**TESIS II DE MAESTRÍA**

# COMPARACIÓN ENTRE DISEÑOS DE RDAPs PRESENTADOS EN EL MECANISMO DE VIABILIZACIÓN DE PROYECTOS DEL MVCT Y LOS DISEÑOS OPTIMIZADOS DE LAS MISMAS REDES

**Jorge Iván Pérez Alvarino**

**Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama**

**Coasesor: Carlos David Peinado Calao**

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

# AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso por la vida, la salvación en Cristo y la salud,

A mis padres Jorge y Alba por su amor y apoyo incondicional,

Al Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la información requerida para este trabajo,

A mis asesores Juan y Carlos por su dirección en aspectos académicos y personales,

A mis jurados por sus cuestionamientos y aportes constructivos,

A mi familia, amigos y compañeros por sus palabras de aliento y compañía,

A Kevin Vargas por su amistad, paciencia y constante colaboración,

A todos los que de alguna u otra forma facilitaron la realización de este trabajo.

# 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 Diseño optimizado ..... 4
2.1.1 Metodología OPUS ..... 5
2.1.2 Algoritmos genéticos ..... 6
2.2 Ecuaciones de costo ..... 6
2.3 Resiliencia de RDAPs ..... 8
2.4 Normativa de diseño de RDAPs ..... 9
2.4.1 Normativa nacional ..... 9
2.4.2 Normativa a nivel internacional ..... 13
**3 Metodología** ..... 15
3.1 Construcción base de datos de RDAPs ..... 15
3.2 Selección de funciones de costo ..... 16
3.3 Modificación del programa REDES ..... 17
3.4 Diseño optimizado de RDAPs de base de datos ..... 17
3.4.1 Configuración de metodologías de Diseño ..... 18
3.4.2 Escenarios de diseño ..... 21
3.5 Comparación entre diseños reales y diseños optimizados ..... 22
3.5.1 Comparación y análisis de costos ..... 22
3.5.2 Comparación y análisis de resiliencia ..... 24
**4 Resultados** ..... 25
4.1 Red La Esperanza ..... 26
4.2 Red La Arenosa ..... 27

4.3 Malecón Rodadero ..... 29
4.4 Piñuelas ..... 30
4.5 Apulo ..... 32
4.6 Argüello Alto y Bajo ..... 33
4.7 Trinidad ..... 35
4.8 Mesolandia ..... 37
4.9 Chuscalito ..... 38
4.10 Alpujarra ..... 40
4.11 Naranjales ..... 42
4.12 Puerto Esperanza ..... 43
4.13 Puerto Rico ..... 45
4.14 San Juan del Soco ..... 46
4.15 San Pedro de Tipisca ..... 47
4.16 Resumen de resultados ..... 48
**5 Análisis de resultados** ..... 52
5.1 Análisis de Costos ..... 52
5.1.1 Selección de una única lista de ecuaciones de costo ