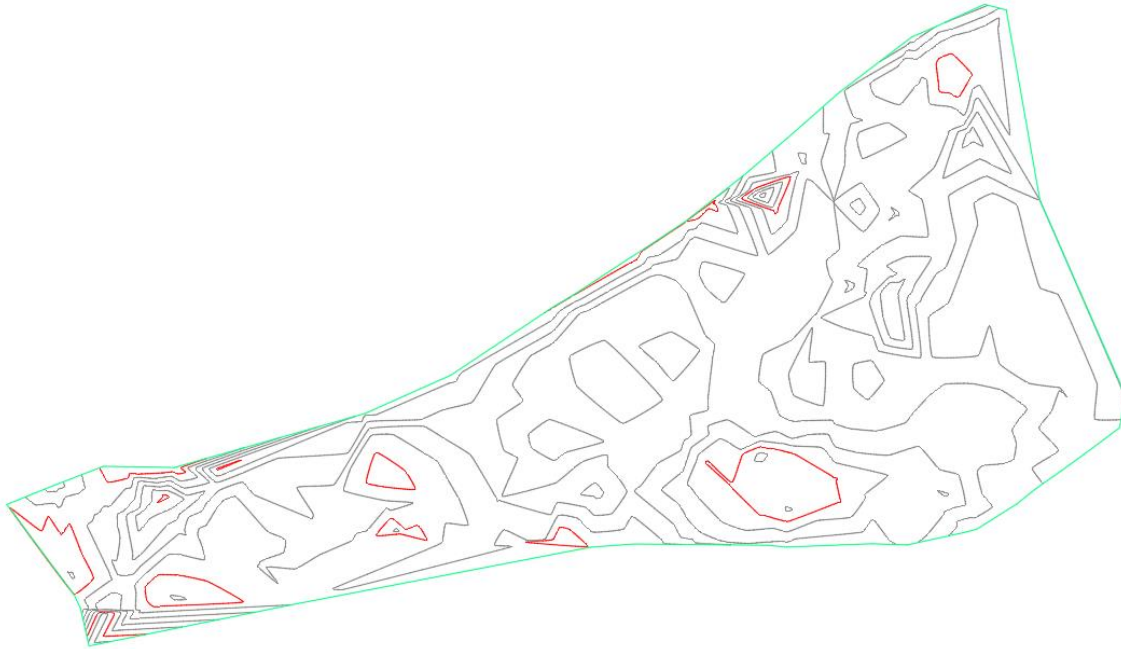
Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
<b>Criterio 7</b>	\$640,993,887.82	2.103	7.555	0.315	0.227	0.670	227	124
<b>Iter 1</b>	\$567,921,929.18	1.799	5.880	0.310	0.227	0.747	195	156
<b>Menor costo metodología Duque (2015)</b>	\$583,112,867.38	1.844	5.726	0.309	0.227	0.824	223	128

**Tabla 11.- Resultados del diseño hidráulico para el trazado inicial, iteración 1 y metodología Duque (2015) de la red Tumaco**

La red de la iteración 1 es menos costosa que el trazado inicial propuesto y el mejor resultado encontrado después de 30 iteraciones con la metodología original Duque (2015).

#### 4.1.5 Red Tumaco modificada

Con los resultados encontrado en la red de Tumaco se decidió modificar la topografía del terreno de tal manera que se mantenga plana pero que la isla drene hacia el centro de esta y el punto más bajo de la red sea la descarga final, en otras palabras, proponer una topografía espejo a la original. El cambio fue motivado por la baja eficiencia de los criterios 1 al 6 en la red original y que venían teniendo un buen resultado en las redes anteriores. La topografía del terreno modificada se muestra a continuación:



*Figura 45.-Topografía del terreno de la red Tumaco modificada. Curvas de nivel principal (rojas) cada metro*

#### **4.1.5.1 Trazado inicial**

Se utilizó las mismas suposiciones y restricciones de diseño que la red Tumaco original y que se detallan a continuación:

- **Elección del trazado:** metodología desarrollada (7 criterios), metodología de Duque (2015)
- **Ecuación de costo para el diseño hidráulico:** ecuación de Navarro.
- **Precisión en cota de manhole:** 10cm
- **Profundidad mínima:** 1.2m
- **Profundidad máxima:** 10m
- **Relación de llenado:** 0.7 ( $d < 0.6m$ ); 0.85 ( $d > 0.6m$ )
- **Velocidad máxima:** 5m/s
- **Velocidad mínima:** 0.45m/s
- **Ks:** 0.0000015 m
- **Diámetros comerciales:** {0.227, 0.284, 0.327, 0.362, 0.407, 0.452, 0.595, 0.670, 0.747, 0.824, 0.900, 0.978, 1.054, 1.18, 1.271, 1.363, 1.423, 1.586}
- **Iteraciones para metodología de Duque (2015):** 30

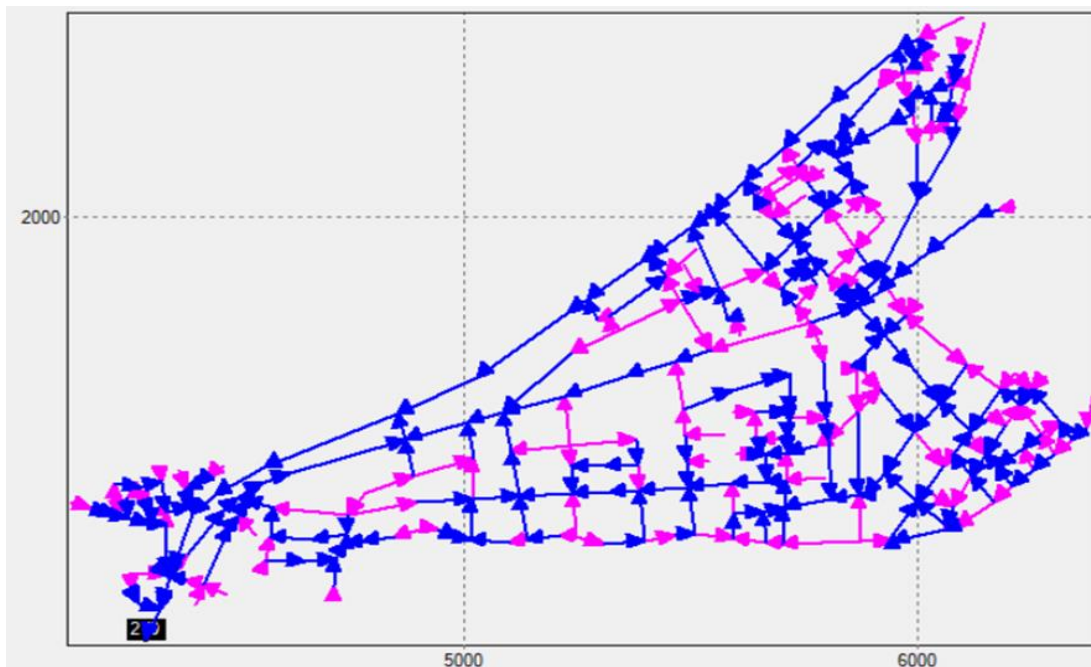
Los costos constructivos de cada red obtenida se muestran a continuación:



Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
Criterio 1	\$661,170,277.88	1.929	6.803	0.333	0.227	0.747	219	132
Criterio 2	\$589,571,086.98	1.807	5.553	0.315	0.227	0.747	216	135
Criterio 3	\$579,953,680.82	1.786	5.553	0.312	0.227	0.747	221	130
Criterio 5	\$571,018,654.91	1.748	5.403	0.315	0.227	0.747	215	136
<b>Criterio 6</b>	<b>\$559,309,102.10</b>	<b>1.729</b>	<b>5.353</b>	<b>0.311</b>	<b>0.227</b>	<b>0.747</b>	<b>220</b>	<b>131</b>
Criterio 7	\$619,808,220.40	2.039	5.205	0.313	0.227	0.670	227	124
Criterio 8	\$642,887,140.73	2.028	6.403	0.325	0.227	0.747	233	118
Criterio 9	\$670,211,546.90	2.075	6.976	0.318	0.227	0.824	192	159
<b>Menor costo metodología Duque (2015)</b>	<b>\$567,323,739.69</b>	<b>1.913</b>	<b>6.443</b>	<b>0.304</b>	<b>0.227</b>	<b>0.747</b>	<b>219</b>	<b>132</b>

**Tabla 12.- Resultados del diseño hidráulico para los 7 criterios usados para determinar el trazado inicial de la red Tumaco modificada y los resultados obtenidos con la metodología de Duque (2015)**

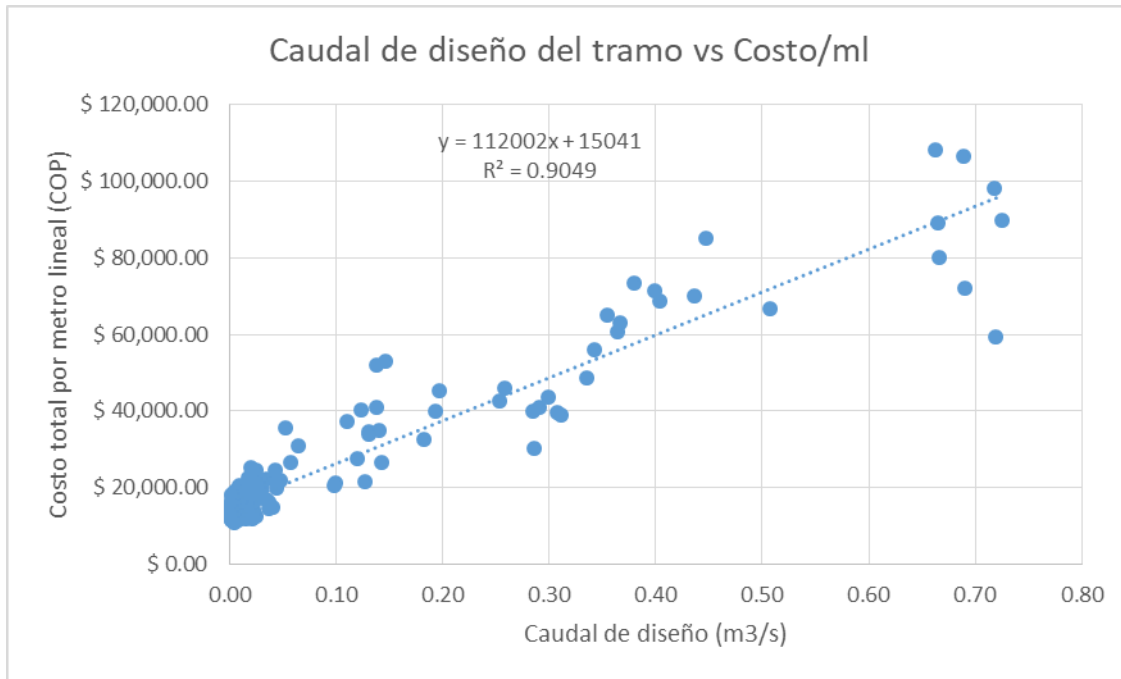
Bajo la condición de la nueva topografía, el mejor trazado obtenido fue con el criterio 6, es decir, donde los tramos con mayor diferencia de nivel o energía son priorizados y se maximiza el número de tuberías continuas. A diferencia de la red original, el trazado inicial obtenido con la metodología propuesta tuvo un menor costo al calculado después de 30 iteraciones con la metodología de Duque (2015). El trazado resultante con el criterio 6 es el siguiente:



**Figura 46.- Trazado inicial para red Tumaco modificada utilizando el criterio 6. En magenta los tramos de inicio arranque y en azul las continuas**

#### 4.1.5.2 Iteraciones

Se realiza la regresión lineal de los costos obtenidos para la red mostrada en la Figura 46. Resumiendo:

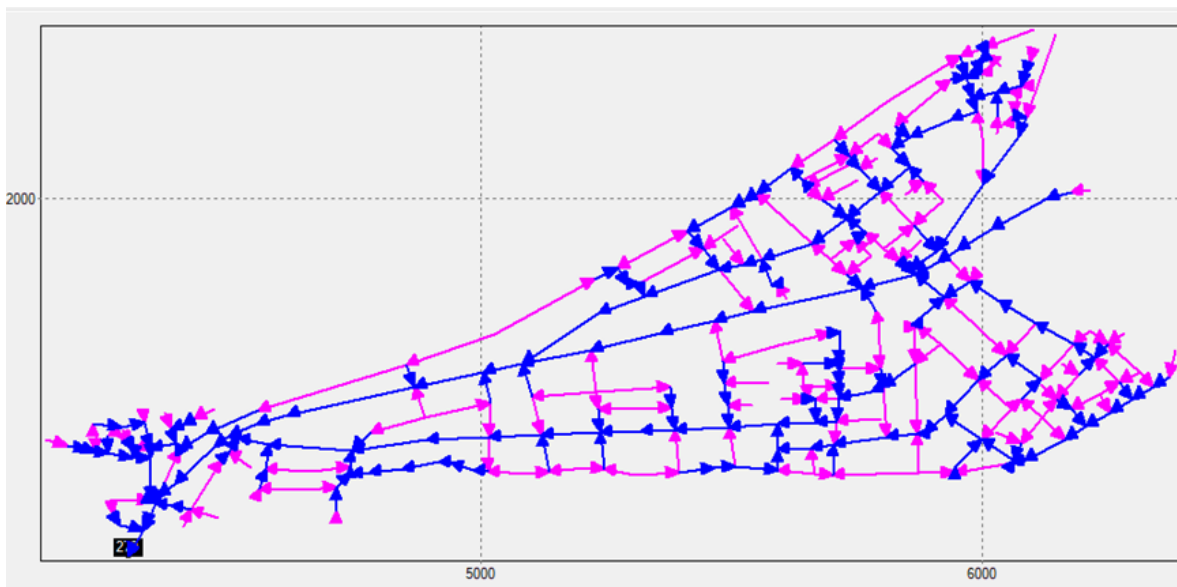


**Figura 47.- Regresión lineal de los costos por metro lineal de las tuberías continuas y su caudal de diseño en la red Tumaco, criterio 6**

Se procesa los datos y se define el coeficiente  $m$  para todos los arcos posibles en el problema de la elección del trazado con los siguientes valores:

- $c = \$112,002 \text{ COP/m}^3 \cdot \text{ml}$
- $a = \$15,041 \text{ COP/ml}$
- $S_c = 0.28\%$
- $S_l = 0.43\%$
- $d_{\text{promedio}} = 0.353 \text{ m}$
- Costo por metro lineal de las tuberías de inicio =  $\$13,606 \text{ COP/ml}$

Aplicando la Ecuación 19 propuesta en la metodología se define un nuevo trazado para la iteración 1. El trazado resultante es el siguiente:



*Figura 48.- Trazado resultante para la red Tumaco modificada en la iteración 1*

A la red anterior se realiza el diseño hidráulico óptimo y se la compara con el trazado inicial y el resultado obtenido con la metodología de Duque (2015), teniendo:

Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
<b>Criterio 6</b>	\$559,309,102.10	1.729	5.353	0.311	0.227	0.747	220	131
<b>iter 1</b>	\$553,197,347.11	1.779	4.880	0.305	0.227	0.670	202	149
<b>Menor costo metodología Duque (2015)</b>	\$567,323,739.69	1.913	6.443	0.304	0.227	0.747	219	132

*Tabla 13.- Resultados del diseño hidráulico para el trazado inicial, iteración 1 y metodología Duque (2015) de la red Tumaco modificada*

La red de la iteración 1 es menos costosa que el trazado inicial propuesto y el mejor resultado encontrado después de 30 iteraciones con la metodología original Duque (2015).

## 4.2 Comparación de la metodología exhaustiva de Duque (2015) para el diseño hidráulico con respecto al programa SewerGEMS

Este acápite es un paréntesis a la investigación realizada y busca cumplir uno de los objetivos específicos planteadas al inicio de la propuesta de tesis y es comparar los módulos de diseño hidráulico desarrollados en el CIACUA (UTOPIA) y en el programa comercial SewerGEMS. Como se expresó en la sección 3.3.3, la metodología planteada por Duque (2015) es exhaustiva al analizar todas las combinaciones de diámetros y pendiente factibles en las series de la red, eligiendo el camino de menor costo en función de la ecuación utilizada. Por su parte, SewerGEMS no especifica cómo abarca el problema o clase de programación que usa, sin embargo, sostiene que “el algoritmo de diseño trata de minimizar la excavación, la cual es típicamente la parte más cara en el proceso de instalación de tuberías y estructuras de drenaje urbano” (Bentley, 2017, p. 406).

Para comparar los resultados de cada programa se usará el caso de estudio Chicó sur y el trazado final obtenido con la metodología propuesta en esta investigación después de 1 iteración (Figura 27), recordando que SewerGEMS sólo realiza el diseño hidráulico, es decir, el ingeniero debe proponer el trazado del sistema. Asimismo, se usará la ecuación de Navarro para determinar los costos constructivos aproximados y la precisión usada con la metodología de Duque (2015) se incrementará al centímetro para una mayor exactitud en los resultados. En resumen, las suposiciones y restricciones usadas en cada programa son:

- **Trazado:** iteración 1, metodología propuesta.
- **Diseño hidráulico:** ecuación de Navarro.
- **Δh:** 1cm
- **Ecuación de fricción:** Darcy Weisbach y Colebrook White.
- **Profundidad mínima:** 1.2m
- **Profundidad máxima:** 5 metros
- **Relación de llenado:** 0.7 ( $d < 0.6m$ ); 0.85 ( $d > 0.6m$ )
- **Velocidad máxima:** 5 m/s
- **Velocidad mínima:** 0.45 m/s
- **Ks:** 0.0000015 m
- **Diámetros comerciales:** {0.227, 0.284, 0.327, 0.362, 0.407, 0.452, 0.595, 0.670, 0.747, 0.824, 0.900, 0.978, 1.054, 1.18, 1.271, 1.363, 1.423, 1.586}

Se procedió a ingresar el trazado en el programa SewerGEMS y se realizó el diseño óptimo, obteniendo los siguientes resultados:

Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
Duque (2015)	\$283,412,470.04	1.257	2.135	0.299	0.227	0.824	103	57
Sewergems	\$315,004,095.06	1.284	1.768	0.332	0.227	1.271	103	57

*Tabla 14.- Resultados del diseño hidráulico obtenido con el programa UTOPIA y SewerGEMS*

A continuación se presenta gráficamente los resultados:

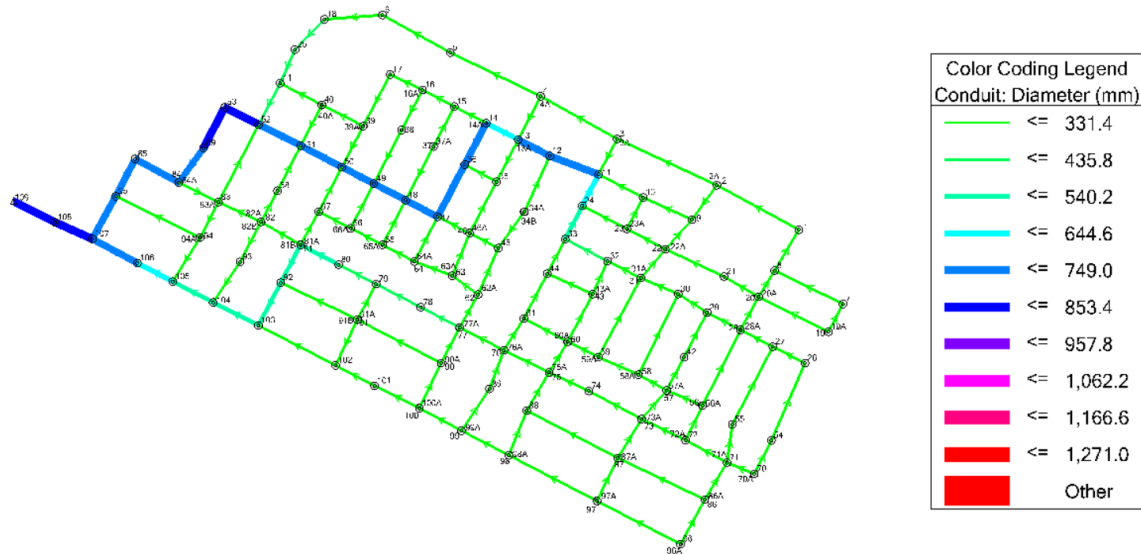


Figura 49.- Distribución de diámetros para el diseño obtenido con el programa UTOPIA en la red Chicó sur

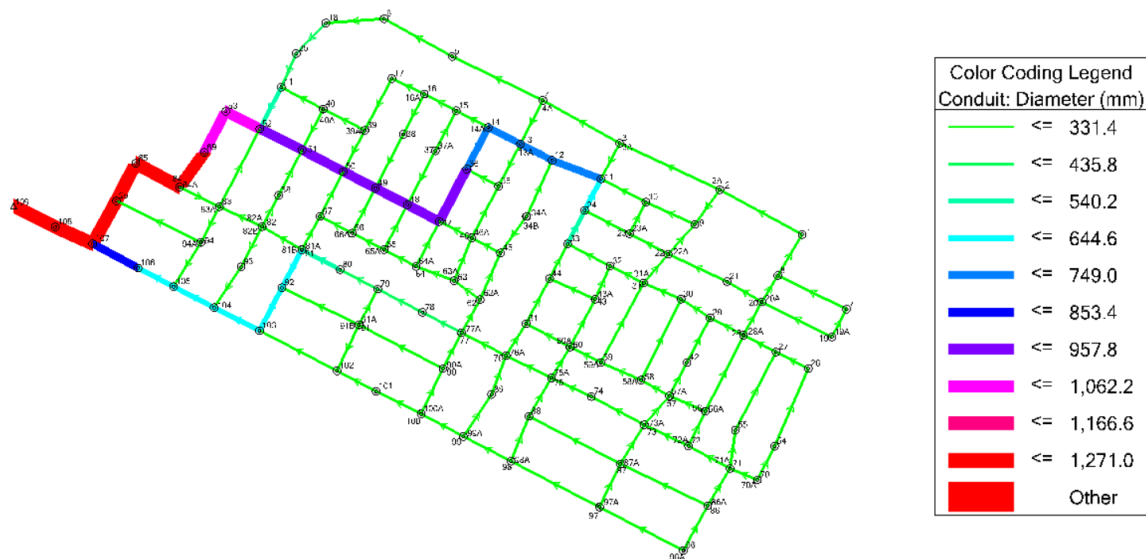
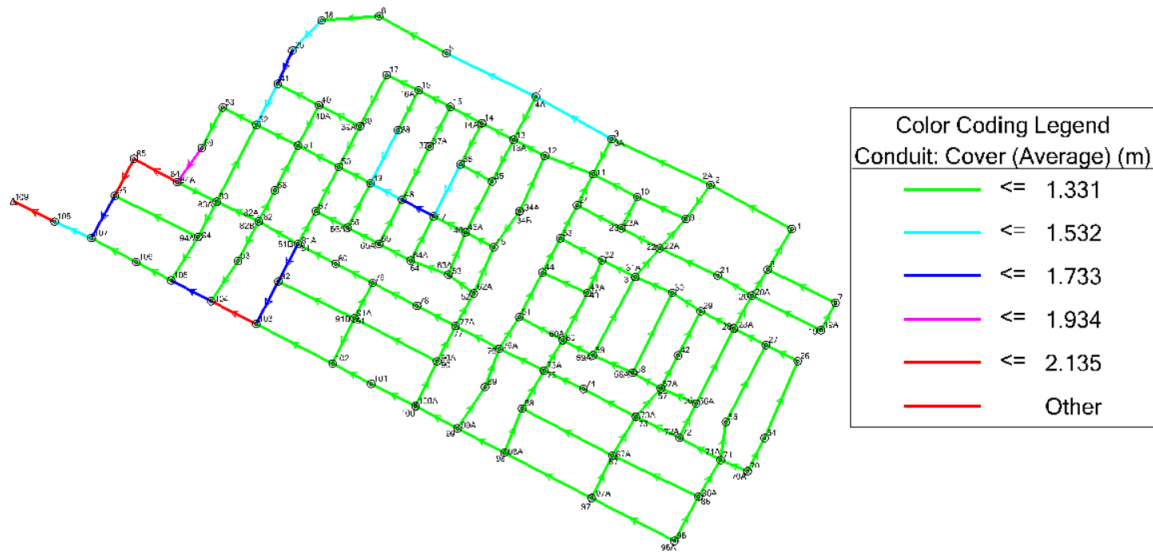
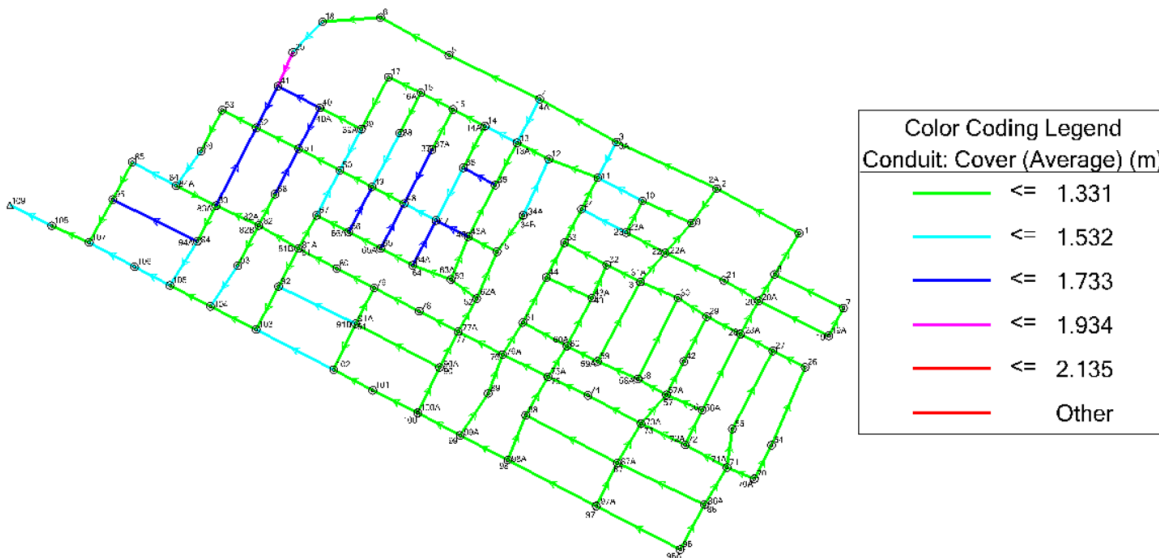


Figura 50.- Distribución de diámetros para el diseño obtenido con el programa SewerGEMS en la red Chicó sur



**Figura 51.- Cobertura promedio del diseño obtenido con el programa UTOPIA en la red Chicó sur**



**Figura 52.- Cobertura promedio del diseño obtenido con el programa SewerGEMS en la red Chicó sur**

Como se observa en la Tabla 14, el diseño obtenido con UTOPIA es menor que SewerGEMS disminuyendo incluso la profundidad promedio de excavación, variable que es la más importante en el algoritmo usado en SewerGEMS. Con respecto al diámetro de las tuberías, UTOPIA optimiza de mejor manera que SewerGEMS sin dejar de cumplir con las restricciones planteadas.

### 4.3 Desarrollo de costos en iteraciones posteriores

Como se observó en la sección 4.1, la metodología propuesta fue aplicada para los 5 casos de estudios mostrados y donde sólo se aplicó la ecuación de costos de la elección del trazado en una iteración. La hipótesis inicial supone que aplicar la ecuación propuesta permitirá saber si el trazado inicial puede ser mejorado o no, y si es mejorado el método converge rápidamente siendo necesaria 2 o 3 iteraciones, solamente. En el presente acápite se mostrará el desarrollo de costos para las demás iteraciones en la red Chicó sur. Aplicando la metodología propuesta para más de una iteración se tiene los siguientes resultados:

Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
<b>Criterio 3</b>	\$297,743,813.40	1.327	2.528	0.303	0.227	0.900	104	56
<b>Iter 1</b>	\$293,613,930.36	1.324	2.205	0.302	0.227	0.824	103	57
<b>Iter 2</b>	\$294,138,080.17	1.309	2.205	0.307	0.227	0.824	102	58
<b>Iter 3</b>	\$294,138,080.17	1.309	2.205	0.307	0.227	0.824	102	58

*Tabla 15.- Desarrollo de costos en las iteraciones para la metodología propuesta en la red Chicó sur*

El costo aumentó en la iteración 2 con respecto a la primera pero con mínimo cambio lo que produjo una convergencia de la metodología después de la segunda iteración.

## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Análisis general

Los casos de estudio propuestos en el capítulo 4 abarcaron un gran número de alternativas y variaciones que se pueden presentar en un problema de diseño de un sistema de drenaje urbano, teniendo redes de diferentes tamaños como la red de Cedritos 1 que es pequeña o como la red de Tumaco casi 3 veces más grande en extensión que esta última. Asimismo, la variación topológica de las redes propuestas constituyó un buen desafío para probar la metodología, ya que redes como Esmeralda combinaban circuitos cerrados y abiertos para la elección del trazado con longitudes de tramos tan pequeñas como 6 metros hasta tramos de 180 metros; la red Tumaco, por ejemplo, tiene una disposición planimétrica de tramos muy irregular producto del desorden urbanístico presente en la isla y cuya solución para el sistema de drenaje urbano tenía que adaptarse a esas dificultades; por último, la red de Cedritos 1 y Chicó sur son redes más regulares y ordenadas donde se destaca una disposición ortogonal de las tuberías.

La topografía natural del terreno de los casos de estudio constituyó otra variación importante que permitió un análisis exhaustivo de la metodología presentada. Por una parte, la red de Chicó sur fue la única presentada con una topografía ondulada y accidentada, y permitió establecer el punto de arranque para la propuesta de investigación ya que se evidenció que para esta red la función de costo para la elección del trazado propuesta por Duque (2015) no representaba correctamente los costos constructivos del diseño hidráulico. Por otra parte, las otras 4 redes presentadas tienen una topografía plana debido a que la diferencia de nivel entre la descarga y el pozo más alejado es muy pequeña a pesar de que en su interior puedan existir elevaciones o depresiones que superen el metro de desnivel, y constituyen desafíos reales para los diseñadores de redes de drenaje urbano a diferencia de redes planas teóricas presentadas en la literatura técnica, en donde todos los pozos se encuentran en la misma cota, lo cual podría carecer de pertinencia para probar una metodología.

En términos de variación de caudal de aportación, las redes presentadas también abarcan la mayoría de escenarios que un ingeniero pueda enfrentar, teniendo dos redes de alcantarillado pluvial y tres de alcantarillado sanitario. Para las redes de alcantarillado pluvial, la red de Chicó sur y Esmeralda representan dos sistemas con diferentes áreas de aportación, uso de suelo e intensidad de lluvia, por lo tanto, la variación de caudal se evidencia en el flujo de descarga final calculadas en 1.52 m<sup>3</sup>/s para Chicó sur y 4.40 m<sup>3</sup>/s para Esmeralda. En cuanto a las redes de alcantarillado sanitario, Cedritos 1 y Tumaco se diferencian por la densidad de vivienda, así para Cedritos 1 se tiene una aportación de aguas residual de 1.06 l/has, mientras que para Tumaco 3,73 l/has. En conclusión, el análisis de la metodología propuesta se realiza con redes que poseen características diferentes, en vez de utilizar una sola red y variar los datos de entrada como caudal, topografía, densidad de vivienda, etc.

Para el trazado inicial, la metodología proponía utilizar 9 diferentes criterios que recogen los datos conocidos en el inicio del proceso de diseño como son la topología de la red y la topografía del terreno, excluyendo al caudal de entrada a los pozos que es otra variable que se pudo utilizar. Estos criterios, en primera instancia, fueron divididos en aquellos que se pensaban iban a hacer más



eficientes para zonas planas y otros para redes con topografía ondulada o accidentada, sin embargo, los criterios que tomaban en cuenta la topografía del terreno resultaron más eficientes incluso cuando la red era plana, teniendo como excepción la red Tumaco en donde el criterio 7 fue el mejor resultado. Lo anterior implica que, indiferente de la topografía, un trazado que aproveche la pendiente o energía favorable del terreno reflejará en menores costos constructivos porque se optimiza el diámetro y la profundidad de excavación de las tuberías. De manera general, se puede concluir que el criterio 6, el cual prioriza los tramos de mayor energía o diferencia de nivel, resultó el más eficiente de todos siendo el mejor en la red de Esmeralda, Tumaco modificado y muy cercano en la red Chicó sur; otros que se destacaron fueron el criterio 3 y 5.

Es importante agregar que la eficiencia de los criterios nombrados en el párrafo anterior depende de la correcta y lógica distribución de las tuberías con la topografía del terreno, es decir, que la descarga final se ubique en el punto más bajo de la red y que el drenaje natural del terreno, por más mínimo que sea, se ajuste a la ubicación de esa descarga. Lo anterior no se cumple en la red Tumaco, donde la descarga final, por razones operacionales, se ubicaba en el punto más alto de la red y los tramos apuntaban hacia las orillas de la isla y luego se dirigían a la descarga final, lo que aumentaba la longitud total de los tramos principales para llegar al punto de descarga y, en consecuencia, aumentaba los costos al utilizar los criterios del 1 al 6. Por lo tanto, para la red Tumaco el criterio 7 resultó el más eficiente por minimizar la longitud total de los tramos principales hacia la descarga, mientras que cuando se modificó la topografía, el criterio 6 mostró la eficiencia que se observó en las otras redes de estudio.

Con respecto a la segunda parte de la metodología, las iteraciones, la propuesta plantea el uso del mejor trazado inicial obtenido cuyo costo constructivo después de realizar el diseño hidráulico servirá para determinar los coeficientes  $c$ ,  $a$  y  $m$  de la función de costo planteada en la Ecuación 19. El resumen de resultados para los trazados iniciales se detalla en la siguiente tabla:

Parámetro	Casos de estudio				
	Chicó sur	Cedritos 1	Esmeralda	Tumaco	Tumaco modificado
$S_c$ (%)	1.27	0.50	0.35	0.24	0.28
$S_I$ (%)	0.97	0.93	0.46	0.44	0.43
<b>Costo tubería de inicio por metro lineal (COP/ml)</b>	\$ 14,465	\$ 13,745	\$ 12,941	\$ 13,859	\$ 13,606
<b><math>c</math> (COP/m<sup>3</sup>*ml)</b>	\$ 30,005	\$ 529,965	\$ 34,684	\$ 146,895	\$ 112,002
<b><math>a</math> (COP/ml)</b>	\$ 14,282	\$ 16,450	\$ 15,805	\$ 18,179	\$ 15,041
<b>yn/d promedio (%)</b>	52%	21%	52%	37%	33%

*Tabla 16.- Resumen de resultados en los trazados iniciales de los casos de estudio*

La pendiente promedio de instalación de las tuberías continuas dependerá de la topografía del terreno en que se encuentre la red, así para Chico sur será mayor a las demás redes como se observa en la tabla de resultados. Igualmente, la pendiente de instalación de las tuberías de inicio dependerá de la topografía del terreno, pero para redes planas también dependerá de la magnitud del caudal, por

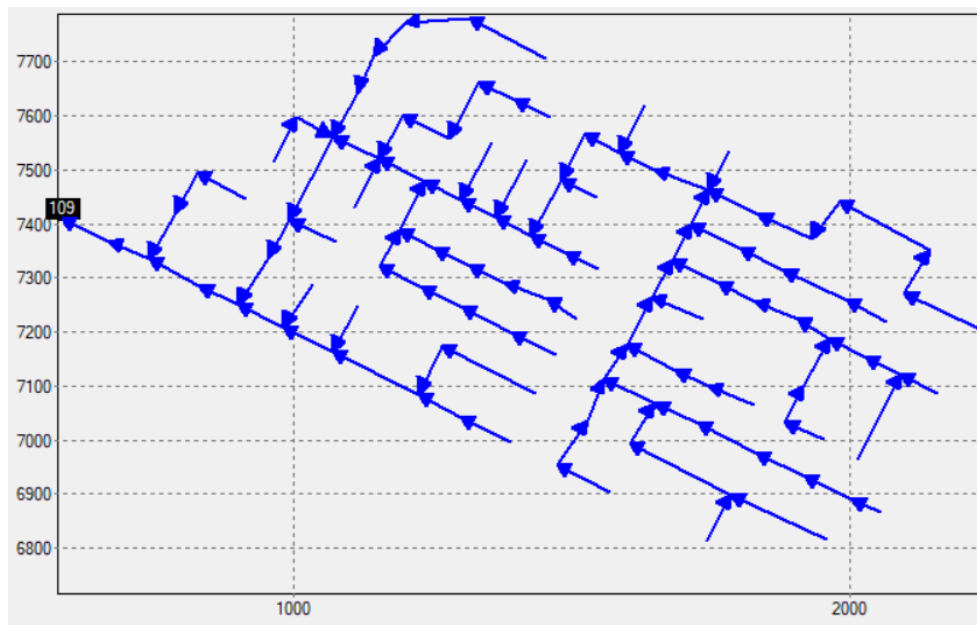
ejemplo, la red de Cedritos 1, cuyo caudal de aportación es la de menor magnitud de todos los casos de estudio, posee una pendiente promedio mayor para cumplir la restricción de velocidad mínima. Los costos constructivo promedio para los tramos de inicio tuvieron poca variación para todas las redes, y en general no hay diferencia apreciable en función de la magnitud del caudal, ya que la tubería de menor diámetro tiene la capacidad suficiente para transportar el caudal inicial de una serie de alcantarillado pluvial o sanitario. Dentro de una red, la variación de costos de los tramos inicial por metro lineal tuvo, también, poca variación debido a utilizar siempre el mismo diámetro y variando la profundidad de instalación pero siempre igual o muy cercano a la mínima establecida por norma, validando la metodología para reflejar el costo constructivo de un tramo de arranque en la función de costo de la elección del trazado a través del coeficiente  $m$ .

Las regresiones lineales de los costos por metro lineal de los tramos continuo y su caudal de diseño en cada red mostraron un coeficiente de ajuste de bondad aceptable, siendo el más bajo para la red Cedritos 1 con 0.711. Lo anterior permite reducir la incertidumbre para prever los costos por unidad de flujo en la elección del trazado, reflejados por el coeficiente  $c$  y  $a$  y que tuvieron el siguiente comportamiento: el coeficiente  $c$ , pendiente de la regresión lineal, tuvo una variación importante entre las redes y puede ser correlacionado con la relación de llenado promedio de las tuberías, es decir, entre mejor se aproveche la capacidad máxima de los tramos menor es el costo de transporte del caudal por el sistema y viceversa; y el coeficiente  $a$ , por el contrario, tuvo un comportamiento casi constante para todas las redes ya que representa el costo mínimo de un tramo continuo, en consecuencia, con excepción de Chicó sur este costo fue mayor que el de los tramos de inicio. Finalmente, explicados los coeficientes  $c$ ,  $a$  y  $m$  con los resultados del trazado inicial, la metodología pudo disminuir los costos constructivos de todos los casos de estudio.

## 5.2 Red Chicó sur

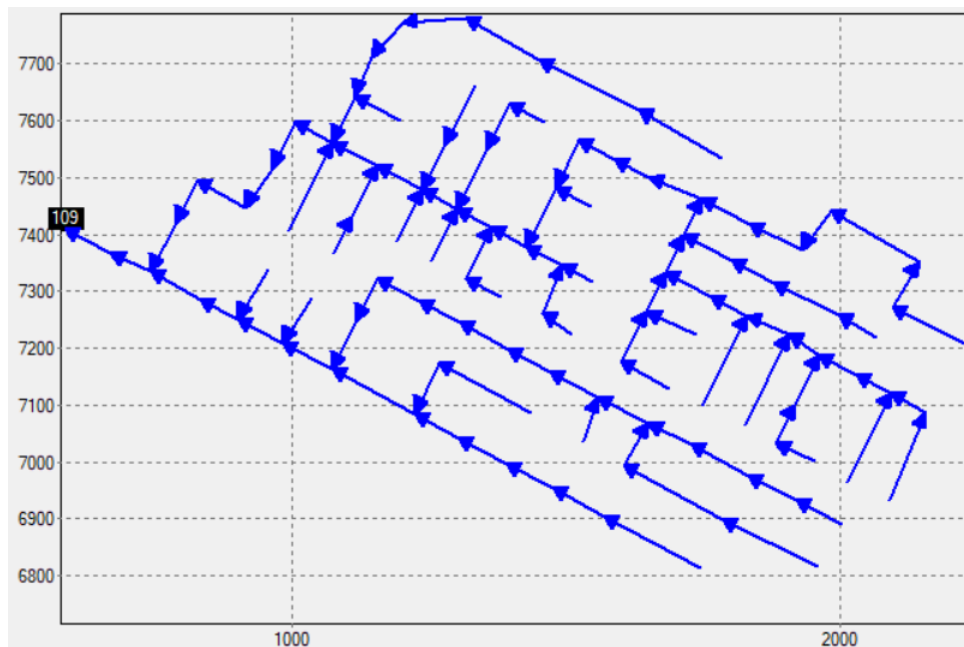
La red Chicó sur fue la única red con una topografía ondulada y representó el principal reto para la metodología propuesta, ya que agregar los datos de elevación de los pozos en la ecuación de costo de la elección del trazado permitiría que su aplicación fuera más general a cualquier tipo de red. Como se esperaba, los 6 primeros criterios para la elección del trazado inicial tuvieron un mejor desempeño que los 3 últimos, y en particular para esta red el criterio 3 y 6 fueron los mejores donde se priorizaba los tramos de mayor pendiente del terreno (criterio 3) o los tramos de mayor energía potencial disponible (criterio 6), además de maximizar el número de tuberías continuas. Lo anterior permite concluir que, en función del tipo de red y criterio que se utilice, definir el trazado para una red con topografía no plana varía en función de la información de entrada utilizada, pudiendo existir varias combinaciones, unas mejores que otras. Como resultado del trazado definido con estos criterios se pudo optimizar el diámetro de las tuberías, en consecuencia, su costo constructivo.

Si se elimina las tuberías de inicio y se deja las continuas en el trazado definido con el criterio 3 (Figura 53) se puede observar las series principales de la red y, por lo tanto, el camino del caudal por esta, destacando que casi todo el caudal es dirigido por una sola serie hasta el punto de descarga final, siempre tratando de seguir la topografía del terreno. Lo anterior responde a los datos que usa el coeficiente  $m$  en la Ecuación 21, donde no se toma en cuenta el caudal.



*Figura 53.- Tuberías continuas en el trazado inicial (criterio 3) para la red Chicó sur*

Al aplicar la función de costo propuesta para la elección del trazado en la primera iteración, en donde el caudal entra como variable, el trazado cambia y el caudal es conducido por dos series independientes, disminuyendo los costos al distribuir de mejor manera el caudal y esto se refleja en la disminución de diámetros y profundidades promedio obtenida en la iteración 1.



*Figura 54.- Tuberías continuas en el trazado de la iteración 1 para la red Chicó sur*

### 5.3 Red Cedritos 1

La red de alcantarillado de sanitario de Cedritos 1 está ubicada en una zona plana, por lo tanto, se esperaba que el criterio 7 e incluso la metodología original de Duque (2015) definieran el mejor trazado para esta red, sin embargo, el criterio 5 fue el que tuvo menor costo. La hipótesis inicial fue que a pesar de ser una red plana, los pequeños desniveles de la red permitían aprovechar la mínima energía disponible para definir una red que optimice el diámetro y profundidad de instalación de las tuberías. Para comprobar la hipótesis se cambió la topografía del terreno de Cedritos 1 de tal manera que todos los pozos tengan la misma cota de tapa, es decir, el valor del coeficiente  $m$  sería igual a 0 para los criterios del 1 al 6. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Escenario	Costo (Navarro) (COP)	Profundidad promedio (m)	Profundidad máxima (m)	Diámetro promedio (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	# de tuberías continuas	# de tuberías Inicio
Criterio 1-6	\$248,330,399.05	2.468	6.216	0.250	0.227	0.284	117	54
Criterio 7	\$217,242,094.03	2.142	4.116	0.249	0.227	0.284	122	49
Criterio 8	\$220,044,841.62	2.172	5.916	0.247	0.227	0.284	124	47
Criterio 9	\$225,821,719.88	2.148	6.223	0.254	0.227	0.327	101	70
ND	\$206,157,741.30	1.962	4.123	0.249	0.227	0.327	116	55

*Tabla 17.- Resultados para la red Cedritos 1 con topografía plana sin desnivel*

Para los criterios del 1 al 6, al ser 0 el coeficiente  $m$ , la definición del trazado se basó en cumplir con las restricciones del problema, es decir, un trazado sin recirculación de agua. Para esta nueva topografía, el criterio 7 fue el mejor para definir un trazado inicial ya que al no haber topografía, la topología sería suficiente para definir un buen trazado. Asimismo, la metodología de Duque (2015) resultó en un mejor resultado que el criterio 7, corroborando los resultados encontrados en su tesis de maestría donde la metodología fue aplicada a una red sin topografía, sin embargo, es casi imposible tener ese tipo de redes en un problema de ingeniería real.

El trazado encontrado con el criterio 5 resultó de menor costo a los demás porque fue el que optimizó el diámetro de las tuberías de la red alcanzando una profundidad de instalación cercana al mínimo encontrado para todos los criterios. Al aplicar la ecuación de costo completa para la iteración 1, el trazado resultante tuvo un costo menor al inicial, reduciendo el diámetro promedio y la profundidad de excavación por un efecto parecido a la observada en la red Chicó sur, es decir, una mejor distribución del caudal por la red (Figura 55 y Figura 56). Lo anterior responde al minimizar una función de costo que toma en cuenta tanto el caudal como la topografía y topología del terreno.

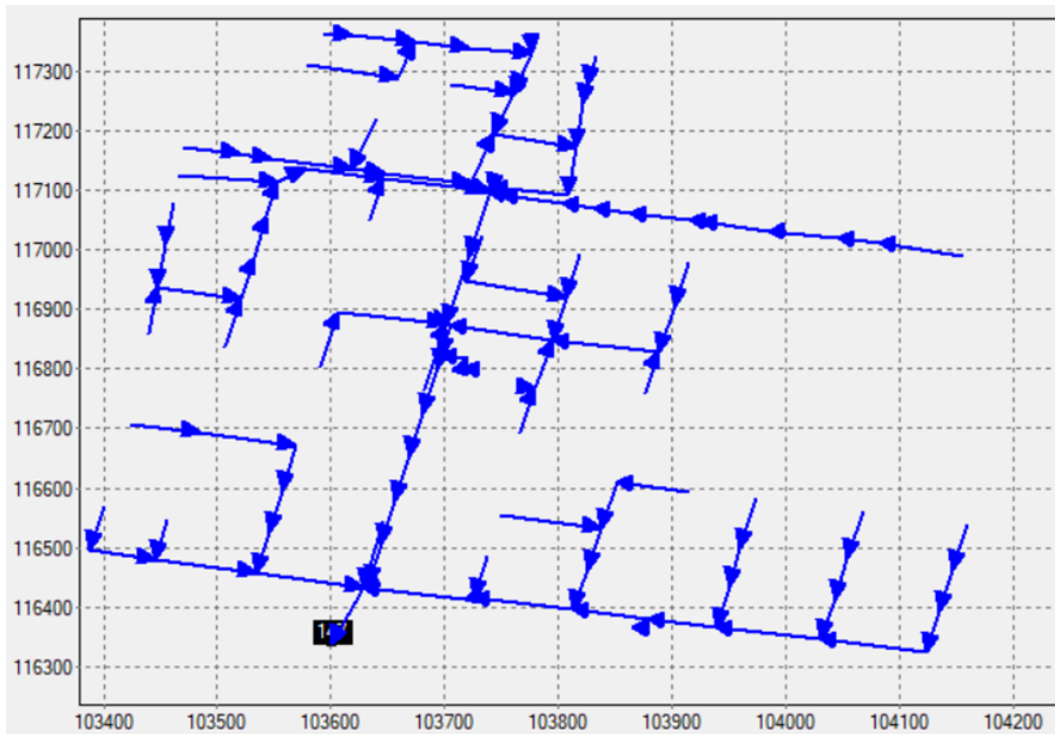


Figura 55.- Tuberías continuas para el trazado inicial (criterio 5) en la red Cedritos 1

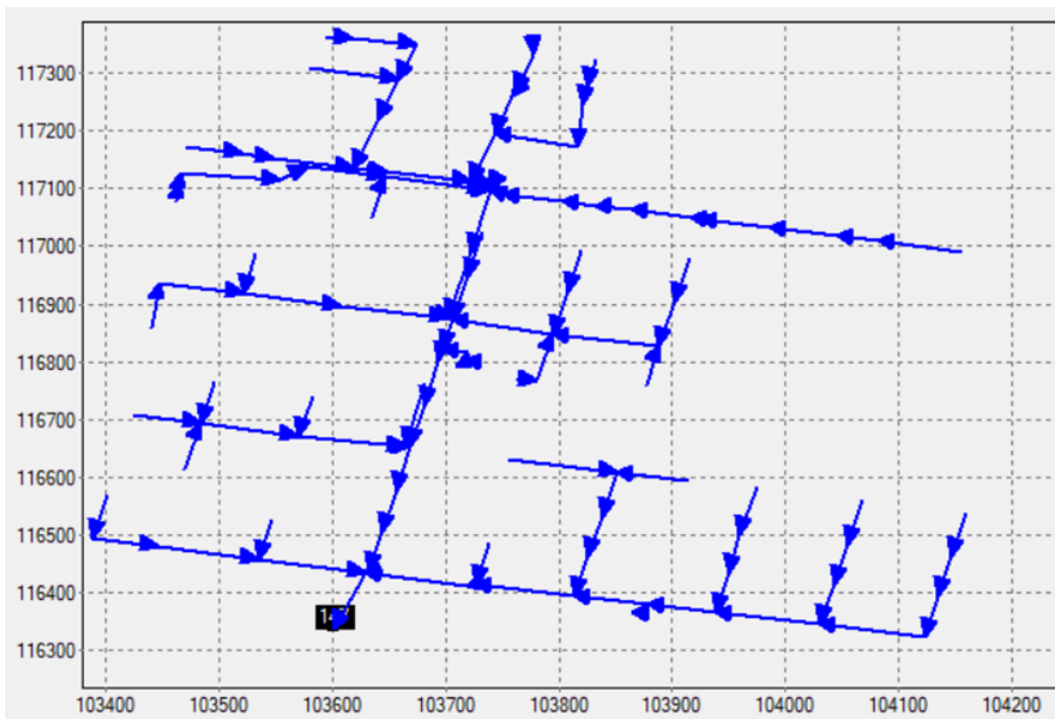
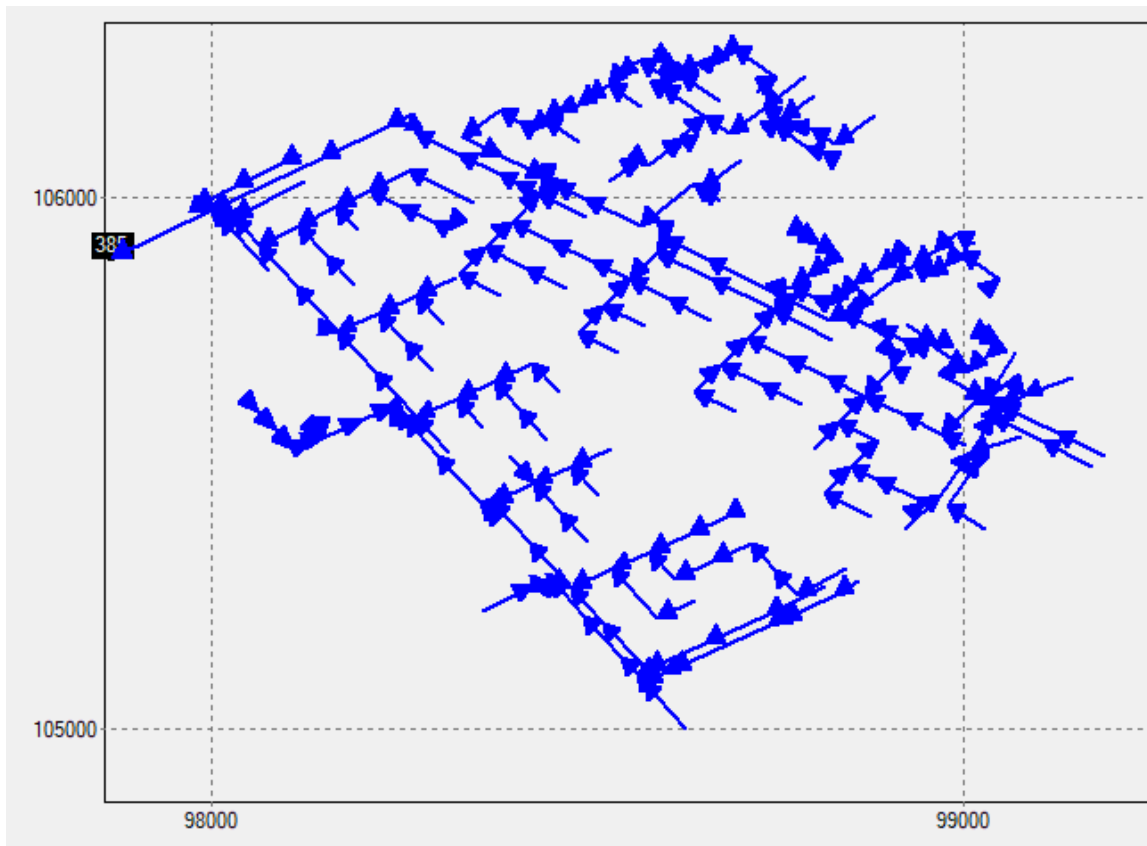


Figura 56.- Tuberías continuas para el trazado de la iteración 1 en la red Cedritos 1

## 5.4 Red Esmeralda

Los resultados encontrados para la red Esmeralda reflejaron que el mejor criterio para definir el trazado inicial es el 6, priorizando los tramos con mayor energía disponible y maximizando el número de tuberías continuas al igual que la red Chicó sur, la cual también es una red de alcantarillado pluvial, sin embargo, la topografía de la red Esmeralda es plana. Topológicamente, la red Esmeralda es compleja teniendo el mayor número de tramos totales sin ser el caso de estudio con mayor extensión, además de ser muy irregular combinando zonas abiertas donde el trazado está definido y otras cerradas donde la metodología fue aplicada. La Figura 57 muestra las principales series de la red que siguen la topografía del terreno permitiendo optimizar el diámetro y profundidad de instalación de las tuberías en comparación a los demás criterios utilizados, especialmente con el criterio 7 que teóricamente debió tener un mejor desempeño, sin embargo, al igual que la red Cedritos 1, los pequeños desniveles permiten aprovechar la energía disponible para bajar los costos constructivos.



*Figura 57.- Tuberías continuas del trazado inicial (criterio 6) para la red Esmeralda*

Con respecto a la iteración 1, la metodología pudo disminuir el costo del mejor trazado inicial encontrado, disminuyendo el promedio en el diámetro de las tuberías pero profundizando un poco la red. Lo anterior valida la metodología utilizada donde la función de costo definió tramos en

contrapendiente que permitió un menor costo por unidad de flujo y que, globalmente, trajo más beneficio que si aprovechaba los pequeños desniveles.

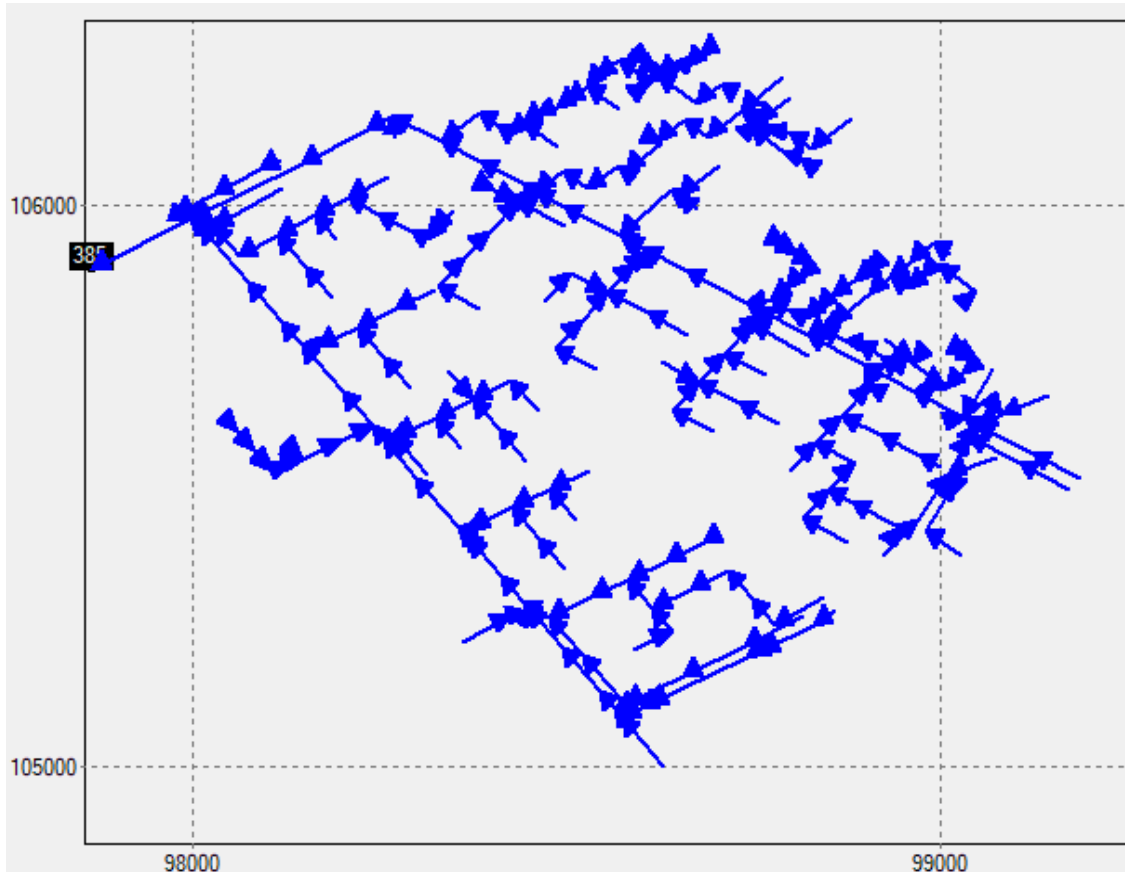


Figura 58.- Tuberías continuas del trazado definido en la iteración 1 para la red Esmeralda

## 5.5 Red Tumaco original y modificada

Para le red Tumaco, el caudal de aguas servidas se calculó en base a la información suministrada por la entidad encargada del diseño del sistema, con una densidad de vivienda alta en comparación a la red Cedritos 1. El mejor trazado inicial fue definido mediante el criterio 7 que fue pensado para este tipo de redes, es decir, con topografía plana. En redes como Cedritos 1 y Esmeralda, los cuales también tienen topografía plana, el criterio 7 no fue el que mejor desempeño tuvo, en donde el trazado que aprovechaba los mínimos desniveles para optimizar los costos fue el mejor. La complejidad de la red radica en la forma como está dispuesta las tuberías con respecto a la topografía del terreno, el cual por ser una isla tiende hacia las orillas y luego hacia la descarga final que para este proyecto se encuentra en la parte más alta, por lo tanto, al aplicar los criterios del 1 al 6 se aumentaba la longitud total de las series principales, aumentando el costo. Lo anterior se comprobó con la red Tumaco modificada donde la topografía fue cambiada, manteniendo su naturaleza plana, donde el punto más bajo sería la descarga y el mínimo desnivel al centro de la isla. Para esta condición, el criterio 6 mostró



el mismo desempeño que tuvo en Chicó sur y Esmeralda convirtiéndose en la propuesta de menor costo para el trazado inicial.

Para la iteración en la red Tumaco, la metodología disminuyó el costo con respecto al trazado inicial definido mediante el criterio 7 e incluso fue menor al encontrado después de 30 iteraciones con la metodología de Duque (2015). En la red Tumaco modificado, la iteración 1 nuevamente bajó los costos constructivos del trazado inicial optimizando los diámetros de las tuberías pero profundizando un poco la red, evidenciándose que la metodología propuesta cumple exitosamente su objetivo al poner en consideración tanto el costo por unidad de flujo en la red como aquellas relacionadas con la profundidad de excavación de las tuberías.



## 6 CONCLUSIONES

- La metodología planteada por Duque (2015), en la parte de diseño hidráulico, usa un procedimiento exhaustivo garantizando que para una función de costo determinada el diseño es el de menor costo. Otros programas como SewerGEMS tienen buenos módulos de diseño, sin embargo, en función de los resultados encontrados se llega a la conclusión que estos no usan métodos exhaustivos arrojando buenos diseños pero no el óptimo global.
- Con respecto a la elección del trazado, la función de costo planteada por Duque (2015) toma en cuenta sólo el caudal, minimizando el costo por unidad de flujo transportado, es decir, el trazado resultante implica un transporte óptimo del caudal, sin embargo, esta no toma en cuenta la topografía del terreno y la topología de la red, los cuales afectan la profundidad de excavación incrementando los costos constructivos del sistema. Lo anterior no pudo ser identificado anteriormente debido a que se habían probado redes planas (pozos a igual cota de tapa) y pequeñas en comparación a los casos de estudios planteados en esta investigación.
- Con el objetivo de tomar en cuenta todas las variables en la elección del trazado se planteó una extensión a la metodología de Duque (2015), agregando a la función de costo original componentes adicionales que tomen en cuenta la topografía del terreno y la topología de la red. Para esto se ingresó la longitud del tramo como parámetro y un tercer sumando con un coeficiente  $m$  a la ecuación de costos, manteniendo el caudal como variable continua y la variable binaria de asignación  $x$ .
- La metodología propone prever el costo por unidad de flujo sólo para las tuberías continuas, realizando una regresión lineal entre los costos constructivos por metro lineal de estas y su correspondiente caudal de diseño, regresión que se ajusta mejor a la propuesta original de Duque (2015), reduciendo la incertidumbre por el costo de las tuberías de inicio y heterogeneidad de las longitudes de los tramos. Asimismo, el coeficiente  $m$  para las tuberías continuas, en el tercer sumando de la ecuación, representará el costo asociado con la topografía del terreno por medio de un cálculo aproximado del volumen de excavación y/o relleno que el tramo perderá o ganará en función de la pendiente natural del terreno.
- Las tuberías de inicio, por ser los arranques en una red de drenaje urbano, tendrán un costo casi constante por utilizar la profundidad mínima de excavación y el diámetro mínimo, indiferente del tipo de sistema (sanitario o pluvial) y topografía del terreno, por lo tanto, su costo constructivo podrá ser perfectamente definido en el problema de la elección del trazado por medio del coeficiente  $m$ .
- El inicio de la metodología implica tener un diseño hidráulico inicial que permita definir los coeficientes que usa la ecuación de costo planteada. A diferencia de Duque (2015), la propuesta busca definir un trazado inicial cercano al óptimo utilizando sólo la topografía del terreno y la topología de la red, en consecuencia, se plantearon diferentes criterios para definir el trazado inicial resultando que el trazado que priorice los tramos con mayor pendiente natural del terreno o tramos de mayor energía disponible, y que minimice el número de tuberías de inicio es un trazado eficiente, indiferente del tipo de topografía o caudales que se



tenga. Sin embargo, cuando los pozos se encuentran en la misma cota de tapa o la topología de la red no coincide con la topografía del terreno, el mejor criterio para definir el trazado inicial es minimizar la longitud de los tramos o series principales de la red con respecto a la descarga final.

- La metodología tuvo éxito para todos los casos de estudio presentados en esta investigación, desde el trazado inicial hasta la iteración, teniendo mejores resultados que la metodología de Duque (2015) después de 30 iteraciones, sin embargo, la metodología no puede considerarse exhaustiva.
- La iteración 1 determinará si el costo del buen trazado inicial se puede disminuir y, si es posible, bastará con esa sola iteración ya que los cambios de costo con respecto al inicial son muy pocos, por lo tanto, los coeficientes  $c$ ,  $a$  y  $m$  tendrán poca variación para las siguientes iteraciones, encontrando el mismo trazado.
- Las investigaciones recogidas en la literatura técnica sobre la elección del trazado destacan que el problema debe reducirse para aquellas redes ubicadas en terreno planos, ya que para redes en topografías irregulares el trazado costo-efectivo podría ser definido por el criterio del ingeniero. Lo anterior no pudo ser corroborado en los resultados obtenidos, por el contrario, existen muchos criterios para definir un trazado en esas condiciones con diferentes costos, por lo tanto, se concluye que el problema de la elección del trazado debe incluir toda clase de topografía.

## 7 RECOMENDACIONES Y PASOS A SEGUIR

- Para disminuir la incertidumbre de no linealidad de los costos del diseño hidráulico con respecto a la función lineal de la elección del trazado se recomienda implementar un modelo no lineal entero para futuros trabajos investigativos.
- Para la elección del trazado inicial, la metodología uso los datos de entrada del problema como la topografía del terreno y la topología de la red, excluyendo al caudal. Se recomienda incluir este último dato en la ecuación planteada, de tal manera que el caudal sea repartido de manera equitativa a lo largo de la red, tal y como se observó cuando se implementó la iteración para todos los casos de estudio.
- Para determinar los coeficientes  $c$  y  $a$ , la metodología utiliza los datos del diseño hidráulico de la iteración anterior para realizar una regresión lineal general de los costos constructivos de las tuberías continuas con respecto al diseño hidráulico. Dado que los costos cambian muy poco con las iteraciones, los coeficientes  $c$  y  $a$  tienen una variación despreciable, llevando muy rápido a la convergencia del método. Se recomienda establecer una base de datos similar a la metodología original de Duque (2015), donde a partir de la segunda iteración la regresión lineal de costos se realice particularmente para cada tramo y no de manera general como la iteración 1, teniendo tantos datos como número de iteraciones se realice. Lo anterior permitirá tener una mejor predicción de los costos constructivos de los tramos continuos, teniendo coeficientes  $c$  y  $a$  para cada tubería y no para toda la red.
- Todos los programas disponibles para realizar un diseño hidráulico de una red de drenaje urbano, incluyendo UTOPIA y SewerGEMS, tienen como suposición básica que el flujo es uniforme para poder simplificar los cálculos hidráulicos, por lo tanto, una vez obtenido el diseño, en función de la reglamentación local, es necesario realizar un análisis de flujo gradualmente variado o flujo no permanente para comprobar que el diseño cumpla las restricciones con comportamientos de flujo más reales. Para la red Chicó sur se realizó un análisis de flujo gradualmente variado encontrando resaltos hidráulicos que presurizaban ciertos tramos de la red, especialmente cuando la topografía cambia de accidentada a plana, por lo tanto, es necesario ajustar los diámetros en los puntos problemáticos.

## 8 REFERENCIAS

- Afshar, M., Zaheri, M., y Kim, J. (2016). Improving the efficiency of celular automada for sewer network design optimization problems using adaptive refinement. *Procedia Engineering*, 154, 1439-1447.
- Aguilar, A. (2016). *Evaluación de funciones objetivo en la metodología exhaustiva desarrollada por el CIACUA para el diseño optimizado de alcantarillados* (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad de los Andes.
- Ahmadi, A., Zolfagharipoor, M., y Nafisi, M. (2018). Development of a hybrid algorithm for the optimal design of sewer networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(8), 04018045-1-04018045-10. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000942
- Bakhshipour, A., Makaremi, Y., y Dittmer, U. (2017). Multiobjective design of sewer networks. *Journal of Hydraulic Structures*, 3(1), 49-56.
- Bentley, (2017). *SewerGEMS User's Guide*. Pensilvania: s.n.
- Butler, D., y Davies, J. W. (2011). *Urban Drainage*. New York: Spon Press.
- Chow, V. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Código Ecuatoriano de la Construcción, (1992). *Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes*. Ecuador: s.n.
- Duque, N. (2013). *Metodología para la optimización del diseño de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado* (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad de los Andes.
- Duque, N. (2015). *Metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado* (Tesis de maestría). Bogotá: Universidad de los Andes.
- Duque, N., Duque, D., Saldarriaga, J., y Medaglia, A. (2016). An exact methodology for sewer systems design. Ponencia en el: *14th International conference on computing and control for the water industry CCWI*. Amsterdam, Holanda.
- Duque, N., Duque, D., y Saldarriaga, J. (2016). A new methodology for the optimal design of series of pipes in sewer systems. *Journal of Environmental Engineering*, 115(6), 1171-1190.
- Guo, Y., Godfrey, W., y Savic, D. (2008). Optimal design of storm sewer networks: past, present and future. Ponencia en el: *11th International conference on urban drainage*. Edinburgo, Escocia.
- Haghighi, A. (2013). Loop-by-loop cutting algorithm to generate layouts for urban drainage systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 693-703.
- Haguigui, A., y Bakhshipour, A. E. (2012). Optimization of sewer networks using an adaptive genetic algorithm. *Water Resources Management*, 26(12), 3441-3456.
- Haguigui, A., y Bakhshipour, A. E. (2015). Deterministic integrated optimization model for sewage collection networks using tabu search. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(1), 04014045-1-04014045-11. doi:8443/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000435
- Haguigui, A., y Bakhshipour, A. E. (2015). Reliability-based layout design of sewage collection systems in flat areas. *Urban Water Journal*, 13(8), 790-802.



- Hassan, W., Jassem, M., y Mohammed, S. (2017). A GA-HP model for the optimal design of sewer networks. *Water Resources Management*, 32(3), 865-879.
- Li, G., y Mathew, R. (1990). New approach for optimization of urban drainage systems. *Journal of Environmental Engineering*, 116(5), 927-944.
- Navarro, I. (2009). *Diseño optimizado de redes de drenaje urbano* (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad de los Andes.
- Navin, P., y Mathur, Y. (2016). Layout and component size optimization of sewer network using spanning tree and modified PSO algorithm. *Water Resources Management*, 30(10), 3627-3643.
- Pan, T., y Kao, J. J. (2009). GA-QP Model to optimize sewer system design. *Journal of Environmental Engineering*, 135(1), 17-24.
- RAS, (2000). *Título D.- Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Pluviales*. Bogotá: s.n.
- Rincón, G. (2016). *Prueba de la metodología de localización de tanques de tormenta en diferentes sectores de la ciudad de Bogotá y Medellín* (Tesis de maestría). Bogotá: Universidad de los Andes.
- Salcedo, C. (2012). *Diseño optimizado de Sistemas de Alcantarillado utilizando conceptos de Resiliencia y Potencia Unitaria* (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad de los Andes.
- Saldarriaga, J. (2017). *Clase de Sistemas Integrados de Drenaje Urbano*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Steele, J., Mahoney, K., Karovic, O., y Mays, L. (2016). Heuristic optimization model for the optimal layout and pipe design of sewer systems. *Water Resources Management*, 30(5), 1605-1620.
- Torres, L. (2013). *Métodos de diseño en Redes de Alcantarillado: ¿Qué se usa hoy en día?*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Yeh, S. F., Chu, C. W., Chang, Y. J., y Lin, M. D. (2011). Applying tabu search and simulated annealing to the optimal design of sewer networks. *Engineering Optimization*, 43(2), 159-174.

## 9 ANEXOS

### 9.1 Datos de entrada para los casos de estudio

#### 9.1.1 Red Chicó sur

ID	$Q_i$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	y (m)	z (m)	ID	$Q_i$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	y (m)	z (m)
1	0.01240	2145.39	7352.39	2561.93	56	0.01607	1954.28	7002.50	2566.98
2	0.02219	1982.51	7441.01	2558.90	57	0.01723	1882.86	7032.93	2565.49
3	0.02170	1784.49	7532.93	2557.41	58	0.00409	1826.73	7064.10	2564.64
4	0.02085	1632.28	7617.99	2557.42	59	0.01608	1746.82	7099.01	2562.24
5	0.01566	1452.89	7704.76	2555.87	60	0.01773	1686.22	7129.44	2560.50
6	0.01194	1317.86	7779.49	2554.95	61	0.01314	1599.01	7175.99	2558.14
7	0.01101	2233.12	7204.60	2568.56	62	0.01308	1508.10	7223.40	2557.71
8	0.01520	2097.16	7271.09	2563.11	63	0.01267	1456.74	7260.95	2557.01
9	0.01334	1932.99	7372.47	2557.93	64	0.01304	1381.43	7289.20	2556.29
10	0.01345	1835.94	7416.57	2557.33	65	0.01305	1318.17	7322.35	2555.57
11	0.01762	1747.32	7462.52	2556.90	66	0.01306	1254.73	7355.18	2555.04
12	0.01430	1650.50	7499.21	2556.72	67	0.01305	1191.38	7388.10	2554.88
13	0.01709	1588.00	7531.50	2556.62	68	0.00878	1109.34	7429.94	2554.65
14	0.01273	1524.17	7564.57	2555.87	69	0.00837	962.53	7514.74	2553.57
15	0.01259	1460.84	7597.47	2555.78	70	0.00862	2056.96	6866.81	2576.09
16	0.01260	1397.46	7630.55	2555.37	71	0.01707	2002.76	6889.27	2570.15
17	0.00945	1333.26	7661.29	2554.93	72	0.01276	1920.35	6933.78	2567.70
18	0.00942	1202.87	7770.98	2553.85	73	0.01789	1832.90	6975.88	2565.94
19	0.01118	2204.20	7149.60	2570.03	74	0.00912	1728.08	7031.72	2563.69
20	0.01979	2065.54	7218.98	2564.85	75	0.01649	1649.08	7068.52	2561.04
21	0.01000	1996.74	7259.19	2559.70	76	0.01743	1559.39	7112.63	2559.04
22	0.01861	1880.41	7313.67	2558.70	77	0.01687	1471.37	7158.01	2557.99
23	0.01305	1803.79	7353.82	2557.34	78	0.00829	1393.92	7198.28	2557.27
24	0.01305	1715.03	7400.08	2557.00	79	0.01304	1305.24	7244.35	2555.82
25	0.00862	1144.17	7710.55	2554.38	80	0.00862	1230.89	7282.92	2555.43
26	0.01173	2157.49	7087.17	2573.00	81	0.01695	1155.26	7322.23	2555.31
27	0.01633	2093.60	7119.76	2568.05	82	0.01644	1076.77	7368.03	2554.96
28	0.02038	2029.41	7153.10	2565.71	83	0.02002	992.30	7407.29	2554.09
29	0.01304	1963.14	7187.67	2562.88	84	0.01257	913.30	7446.36	2554.13
30	0.01653	1905.84	7224.42	2560.93	85	0.00867	826.81	7493.27	2553.36
31	0.02083	1831.54	7256.25	2559.41	86	0.01726	1958.45	6815.65	2573.03
32	0.01281	1765.15	7289.85	2557.90	87	0.02575	1785.75	6898.33	2566.15

33	0.01281	1681.29	7333.85	2557.17	88	0.01717	1604.82	6992.61	2561.96
34	0.00934	1600.04	7388.10	2557.14	89	0.00873	1530.58	7035.67	2559.86
35	0.01359	1544.46	7448.03	2556.11	90	0.01701	1434.47	7086.98	2558.71
36	0.01362	1481.47	7481.98	2555.69	91	0.02456	1268.27	7173.47	2556.42
37	0.00929	1419.46	7517.89	2555.84	92	0.01605	1116.00	7247.09	2555.27
38	0.00930	1356.12	7550.70	2555.25	93	0.00827	1035.11	7288.28	2554.51
39	0.01329	1279.69	7558.36	2554.69	94	0.01714	955.69	7336.90	2553.91
40	0.01227	1197.64	7600.63	2554.59	95	0.01687	788.20	7419.13	2553.05
41	0.01256	1114.68	7643.68	2554.29	96	0.01274	1910.25	6726.98	2575.19
42	0.00873	1917.32	7098.98	2564.33	97	0.02123	1744.42	6812.62	2569.26
43	0.01342	1735.70	7224.20	2558.97	98	0.01769	1569.16	6903.75	2564.49
44	0.01314	1645.68	7265.07	2557.40	99	0.01333	1475.04	6952.68	2560.78
45	0.01271	1548.16	7315.99	2556.96	100	0.01301	1391.34	6997.48	2560.00
46	0.01778	1491.40	7345.58	2556.45	101	0.00829	1302.31	7041.85	2558.00
47	0.01824	1427.55	7377.92	2555.93	102	0.01599	1224.80	7082.59	2555.33
48	0.01837	1364.27	7411.31	2555.47	103	0.01637	1071.64	7162.13	2554.82
49	0.01837	1300.92	7444.20	2554.96	104	0.01276	981.54	7207.82	2554.22
50	0.00887	1237.38	7477.06	2554.76	105	0.01287	901.30	7249.35	2552.05
51	0.01673	1155.71	7519.68	2554.23	106	0.00882	831.25	7286.18	2551.72
52	0.02023	1072.14	7561.27	2553.85	107	0.01312	741.36	7334.18	2551.63
53	0.00837	1004.44	7596.19	2553.74	108	0.00840	667.44	7367.24	2551.46
54	0.01173	2090.90	6933.35	2575.89	109	-1.51799	584.86	7408.61	2551.85
55	0.01203	2013.31	6965.14	2569.71					

### 9.1.2 Red Cedritos 1

ID	$Q_i$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	y (m)	z (m)	ID	$Q_i$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	y (m)	z (m)
1	0.00050	103594.10	117364.00	2555.67	75	0.00060	103569.10	116672.10	2554.10
2	0.00040	103618.04	117359.45	2556.77	76	0.00053	103663.50	116654.20	2555.60
3	0.00041	103673.50	117348.90	2555.62	77	0.00050	103668.90	116653.20	2555.51
4	0.00038	103721.00	117339.60	2555.41	78	0.00034	103411.50	116635.90	2556.24
5	0.00026	103777.40	117335.10	2555.38	79	0.00068	103756.10	116630.10	2555.70
6	0.00036	103777.00	117330.90	2555.38	80	0.00033	103469.70	116615.70	2555.73
7	0.00023	103832.80	117324.00	2555.14	81	0.00072	103852.10	116608.70	2554.14
8	0.00034	103579.90	117309.50	2555.72	82	0.00430	103557.90	116595.40	2555.44
9	0.00061	103658.40	117289.90	2555.88	83	0.00058	103914.00	116594.20	2555.33
10	0.00026	103826.00	117278.70	2555.13	84	0.00045	103974.50	116581.60	2556.84
11	0.00036	103705.20	117276.70	2555.75	85	0.00068	103656.10	116578.40	2555.37
12	0.00034	103760.80	117264.90	2555.40	86	0.00023	103400.20	116567.60	2555.95
13	0.00040	103758.90	117259.30	2555.75	87	0.00073	104068.30	116561.00	2555.20

14	0.00023	103821.10	117245.70	2554.97	88	0.00092	103748.40	116553.30	2555.60
15	0.00052	103640.60	117220.50	2555.52	89	0.00079	103456.30	116544.80	2555.60
16	0.00033	103692.20	117207.10	2555.75	90	0.00085	103646.10	116544.00	2555.51
17	0.00036	103743.50	117193.70	2555.63	91	0.00046	104160.29	116538.17	2554.61
18	0.00023	103470.30	117172.10	2555.87	92	0.00039	103546.60	116526.50	2555.48
19	0.00038	103816.40	117172.10	2555.01	93	0.00192	103643.90	116506.60	2555.52
20	0.00023	103547.00	117153.30	2555.84	94	0.00077	103959.80	116499.90	2555.10
21	0.00023	103578.50	117137.50	2555.76	95	0.00028	103388.20	116495.60	2555.68
22	0.00023	103618.60	117135.70	2555.66	96	0.00063	103737.60	116485.20	2555.51
23	0.00028	103648.20	117128.00	2555.64	97	0.00038	104054.50	116483.50	2554.93
24	0.00023	103466.20	117125.20	2555.81	98	0.00075	103445.70	116480.30	2555.61
25	0.00023	103553.80	117114.10	2555.84	99	0.00034	104147.10	116463.40	2554.69
26	0.00027	103722.40	117111.40	2555.50	100	0.00067	103825.70	116462.60	2555.42
27	0.00028	103742.00	117105.70	2555.74	101	0.00069	103534.20	116456.60	2555.28
28	0.00023	103734.60	117099.00	2555.64	102	0.00029	103632.30	116438.90	2555.22
29	0.00023	103740.00	117097.60	2555.49	103	0.00090	103950.20	116435.20	2555.05
30	0.00028	103808.40	117092.90	2555.24	104	0.00047	103726.50	116415.80	2555.26
31	0.00023	103751.00	117090.70	2555.42	105	0.00036	104043.90	116414.30	2554.84
32	0.00023	103461.50	117076.80	2556.26	106	0.00055	103718.90	116413.30	2555.05
33	0.00027	103543.40	117055.60	2555.86	107	0.00070	103813.50	116395.60	2555.27
34	0.00041	103635.10	117050.80	2555.56	108	0.00032	104134.70	116394.50	2554.55
35	0.00023	103925.60	117047.10	2555.18	109	0.00078	103879.50	116379.80	2555.31
36	0.00025	103986.30	117032.00	2555.03	110	0.00103	103938.70	116366.10	2555.05
37	0.00035	103732.50	117023.90	2555.31	111	0.00159	104031.00	116345.50	2554.45
38	0.00023	104082.60	117011.10	2554.87	112	0.00037	104123.70	116325.40	2554.69
39	0.00023	103454.80	117008.10	2556.25	113	0.00023	103464.79	117110.69	2557.00
40	0.00049	103819.20	116992.80	2555.27	114	0.00023	103519.27	117160.10	2555.65
41	0.00023	104155.90	116990.70	2554.77	115	0.00023	104046.07	117019.03	2554.93
42	0.00045	103722.20	116990.30	2555.41	116	0.00027	103863.95	117062.72	2555.26
43	0.00040	103532.30	116986.50	2555.81	117	0.00027	103803.99	117077.16	2555.34
44	0.00032	103915.20	116979.70	2554.98	118	0.00038	103876.93	116370.04	2556.00
45	0.00073	103619.60	116967.50	2555.71	119	0.00023	104182.73	116310.74	2555.32
46	0.00054	103718.60	116947.10	2555.53	120	0.00150	103840.60	117379.70	2554.91
47	0.00030	103447.40	116937.00	2556.20	121	0.00030	103512.70	117379.50	2555.55
48	0.00053	103807.30	116920.40	2555.52	122	0.00048	103497.80	117330.00	2555.35
49	0.00033	103520.90	116917.50	2555.92	123	0.00032	103811.00	117329.70	2555.33
50	0.00224	103902.60	116905.70	2555.17	124	0.00029	103816.50	117325.40	2555.33
51	0.00083	103606.90	116895.60	2555.60	125	0.00027	103856.00	117277.10	2555.42
52	0.00869	103701.60	116875.00	2555.45	126	0.00027	103811.10	117251.80	2555.75
53	0.00028	103705.50	116874.10	2555.52	127	0.00030	103807.90	117247.20	2555.40



54	0.00033	103439.30	116860.40	2556.02	128	0.00027	103553.90	117243.10	2556.02
55	0.00096	103506.70	116838.10	2555.80	129	0.00025	103482.70	117237.90	2555.29
56	0.00058	103888.40	116827.60	2553.73	130	0.00023	103646.30	117119.90	2555.60
57	0.00032	103697.00	116822.70	2555.24	131	0.00023	103743.20	117083.10	2556.27
58	0.00066	103719.90	116817.40	2555.61	132	0.00023	103832.40	117069.90	2555.30
59	0.00079	103590.40	116802.80	2555.56	133	0.00030	103831.60	117063.60	2556.57
60	0.00030	103693.30	116800.80	2555.32	134	0.00023	103916.80	117050.70	2555.19
61	0.00023	103717.10	116800.70	2555.65	135	0.00029	103925.70	117041.00	2555.56
62	0.00023	103727.80	116798.20	2555.67	136	0.00049	104234.90	116978.20	2554.68
63	0.00028	103431.40	116784.80	2556.23	137	0.00038	103794.90	116848.20	2554.10
64	0.00044	103763.20	116770.30	2555.60	138	0.00024	103743.40	116794.60	2555.70
65	0.00030	103780.00	116767.10	2555.58	139	0.00059	103743.70	116774.90	2555.70
66	0.00065	103495.40	116764.90	2555.92	140	0.00039	103989.90	116666.20	2555.44
67	0.00057	103682.00	116763.70	2555.49	141	0.00032	104086.20	116647.50	2555.03
68	0.00074	103877.30	116758.40	2555.34	142	0.00032	104178.30	116623.70	2555.04
69	0.00042	103582.10	116740.90	2555.75	143	0.00078	103838.10	116531.20	2555.34
70	0.00039	103680.90	116725.60	2555.38	144	0.00026	103856.60	116292.70	2556.16
71	0.00027	103423.30	116706.90	2555.85	145	0.00033	104106.10	116247.30	2554.26
72	0.00045	103767.20	116694.00	2555.63	146	0.00044	103628.70	116433.80	2555.20
73	0.00045	103484.30	116693.10	2553.99	147	-0.0787	103601.10	116337.30	2555.36
74	0.00092	103865.00	116683.30	2555.52					

### 9.1.3 Red Esmeralda

ID	$Q_i$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	y (m)	z (m)	ID	$Q_i$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	y (m)	z (m)
1	0.00812	98241.08	105607.60	2551.27	194	0.01256	98824.73	105734.18	2551.84
2	0.00583	98444.52	105292.40	2551.50	195	0.01455	98666.34	105845.59	2551.08
3	0.00535	98446.28	106036.11	2551.48	196	0.00366	98822.18	105798.43	2551.78
4	0.00846	98571.76	105946.37	2551.61	197	0.00619	99014.95	105754.03	2551.55
5	0.00738	98603.78	105922.76	2551.59	198	0.00126	98962.99	105718.05	2552.12
6	0.00136	98756.51	105817.39	2552.26	199	0.01830	98765.35	105699.03	2551.82
7	0.00273	98842.20	105302.74	2551.92	200	0.01459	98759.04	105207.55	2551.93
8	0.00621	98674.34	105995.07	2551.72	201	0.01116	99081.33	105629.64	2552.11
9	0.00553	98886.29	105943.29	2551.83	202	0.01655	98121.52	106029.40	2551.35
10	0.01011	98875.51	105698.89	2551.66	203	0.00386	98313.93	105940.24	2551.68
11	0.00561	98846.37	105907.88	2551.71	204	0.01367	98991.26	105933.65	2551.32
12	0.00496	98801.99	105882.85	2551.85	205	0.00531	98808.86	105913.64	2551.90
13	0.00650	98866.12	105884.52	2551.45	206	0.02011	98660.91	105883.92	2551.92
14	0.01200	98592.93	105671.32	2551.96	207	0.00861	98323.12	105849.39	2551.66
15	0.01106	98974.85	105629.66	2551.79	208	0.00293	99044.49	105843.25	2551.99

16	0.01316	98749.09	105562.11	2552.11	209	0.01179	98113.79	105833.26	2550.34
17	0.02212	99204.92	105470.21	2551.84	210	0.01649	98221.12	105783.43	2551.25
18	0.02916	99057.74	105408.57	2552.10	211	0.01144	98662.40	105771.08	2551.83
19	0.00453	98911.05	105375.26	2552.15	212	0.01138	98486.54	105745.70	2551.68
20	0.01025	98477.01	105339.77	2551.59	213	0.00548	98966.07	105721.69	2552.17
21	0.00704	98846.76	105940.89	2551.89	214	0.00670	99030.50	105701.93	2552.22
22	0.01669	98757.14	105885.36	2552.05	215	0.01054	98217.37	105672.50	2550.66
23	0.01702	99101.49	105794.18	2551.67	216	0.00456	99049.37	105609.17	2552.00
24	0.01243	98676.93	105791.58	2551.88	217	0.01718	98410.29	105600.91	2551.22
25	0.00970	98466.54	105559.69	2551.64	218	0.01459	98695.74	105599.39	2551.95
26	0.01461	98971.64	105554.78	2552.41	219	0.01571	98834.42	105576.94	2551.90
27	0.01146	98765.03	105477.38	2551.94	220	0.00627	99106.49	105542.19	2552.12
28	0.00959	98709.96	105402.21	2551.86	221	0.01125	98703.41	105412.64	2551.78
29	0.00279	98845.66	105305.29	2551.97	222	0.01227	98684.42	105400.04	2551.73
30	0.01570	98873.83	105981.79	2552.08	223	0.02024	99027.19	105375.37	2552.10
31	0.00472	98881.84	105329.44	2552.26	224	0.01504	98633.82	105367.72	2551.65
32	0.01005	98363.04	106010.57	2551.78	225	0.01092	98424.27	105351.61	2550.67
33	0.01633	98471.73	105830.85	2551.82	226	0.00176	98576.98	105112.34	2551.30
34	0.00463	99025.03	105764.46	2551.73	227	0.04789	98630.39	105001.92	2551.60
35	0.00456	98892.01	105338.62	2552.27	228	0.00580	98859.08	105279.70	2552.00
36	0.00737	98234.41	106069.95	2551.64	229	0.00738	98793.53	105928.12	2551.64
37	0.01114	98805.91	105989.17	2552.00	230	0.01026	99068.42	105710.42	2551.66
38	0.00691	99079.87	105777.73	2551.95	231	0.01599	98328.74	106081.22	2550.71
39	0.01056	98270.79	105660.12	2551.44	232	0.01074	98385.92	106077.08	2551.32
40	0.02650	98094.75	105631.03	2551.49	233	0.01051	98348.65	105990.13	2551.72
41	0.04118	99244.66	105475.33	2552.09	234	0.00331	98603.75	105915.34	2551.27
42	0.01404	98925.42	105349.71	2551.97	235	0.00423	98904.87	105885.05	2551.43
43	0.01611	98902.62	105956.76	2551.75	236	0.01337	98506.17	105880.12	2551.71
44	0.01086	98166.94	105821.54	2551.49	237	0.01715	98418.37	105868.22	2551.49
45	0.01559	98362.92	105787.72	2551.74	238	0.00515	98792.69	105853.02	2551.77
46	0.00553	98984.45	105782.93	2551.66	239	0.00872	98854.79	105840.81	2551.80
47	0.01891	98342.06	105706.95	2551.58	240	0.00705	98854.76	105790.89	2551.51
48	0.01585	98784.79	105613.33	2552.04	241	0.01552	98148.59	105751.39	2551.56
49	0.01179	98758.62	105462.36	2551.94	242	0.00467	99036.66	105733.47	2552.04
50	0.00713	98887.95	105309.33	2552.37	243	0.01294	98147.21	105547.11	2551.53
51	0.02119	98905.88	105236.37	2551.96	244	0.01380	99020.25	105507.94	2552.00
52	0.00723	99069.96	105819.26	2551.93	245	0.01539	98478.39	105495.08	2551.45
53	0.00733	98966.68	105762.76	2551.71	246	0.01730	98513.47	105440.82	2551.48
54	0.01294	98357.35	105455.62	2551.18	247	0.01858	98462.98	105408.19	2551.45
55	0.00934	98872.31	105393.51	2552.11	248	0.01742	98666.37	105315.66	2551.64

56	0.00664	98665.99	105180.09	2551.49	249	0.01757	98531.79	105301.97	2551.37
57	0.01954	98594.19	105429.38	2551.80	250	0.01391	98591.05	105209.81	2551.23
58	0.00823	98207.60	106089.56	2551.20	251	0.01111	98521.91	105200.18	2551.38
59	0.01727	98239.07	105868.17	2551.69	252	0.01738	98544.48	105136.23	2551.08
60	0.01215	99071.21	105856.61	2551.73	253	0.01776	98426.01	105268.09	2551.25
61	0.00600	99022.07	105789.53	2551.97	254	0.00932	98435.15	106006.77	2551.51
62	0.01437	98748.42	105788.07	2551.77	255	0.00518	98965.66	105668.45	2552.21
63	0.01444	98436.43	105780.43	2551.90	256	0.01587	98325.85	105623.31	2551.24
64	0.01370	99104.85	105751.23	2551.57	257	0.00828	98146.58	106075.36	2551.52
65	0.03871	99168.27	105726.91	2551.37	258	0.01347	98262.30	106050.44	2551.55
66	0.01215	98727.38	105219.71	2551.64	259	0.00522	98459.53	106024.80	2551.77
67	0.01004	98669.05	105199.39	2551.72	260	0.00764	98497.88	105998.32	2551.70
68	0.01453	98548.82	105385.97	2551.70	261	0.00813	98925.57	105906.21	2551.62
69	0.00839	99028.59	105822.35	2551.89	262	0.02038	98152.50	105890.16	2551.31
70	0.01192	98967.96	105807.17	2551.76	263	0.00711	98975.30	105873.21	2551.24
71	0.01367	98167.76	105749.21	2550.72	264	0.00792	98955.85	105854.17	2551.47
72	0.00856	98562.32	105918.17	2551.44	265	0.00590	98799.44	105814.58	2551.65
73	0.01195	98497.30	105579.37	2551.73	266	0.01531	98271.57	105816.05	2551.42
74	0.00852	98981.01	105487.80	2552.20	267	0.01701	98609.27	105808.25	2551.66
75	0.01291	98964.60	105486.45	2552.14	268	0.00626	98822.63	105770.52	2552.71
76	0.00792	98875.80	105400.23	2552.04	269	0.01713	99124.60	105559.68	2552.20
77	0.01053	98569.92	105196.22	2551.52	270	0.00342	98145.17	105550.38	2551.49
78	0.05797	98713.96	104875.54	2551.42	271	0.01762	98885.17	105542.02	2551.95
79	0.00986	98841.79	105978.64	2551.75	272	0.01797	98530.29	105528.51	2551.58
80	0.03963	98325.93	105198.71	2551.24	273	0.01140	98315.17	105521.13	2551.14
81	0.01841	98680.49	105989.84	2551.78	274	0.00740	98946.52	105425.81	2552.01
82	0.01481	98333.05	106113.79	2551.49	275	0.01717	98414.27	105339.14	2551.72
83	0.00656	98218.46	106154.48	2551.90	276	0.01432	98582.03	105334.39	2551.47
84	0.00822	99091.60	105540.62	2552.00	277	0.01513	98615.38	105282.74	2551.58
85	0.00904	98924.38	105664.99	2551.69	278	0.01075	98478.54	105267.51	2551.37
86	0.01797	98610.70	105111.63	2551.50	279	0.00262	98448.56	105275.99	2551.98
87	0.00213	98929.90	105723.29	2551.81	280	0.01913	98265.96	106156.80	2551.72
88	0.00305	98920.28	105733.37	2552.27	281	0.00587	98117.93	106082.88	2551.85
89	0.00564	98889.45	105756.04	2551.89	282	0.01833	98012.18	105962.51	2550.70
90	0.00597	98873.06	105761.01	2551.88	283	0.01369	98029.79	105965.15	2550.63
91	0.00308	98841.39	105782.56	2551.55	284	0.00423	98579.03	105941.34	2551.94
92	0.00904	99075.45	105549.75	2551.93	285	0.01477	98452.74	105917.31	2551.53
93	0.00656	98294.92	105953.34	2551.60	286	0.00962	98592.26	105897.27	2551.32
94	0.02856	98740.72	105195.36	2551.82	287	0.00437	98811.86	105873.26	2551.62
95	0.01623	98882.88	105470.27	2552.01	288	0.01181	98383.03	105817.75	2551.73

96	0.00724	98404.31	106028.33	2550.76	289	0.01540	98521.76	105796.21	2551.63
97	0.00530	98598.95	105103.98	2551.59	290	0.00818	99006.25	105676.89	2551.83
98	0.00955	98823.57	106169.11	2552.27	291	0.01173	98292.70	105674.10	2551.42
99	0.00781	98799.35	106128.30	2552.04	292	0.00583	98905.14	105678.15	2551.70
100	0.00305	98942.20	105714.57	2551.80	293	0.00413	98922.47	105376.94	2552.25
101	0.01563	98789.87	106228.46	2552.20	294	0.00883	98755.93	105304.09	2552.05
102	0.03544	98890.42	106148.01	2552.42	295	0.01420	98192.46	105940.38	2551.38
103	0.01107	98675.04	106180.46	2551.71	296	0.00275	98908.87	105699.82	2552.14
104	0.01741	98849.07	106083.40	2552.20	297	0.01642	98202.67	105667.22	2551.69
105	0.00795	98461.93	106165.90	2551.14	298	0.01093	98209.38	106013.32	2551.48
106	0.01108	98598.05	106046.73	2551.44	299	0.00887	98250.00	105984.75	2551.54
107	0.01108	98622.86	106115.74	2551.44	300	0.02237	98115.39	105947.24	2551.19
108	0.00798	98408.67	106142.42	2550.97	301	0.01377	98364.66	105905.69	2551.57
109	0.00685	98931.99	105405.08	2552.06	302	0.00726	98960.81	105900.72	2551.42
110	0.00156	98448.11	106025.16	2551.40	303	0.00453	98830.71	105892.63	2551.61
111	0.00467	98780.36	105263.80	2551.80	304	0.02353	98075.31	105864.61	2552.03
112	0.01075	98724.32	105353.56	2551.79	305	0.01406	98556.26	105845.41	2551.58
113	0.01274	98832.78	105319.77	2551.86	306	0.01522	98574.81	105759.05	2551.75
114	0.01263	98811.84	105434.27	2552.12	307	0.01597	98818.76	105661.67	2551.94
115	0.02809	98360.63	105222.35	2551.25	308	0.01634	98375.29	105655.29	2551.40
116	0.01474	98371.17	105406.29	2551.68	309	0.01618	98869.00	105626.49	2551.82
117	0.00376	98364.72	105415.82	2551.31	310	0.00905	98271.53	105588.38	2551.19
118	0.00057	98367.52	105423.83	2550.72	311	0.01271	98445.36	105546.00	2551.63
119	0.00248	98264.63	105584.29	2551.17	312	0.00868	98815.38	105442.47	2552.14
120	0.00507	98130.33	105541.72	2552.01	313	0.01064	98498.32	105353.46	2551.57
121	0.01440	98107.43	105527.49	2551.67	314	0.01455	98641.07	105242.83	2551.63
122	0.00721	98104.82	105531.61	2551.79	315	0.01322	98165.37	105982.48	2551.36
123	0.01478	98084.00	105564.00	2551.45	316	0.01694	98256.52	105728.57	2551.34
124	0.01406	98061.26	105599.18	2551.53	317	0.01786	98731.16	105649.81	2551.69
125	0.00799	98045.98	105622.84	2551.21	318	0.03189	98536.83	106289.07	2551.60
126	0.01889	98044.52	105626.60	2551.22	319	0.00734	98569.33	106258.04	2551.28
127	0.01665	98120.81	105793.40	2552.10	320	0.00541	98594.29	106234.32	2551.14
128	0.02367	98498.23	106268.22	2551.67	321	0.00857	98540.10	106227.33	2551.34
129	0.00264	99113.75	105551.46	2552.18	322	0.00890	98526.91	106213.59	2551.40
130	0.00692	98382.25	106044.04	2550.73	323	0.00612	98723.62	106198.70	2552.32
131	0.01542	98399.01	105954.88	2551.57	324	0.00789	98707.16	106214.35	2552.35
132	0.01819	98772.43	105948.10	2551.89	325	0.01649	98750.76	106227.17	2551.80
133	0.00379	98233.82	106136.21	2551.65	326	0.02752	98693.56	106281.77	2551.55
134	0.01230	98271.23	106121.25	2550.73	327	0.00793	98679.97	106267.52	2551.54
135	0.00403	98885.65	105865.25	2551.67	328	0.03209	98624.05	106321.18	2551.60

136	0.00445	99047.32	105846.90	2551.80	329	0.00165	98615.05	106306.40	2551.94
137	0.01166	98187.89	105834.97	2551.47	330	0.00683	98662.13	106248.70	2551.51
138	0.00846	98924.23	105761.86	2551.92	331	0.00751	98587.39	106277.74	2551.88
139	0.00322	98900.93	105715.88	2552.65	332	0.00489	98612.64	106253.48	2551.89
140	0.01866	98426.94	105688.56	2551.55	333	0.00561	98622.07	106230.89	2551.44
141	0.00961	99066.07	105654.05	2551.88	334	0.00424	98610.62	106218.78	2551.11
142	0.00486	99031.17	105622.61	2552.12	335	0.00900	98599.85	106207.47	2550.97
143	0.01923	99170.87	105495.09	2552.07	336	0.00611	98643.37	106252.85	2551.69
144	0.01493	98799.43	105526.86	2551.99	337	0.01114	98656.71	106151.90	2551.78
145	0.00448	99009.21	105520.28	2552.00	338	0.00964	98688.48	106122.10	2551.78
146	0.01320	98850.62	105492.87	2552.00	339	0.00893	98733.27	106169.30	2552.01
147	0.00771	98374.80	105428.33	2550.80	340	0.00513	98756.98	106146.91	2552.04
148	0.00350	98739.55	105216.94	2551.70	341	0.00817	98799.76	106191.70	2551.99
149	0.01460	98574.98	105088.40	2551.30	342	0.01209	98808.08	106211.58	2552.15
150	0.01192	98830.10	105253.20	2552.09	343	0.00589	98771.70	106132.92	2552.07
151	0.01574	98677.83	105686.96	2550.83	344	0.00856	98828.63	106101.22	2552.19
152	0.01225	98642.62	105636.56	2551.87	345	0.00722	98747.86	106137.62	2551.88
153	0.01619	98462.09	105634.04	2551.64	346	0.01271	98570.20	106172.66	2551.59
154	0.00599	98090.96	106064.85	2551.82	347	0.00997	98547.53	106148.76	2551.68
155	0.01560	97978.44	105984.25	2551.77	348	0.01086	98536.39	106103.58	2551.46
156	0.01981	98063.35	105911.75	2550.52	349	0.00977	98569.58	106072.88	2551.29
157	0.00571	98996.25	105895.86	2551.83	350	0.01476	98527.88	106029.67	2551.49
158	0.00580	98934.08	105873.90	2551.46	351	0.00643	98581.19	106062.44	2551.35
159	0.00718	98329.43	105855.21	2551.72	352	0.00793	98622.54	106045.48	2551.45
160	0.01220	98905.33	105843.73	2551.70	353	0.00849	98640.89	106027.60	2551.52
161	0.00996	98742.12	105826.07	2552.05	354	0.00792	98627.46	106111.21	2551.44
162	0.00406	98773.27	105832.88	2551.68	355	0.00832	98677.84	106097.00	2552.02
163	0.00305	98758.52	105807.85	2551.48	356	0.00791	98703.73	106072.30	2551.67
164	0.01851	98712.30	105736.27	2551.82	357	0.00822	98651.81	106017.62	2551.61
165	0.01128	98496.98	105964.07	2551.39	358	0.01368	98709.60	106031.37	2551.90
166	0.01832	98199.30	105580.59	2551.61	359	0.01176	98731.65	106080.71	2551.96
167	0.00781	99001.07	105533.84	2552.32	360	0.00223	98824.56	106073.46	2552.34
168	0.01086	98030.31	106021.84	2551.79	361	0.00812	98831.09	106067.33	2552.42
169	0.03065	99143.38	105663.60	2551.59	362	0.00367	98813.41	106084.09	2552.24
170	0.00701	99013.51	105615.10	2552.25	363	0.01220	98796.76	106044.47	2552.49
171	0.01135	98128.21	105577.61	2551.49	364	0.00834	98791.15	106095.99	2552.02
172	0.01809	98359.81	105568.29	2551.36	365	0.00600	98881.72	106156.33	2552.28
173	0.01801	98395.29	105512.89	2551.51	366	0.01424	98870.48	106167.01	2552.23
174	0.01762	98427.99	105462.57	2551.34	367	0.03428	98452.16	106231.04	2551.66
175	0.01036	98979.43	105419.31	2552.00	368	0.00802	98500.00	106185.41	2551.27

176	0.01603	98920.75	105590.36	2551.78	369	0.00662	98488.64	106173.65	2551.25
177	0.00909	99040.80	105588.05	2552.19	370	0.00747	98443.65	106147.19	2551.08
178	0.02035	98299.36	105512.93	2551.04	371	0.01117	98488.43	106104.40	2551.30
179	0.00768	98968.98	105442.04	2552.00	372	0.00769	98424.30	106127.71	2550.94
180	0.01118	98749.31	105299.19	2551.74	373	0.03331	98383.85	106166.58	2551.07
181	0.00558	98815.49	105269.05	2551.99	374	0.00832	98465.15	106080.02	2551.64
182	0.00643	98778.87	105253.15	2551.79	375	0.00987	98494.66	106061.17	2551.92
183	0.01896	98494.76	105214.16	2551.32	376	0.00685	98323.92	105954.25	2551.61
184	0.01625	98306.91	105761.26	2551.54	377	0.00693	98256.75	105583.33	2550.91
185	0.00292	99048.89	105721.46	2552.09	378	0.00571	98835.63	105816.39	2551.79
186	0.01492	98628.13	105721.85	2551.92	379	0.00817	98565.02	105105.03	2551.17
187	0.01300	98540.21	105708.17	2551.85	380	0.00915	99013.44	105912.05	2551.50
188	0.00411	98749.60	105201.46	2551.73	381	0.00277	98896.65	105876.30	2551.54
189	0.01207	98357.22	105426.92	2551.04	382	0.00457	98970.57	105694.23	2551.99
190	0.00915	98717.51	105348.53	2551.85	383	0.02224	99187.11	105515.72	2552.14
191	0.00226	98451.45	105281.45	2551.62	384	0.00329	97998.28	105976.57	2551.62
192	0.02301	98656.49	105163.28	2551.40	385	-4.39889	97865.69	105886.08	2551.41
193	0.00600	98573.29	105120.45	2551.30					

#### 9.1.4 Red Tumaco

ID	Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	y (m)	z (m)	ID	Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	y (m)	z (m)
1	0.00200	5681.85	1998.09	102.21	141	0.00137	5665.68	1324.50	102.79
2	0.00376	4264.15	1259.87	102.02	142	0.00149	6059.84	1483.34	102.75
3	0.00140	5653.29	2029.94	101.54	143	0.00062	6057.25	2176.60	102.53
4	0.00068	4279.87	1197.08	102.24	144	0.00699	4614.51	1467.38	102.75
5	0.00146	4267.27	1224.08	102.25	145	0.00355	5663.15	1888.86	102.75
6	0.00164	6375.31	1561.55	102.37	146	0.00368	6103.04	2415.12	102.89
7	0.00113	6343.68	1537.82	102.25	147	0.00126	4394.04	1399.68	102.79
8	0.00498	6387.62	1625.70	102.65	148	0.00353	5620.97	2073.40	102.80
9	0.00204	6316.44	1572.10	102.41	149	0.00110	5791.70	2098.05	102.75
10	0.00849	6283.12	1668.38	102.27	150	0.00143	5484.21	1899.09	102.81
11	0.00158	6302.38	1507.07	102.25	151	0.00164	5946.48	1340.98	103.00
12	0.00164	6257.56	1474.55	102.27	152	0.00231	5594.21	1331.07	102.88
13	0.00156	6275.25	1548.05	102.25	153	0.00325	6087.84	2198.38	102.85
14	0.00520	6215.16	1676.07	102.25	154	0.00086	5644.98	1546.86	102.81
15	0.00332	4869.00	1536.98	102.31	155	0.00089	4468.99	1390.75	102.95
16	0.00549	6130.78	2001.19	102.25	156	0.00117	5651.40	1537.29	103.00
17	0.00116	5938.05	2290.69	102.25	157	0.00463	5956.12	2349.21	102.97
18	0.00501	6095.79	2277.11	102.25	158	0.00350	6005.69	2370.68	102.83

19	0.00056	6080.04	2274.86	102.25	159	0.00092	4498.57	1416.15	102.97
20	0.00086	6074.88	2264.42	102.25	160	0.01108	4131.11	1406.71	102.25
21	0.00457	6036.00	1746.80	102.25	161	0.00140	6028.31	1426.96	103.05
22	0.00113	5642.31	2045.32	102.26	162	0.00231	6000.96	1407.77	103.00
23	0.00263	5916.11	2268.75	102.27	163	0.00092	5714.55	1540.06	102.84
24	0.00113	6030.30	2261.00	102.06	164	0.00185	5512.34	1933.54	102.75
25	0.00107	5990.57	2212.00	102.46	165	0.00171	5911.51	1871.82	102.75
26	0.00248	5924.26	1993.54	102.42	166	0.00242	4175.40	1391.25	102.33
27	0.00134	5866.73	1682.79	102.33	167	0.00510	4226.72	1445.38	102.74
28	0.00162	6252.91	1640.92	102.45	168	0.00167	5951.35	1872.50	103.00
29	0.00195	5735.06	2104.23	102.40	169	0.00140	5886.30	1421.22	103.00
30	0.00194	6207.47	1439.40	102.50	170	0.00373	5927.49	1466.53	103.00
31	0.00319	5867.83	1594.63	102.48	171	0.00198	5872.57	1421.22	103.00
32	0.00104	4342.22	1256.12	102.43	172	0.00095	5912.96	1843.06	103.22
33	0.00083	6085.89	2304.10	102.27	173	0.00128	4400.95	1383.43	103.14
34	0.00113	5981.09	2244.84	102.50	174	0.00338	6074.56	2153.31	103.13
35	0.00179	5883.97	2042.03	102.50	175	0.00437	4326.40	1483.72	102.20
36	0.00143	5847.72	2007.97	102.94	176	0.00068	4226.48	1416.62	102.50
37	0.00071	5875.31	1684.51	102.38	177	0.00053	4235.48	1412.66	102.50
38	0.00116	4256.95	1373.67	102.25	178	0.00882	5026.35	1667.20	103.10
39	0.00317	5919.02	1642.19	102.50	179	0.00098	4282.96	1439.05	102.47
40	0.00230	5936.92	2192.83	102.50	180	0.00068	4257.08	1416.98	102.37
41	0.00174	6235.59	1518.49	102.50	181	0.00050	4277.60	1429.58	102.44
42	0.00062	5998.54	2305.18	102.29	182	0.00080	5933.47	1852.54	103.08
43	0.00065	6009.91	2308.11	102.25	183	0.00056	4285.45	1430.25	102.39
44	0.00197	5986.88	1806.37	102.50	184	0.00807	4853.00	1589.96	103.09
45	0.00123	5969.13	2298.26	102.36	185	0.00104	4331.42	1194.94	102.84
46	0.00404	5235.28	1716.95	102.50	186	0.00179	4371.54	1474.90	102.09
47	0.00186	6184.62	1643.28	102.50	187	0.00101	4330.76	1448.19	102.26
48	0.00185	5858.10	2148.57	102.34	188	0.00113	5594.83	1382.21	103.14
49	0.00119	4341.31	1361.72	102.50	189	0.00080	5651.29	1507.95	103.49
50	0.00059	4350.80	1251.63	102.50	190	0.00083	5668.10	1507.35	103.43
51	0.00419	5219.99	1627.53	102.58	191	0.00173	5925.09	1754.88	103.23
52	0.00056	4325.83	1387.82	102.50	192	0.00152	5527.72	1994.96	103.36
53	0.00119	5975.65	1796.30	102.50	193	0.00245	5501.46	1978.50	103.25
54	0.00162	6225.45	1608.09	102.50	194	0.00401	5273.29	1828.87	103.25
55	0.00212	6167.93	1407.77	102.50	195	0.00107	5715.13	1508.94	103.25
56	0.00125	6192.99	1565.53	102.50	196	0.00723	5227.16	1801.07	103.25
57	0.00047	4310.75	1379.07	102.50	197	0.00308	5551.55	2012.77	103.31
58	0.00266	5328.78	1760.54	102.50	198	0.00182	5797.63	1458.09	103.26

59	0.00523	6107.36	1694.47	102.50	199	0.00236	5810.23	1412.74	103.25
60	0.00071	4341.34	1387.93	102.50	200	0.00186	5593.18	1446.06	103.25
61	0.00313	5475.86	1824.70	102.50	201	0.00080	4383.49	1434.83	102.50
62	0.00167	5856.51	2077.18	102.50	202	0.00116	5668.15	1450.03	103.29
63	0.00104	5803.38	1877.30	102.50	203	0.00107	4430.59	1458.03	102.46
64	0.00110	5834.32	1846.37	102.40	204	0.00074	4408.80	1443.27	102.88
65	0.00173	5787.63	1724.65	102.50	205	0.00248	4469.26	1481.23	102.06
66	0.00164	6087.08	1356.80	102.50	206	0.00195	5711.70	1454.01	103.25
67	0.00240	5863.28	1932.72	102.50	207	0.00367	5391.45	1906.24	103.37
68	0.00101	4233.05	1377.19	102.32	208	0.00329	4556.07	1478.40	103.27
69	0.00098	6178.47	1481.58	102.50	209	0.00098	4450.96	1423.54	103.29
70	0.00310	5985.38	1690.81	102.50	210	0.00171	5659.13	1386.80	103.26
71	0.00077	5757.64	2071.68	102.52	211	0.00228	5706.63	1395.43	103.46
72	0.00101	6038.03	2324.28	102.27	212	0.00233	5412.38	1919.44	103.25
73	0.00258	5562.86	1849.30	102.50	213	0.00350	6178.97	2013.62	102.50
74	0.00098	4356.51	1269.83	102.69	214	0.00356	5467.18	1699.09	102.75
75	0.00125	4304.75	1362.42	102.50	215	0.00452	5358.52	1668.23	102.26
76	0.00083	5733.48	2081.57	102.50	216	0.00113	4553.07	1445.59	102.75
77	0.00137	5828.44	2177.13	102.69	217	0.00215	5999.95	2149.56	102.50
78	0.00266	5799.04	2016.32	102.64	218	0.00122	5598.19	1507.65	103.12
79	0.00200	6062.08	1350.36	102.53	219	0.00191	5509.31	1341.64	102.75
80	0.00296	5705.33	2145.46	102.55	220	0.00289	5495.56	1438.90	103.00
81	0.00271	5762.59	1780.96	102.62	221	0.00155	5492.61	1492.94	102.75
82	0.00086	6033.81	2200.55	102.50	222	0.00194	5486.71	1545.01	102.50
83	0.00119	5779.53	1859.94	102.75	223	0.00290	5484.75	1601.01	102.50
84	0.00147	5857.08	1825.50	102.62	224	0.00146	5574.15	1547.95	103.00
85	0.00195	6121.09	1461.04	102.51	225	0.00137	5541.73	1492.94	103.25
86	0.00068	6064.66	1357.49	102.50	226	0.00224	5388.47	1433.01	102.61
87	0.00216	5794.63	2157.90	102.66	227	0.00170	5381.89	1484.98	102.50
88	0.00353	5875.31	1327.51	102.68	228	0.00341	5377.96	1537.64	102.50
89	0.00140	5716.85	1594.75	102.56	229	0.00311	5230.98	1525.06	102.29
90	0.00062	5716.49	1580.91	102.58	230	0.00197	5138.23	1328.57	102.35
91	0.12160	6146.65	2403.89	102.53	231	0.00314	5122.51	1418.96	102.65
92	0.00179	5792.67	1698.38	102.62	232	0.00367	5102.86	1513.27	102.75
93	0.00200	5798.43	1582.11	102.60	233	0.00210	5248.27	1334.86	102.04
94	0.00065	5993.64	2331.96	102.50	234	0.00301	5240.41	1424.46	102.75
95	0.00158	5882.18	1710.26	102.54	235	0.00182	5235.69	1483.41	102.50
96	0.00168	6149.93	1507.73	102.73	236	0.00347	5396.74	1327.08	102.25
97	0.00122	6095.79	2335.15	102.25	237	0.00252	5312.63	1483.56	102.75
98	0.00083	5715.93	1572.44	102.66	238	0.00255	5320.68	1429.23	102.90



99	0.00161	6104.34	2356.30	102.27	239	0.00449	4781.26	1424.33	102.57
100	0.00098	6031.00	2160.47	102.63	240	0.00227	4744.79	1381.57	102.65
101	0.00095	5819.66	2122.20	102.65	241	0.00191	4578.16	1396.03	102.25
102	0.00071	6064.08	2202.87	102.37	242	0.00209	4407.64	1194.82	102.33
103	0.00116	5293.50	1787.56	102.54	243	0.00152	4423.23	1237.58	102.11
104	0.00252	5443.68	1876.09	102.66	244	0.00179	4483.09	1357.80	102.69
105	0.00119	4214.77	1382.81	102.24	245	0.00089	4518.30	1410.12	102.76
106	0.00155	5643.33	1593.56	102.75	246	0.00323	4553.51	1262.73	102.31
107	0.00098	5880.01	1896.28	102.75	247	0.00183	4559.55	1286.87	102.25
108	0.00074	4302.32	1394.82	102.33	248	0.00186	4570.11	1334.66	102.25
109	0.00065	6014.13	2350.29	102.51	249	0.00326	4711.77	1205.74	102.42
110	0.00164	5731.01	1813.40	102.75	250	0.00203	4711.77	1234.03	102.25
111	0.00401	5810.58	2238.00	102.68	251	0.00143	4713.65	1290.62	102.50
112	0.00475	6002.47	2036.59	102.75	252	0.00086	4741.95	1322.69	102.63
113	0.00284	5732.57	1950.38	102.75	253	0.00095	4740.06	1340.30	102.54
114	0.00138	5746.57	1897.02	102.75	254	0.00218	4648.44	1285.54	102.46
115	0.00179	5719.18	1670.96	102.75	255	0.00221	4665.35	1329.80	102.38
116	0.00119	5753.25	2045.32	102.76	256	0.00264	4894.56	1406.19	102.50
117	0.00122	5768.94	1914.56	102.75	257	0.00260	4844.45	1336.43	102.42
118	0.01974	6214.65	2019.37	102.64	258	0.00218	4777.64	1327.59	102.50
119	0.00149	6159.35	1592.94	102.75	259	0.00141	4383.40	1245.40	102.50
120	0.00520	5084.79	1594.41	102.75	260	0.00131	4541.22	1337.33	102.25
121	0.00301	5544.38	1722.92	102.61	261	0.00080	4498.46	1378.58	102.62
122	0.00146	5524.29	1837.93	102.75	262	0.00329	4476.33	1216.10	102.01
123	0.00191	4389.55	1300.06	102.87	263	0.00243	5014.84	1328.77	102.50
124	0.00086	6119.01	1544.30	102.80	264	0.00346	5017.98	1414.45	102.37
125	0.00122	6117.84	1555.40	102.82	265	0.00284	5019.56	1498.54	102.50
126	0.00177	6080.05	1505.31	102.75	266	0.00347	5006.15	1573.54	102.75
127	0.00074	5869.68	1812.00	102.83	267	0.00116	5591.39	1593.68	102.75
128	0.00334	6051.07	1616.20	102.75	268	0.00224	5697.72	1669.83	102.54
129	0.00161	5698.51	1850.33	102.75	269	0.00065	5779.42	1524.10	103.01
130	0.00143	6079.90	1397.88	102.75	270	0.00383	4887.82	1461.98	102.10
131	0.00275	5703.10	1320.94	102.75	271	0.00174	4918.00	1354.13	102.00
132	0.00328	5592.91	1638.98	102.75	272	0.00164	4942.55	1349.30	102.20
133	0.00122	5581.97	1787.35	102.75	273	0.00203	4987.22	1331.19	102.25
134	0.00263	5610.53	1752.20	102.75	274	0.00164	5098.69	1322.74	102.50
135	0.00134	5594.06	1788.45	102.75	275	0.00167	5211.36	1337.63	102.50
136	0.00176	5317.23	1793.72	102.50	276	0.00176	5308.49	1320.61	102.26
137	0.00219	5804.55	1536.04	102.75	277	0.00197	5467.45	1339.52	102.50
138	0.00543	6021.38	1923.75	102.75	278	0.00116	4326.66	1184.48	103.57

139	0.00388	5994.77	1555.78	102.75	279	-0.7254	4297.00	1121.43	103.56
140	0.00215	5946.71	1325.11	102.91					

### 9.1.5 Red Tumaco modificado

ID	Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	y (m)	z (m)	ID	Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	y (m)	z (m)
1	0.00200	5681.85	1998.09	103.03	141	0.00137	5665.68	1324.50	102.45
2	0.00376	4264.15	1259.87	103.22	142	0.00149	6059.84	1483.34	102.49
3	0.00140	5653.29	2029.94	103.70	143	0.00062	6057.25	2176.60	102.71
4	0.00068	4279.87	1197.08	103.00	144	0.00699	4614.51	1467.38	102.49
5	0.00146	4267.27	1224.08	102.99	145	0.00355	5663.15	1888.86	102.49
6	0.00164	6375.31	1561.55	102.87	146	0.00368	6103.04	2415.12	102.35
7	0.00113	6343.68	1537.82	102.99	147	0.00126	4394.04	1399.68	102.45
8	0.00498	6387.62	1625.70	102.59	148	0.00353	5620.97	2073.40	102.44
9	0.00204	6316.44	1572.10	102.83	149	0.00110	5791.70	2098.05	102.49
10	0.00849	6283.12	1668.38	102.97	150	0.00143	5484.21	1899.09	102.43
11	0.00158	6302.38	1507.07	102.99	151	0.00164	5946.48	1340.98	102.24
12	0.00164	6257.56	1474.55	102.97	152	0.00231	5594.21	1331.07	102.36
13	0.00156	6275.25	1548.05	102.99	153	0.00325	6087.84	2198.38	102.39
14	0.00520	6215.16	1676.07	102.99	154	0.00086	5644.98	1546.86	102.43
15	0.00332	4869.00	1536.98	102.93	155	0.00089	4468.99	1390.75	102.29
16	0.00549	6130.78	2001.19	102.99	156	0.00117	5651.40	1537.29	102.24
17	0.00116	5938.05	2290.69	102.99	157	0.00463	5956.12	2349.21	102.27
18	0.00501	6095.79	2277.11	102.99	158	0.00350	6005.69	2370.68	102.41
19	0.00056	6080.04	2274.86	102.99	159	0.00092	4498.57	1416.15	102.27
20	0.00086	6074.88	2264.42	102.99	160	0.01108	4131.11	1406.71	102.99
21	0.00457	6036.00	1746.80	102.99	161	0.00140	6028.31	1426.96	102.19
22	0.00113	5642.31	2045.32	102.98	162	0.00231	6000.96	1407.77	102.24
23	0.00263	5916.11	2268.75	102.97	163	0.00092	5714.55	1540.06	102.40
24	0.00113	6030.30	2261.00	103.18	164	0.00185	5512.34	1933.54	102.49
25	0.00107	5990.57	2212.00	102.78	165	0.00171	5911.51	1871.82	102.49
26	0.00248	5924.26	1993.54	102.82	166	0.00242	4175.40	1391.25	102.91
27	0.00134	5866.73	1682.79	102.91	167	0.00510	4226.72	1445.38	102.50
28	0.00162	6252.91	1640.92	102.79	168	0.00167	5951.35	1872.50	102.24
29	0.00195	5735.06	2104.23	102.84	169	0.00140	5886.30	1421.22	102.24
30	0.00194	6207.47	1439.40	102.74	170	0.00373	5927.49	1466.53	102.24
31	0.00319	5867.83	1594.63	102.76	171	0.00198	5872.57	1421.22	102.24
32	0.00104	4342.22	1256.12	102.81	172	0.00095	5912.96	1843.06	102.02
33	0.00083	6085.89	2304.10	102.97	173	0.00128	4400.95	1383.43	102.10
34	0.00113	5981.09	2244.84	102.74	174	0.00338	6074.56	2153.31	102.11

35	0.00179	5883.97	2042.03	102.74	175	0.00437	4326.40	1483.72	103.04
36	0.00143	5847.72	2007.97	102.30	176	0.00068	4226.48	1416.62	102.74
37	0.00071	5875.31	1684.51	102.86	177	0.00053	4235.48	1412.66	102.74
38	0.00116	4256.95	1373.67	102.99	178	0.00882	5026.35	1667.20	102.14
39	0.00317	5919.02	1642.19	102.74	179	0.00098	4282.96	1439.05	102.77
40	0.00230	5936.92	2192.83	102.74	180	0.00068	4257.08	1416.98	102.87
41	0.00174	6235.59	1518.49	102.74	181	0.00050	4277.60	1429.58	102.80
42	0.00062	5998.54	2305.18	102.95	182	0.00080	5933.47	1852.54	102.16
43	0.00065	6009.91	2308.11	102.99	183	0.00056	4285.45	1430.25	102.85
44	0.00197	5986.88	1806.37	102.74	184	0.00807	4853.00	1589.96	102.15
45	0.00123	5969.13	2298.26	102.88	185	0.00104	4331.42	1194.94	102.40
46	0.00404	5235.28	1716.95	102.74	186	0.00179	4371.54	1474.90	103.15
47	0.00186	6184.62	1643.28	102.74	187	0.00101	4330.76	1448.19	102.98
48	0.00185	5858.10	2148.57	102.90	188	0.00113	5594.83	1382.21	102.10
49	0.00119	4341.31	1361.72	102.74	189	0.00080	5651.29	1507.95	101.75
50	0.00059	4350.80	1251.63	102.74	190	0.00083	5668.10	1507.35	101.81
51	0.00419	5219.99	1627.53	102.66	191	0.00173	5925.09	1754.88	102.01
52	0.00056	4325.83	1387.82	102.74	192	0.00152	5527.72	1994.96	101.88
53	0.00119	5975.65	1796.30	102.74	193	0.00245	5501.46	1978.50	101.99
54	0.00162	6225.45	1608.09	102.74	194	0.00401	5273.29	1828.87	101.99
55	0.00212	6167.93	1407.77	102.74	195	0.00107	5715.13	1508.94	101.99
56	0.00125	6192.99	1565.53	102.74	196	0.00723	5227.16	1801.07	101.99
57	0.00047	4310.75	1379.07	102.74	197	0.00308	5551.55	2012.77	101.93
58	0.00266	5328.78	1760.54	102.74	198	0.00182	5797.63	1458.09	101.98
59	0.00523	6107.36	1694.47	102.74	199	0.00236	5810.23	1412.74	101.99
60	0.00071	4341.34	1387.93	102.74	200	0.00186	5593.18	1446.06	101.99
61	0.00313	5475.86	1824.70	102.74	201	0.00080	4383.49	1434.83	102.74
62	0.00167	5856.51	2077.18	102.74	202	0.00116	5668.15	1450.03	101.95
63	0.00104	5803.38	1877.30	102.74	203	0.00107	4430.59	1458.03	102.78
64	0.00110	5834.32	1846.37	102.84	204	0.00074	4408.80	1443.27	102.36
65	0.00173	5787.63	1724.65	102.74	205	0.00248	4469.26	1481.23	103.18
66	0.00164	6087.08	1356.80	102.74	206	0.00195	5711.70	1454.01	101.99
67	0.00240	5863.28	1932.72	102.74	207	0.00367	5391.45	1906.24	101.87
68	0.00101	4233.05	1377.19	102.92	208	0.00329	4556.07	1478.40	101.97
69	0.00098	6178.47	1481.58	102.74	209	0.00098	4450.96	1423.54	101.95
70	0.00310	5985.38	1690.81	102.74	210	0.00171	5659.13	1386.80	101.98
71	0.00077	5757.64	2071.68	102.72	211	0.00228	5706.63	1395.43	101.78
72	0.00101	6038.03	2324.28	102.97	212	0.00233	5412.38	1919.44	101.99
73	0.00258	5562.86	1849.30	102.74	213	0.00350	6178.97	2013.62	102.74
74	0.00098	4356.51	1269.83	102.55	214	0.00356	5467.18	1699.09	102.49

75	0.00125	4304.75	1362.42	102.74	215	0.00452	5358.52	1668.23	102.98
76	0.00083	5733.48	2081.57	102.74	216	0.00113	4553.07	1445.59	102.49
77	0.00137	5828.44	2177.13	102.55	217	0.00215	5999.95	2149.56	102.74
78	0.00266	5799.04	2016.32	102.60	218	0.00122	5598.19	1507.65	102.12
79	0.00200	6062.08	1350.36	102.71	219	0.00191	5509.31	1341.64	102.49
80	0.00296	5705.33	2145.46	102.69	220	0.00289	5495.56	1438.90	102.24
81	0.00271	5762.59	1780.96	102.62	221	0.00155	5492.61	1492.94	102.49
82	0.00086	6033.81	2200.55	102.74	222	0.00194	5486.71	1545.01	102.74
83	0.00119	5779.53	1859.94	102.49	223	0.00290	5484.75	1601.01	102.74
84	0.00147	5857.08	1825.50	102.62	224	0.00146	5574.15	1547.95	102.24
85	0.00195	6121.09	1461.04	102.73	225	0.00137	5541.73	1492.94	101.99
86	0.00068	6064.66	1357.49	102.74	226	0.00224	5388.47	1433.01	102.63
87	0.00216	5794.63	2157.90	102.58	227	0.00170	5381.89	1484.98	102.74
88	0.00353	5875.31	1327.51	102.56	228	0.00341	5377.96	1537.64	102.74
89	0.00140	5716.85	1594.75	102.68	229	0.00311	5230.98	1525.06	102.95
90	0.00062	5716.49	1580.91	102.66	230	0.00197	5138.23	1328.57	102.89
91	0.12160	6146.65	2403.89	102.71	231	0.00314	5122.51	1418.96	102.59
92	0.00179	5792.67	1698.38	102.62	232	0.00367	5102.86	1513.27	102.49
93	0.00200	5798.43	1582.11	102.64	233	0.00210	5248.27	1334.86	103.20
94	0.00065	5993.64	2331.96	102.74	234	0.00301	5240.41	1424.46	102.49
95	0.00158	5882.18	1710.26	102.70	235	0.00182	5235.69	1483.41	102.74
96	0.00168	6149.93	1507.73	102.51	236	0.00347	5396.74	1327.08	102.99
97	0.00122	6095.79	2335.15	102.99	237	0.00252	5312.63	1483.56	102.49
98	0.00083	5715.93	1572.44	102.58	238	0.00255	5320.68	1429.23	102.34
99	0.00161	6104.34	2356.30	102.97	239	0.00449	4781.26	1424.33	102.67
100	0.00098	6031.00	2160.47	102.61	240	0.00227	4744.79	1381.57	102.59
101	0.00095	5819.66	2122.20	102.59	241	0.00191	4578.16	1396.03	102.99
102	0.00071	6064.08	2202.87	102.87	242	0.00209	4407.64	1194.82	102.91
103	0.00116	5293.50	1787.56	102.70	243	0.00152	4423.23	1237.58	103.13
104	0.00252	5443.68	1876.09	102.58	244	0.00179	4483.09	1357.80	102.55
105	0.00119	4214.77	1382.81	103.00	245	0.00089	4518.30	1410.12	102.48
106	0.00155	5643.33	1593.56	102.49	246	0.00323	4553.51	1262.73	102.93
107	0.00098	5880.01	1896.28	102.49	247	0.00183	4559.55	1286.87	102.99
108	0.00074	4302.32	1394.82	102.91	248	0.00186	4570.11	1334.66	102.99
109	0.00065	6014.13	2350.29	102.73	249	0.00326	4711.77	1205.74	102.82
110	0.00164	5731.01	1813.40	102.49	250	0.00203	4711.77	1234.03	102.99
111	0.00401	5810.58	2238.00	102.56	251	0.00143	4713.65	1290.62	102.74
112	0.00475	6002.47	2036.59	102.49	252	0.00086	4741.95	1322.69	102.61
113	0.00284	5732.57	1950.38	102.49	253	0.00095	4740.06	1340.30	102.70
114	0.00138	5746.57	1897.02	102.49	254	0.00218	4648.44	1285.54	102.78

115	0.00179	5719.18	1670.96	102.49	255	0.00221	4665.35	1329.80	102.86
116	0.00119	5753.25	2045.32	102.48	256	0.00264	4894.56	1406.19	102.74
117	0.00122	5768.94	1914.56	102.49	257	0.00260	4844.45	1336.43	102.82
118	0.01974	6214.65	2019.37	102.60	258	0.00218	4777.64	1327.59	102.74
119	0.00149	6159.35	1592.94	102.49	259	0.00141	4383.40	1245.40	102.74
120	0.00520	5084.79	1594.41	102.49	260	0.00131	4541.22	1337.33	102.99
121	0.00301	5544.38	1722.92	102.63	261	0.00080	4498.46	1378.58	102.62
122	0.00146	5524.29	1837.93	102.49	262	0.00329	4476.33	1216.10	103.23
123	0.00191	4389.55	1300.06	102.37	263	0.00243	5014.84	1328.77	102.74
124	0.00086	6119.01	1544.30	102.44	264	0.00346	5017.98	1414.45	102.87
125	0.00122	6117.84	1555.40	102.42	265	0.00284	5019.56	1498.54	102.74
126	0.00177	6080.05	1505.31	102.49	266	0.00347	5006.15	1573.54	102.49
127	0.00074	5869.68	1812.00	102.41	267	0.00116	5591.39	1593.68	102.49
128	0.00334	6051.07	1616.20	102.49	268	0.00224	5697.72	1669.83	102.70
129	0.00161	5698.51	1850.33	102.49	269	0.00065	5779.42	1524.10	102.23
130	0.00143	6079.90	1397.88	102.49	270	0.00383	4887.82	1461.98	103.14
131	0.00275	5703.10	1320.94	102.49	271	0.00174	4918.00	1354.13	103.24
132	0.00328	5592.91	1638.98	102.49	272	0.00164	4942.55	1349.30	103.04
133	0.00122	5581.97	1787.35	102.49	273	0.00203	4987.22	1331.19	102.99
134	0.00263	5610.53	1752.20	102.49	274	0.00164	5098.69	1322.74	102.74
135	0.00134	5594.06	1788.45	102.49	275	0.00167	5211.36	1337.63	102.74
136	0.00176	5317.23	1793.72	102.74	276	0.00176	5308.49	1320.61	102.98
137	0.00219	5804.55	1536.04	102.49	277	0.00197	5467.45	1339.52	102.74
138	0.00543	6021.38	1923.75	102.49	278	0.00116	4326.66	1184.48	101.67
139	0.00388	5994.77	1555.78	102.49	279	-0.72546	4297.00	1121.43	101.68
140	0.00215	5946.71	1325.11	102.33					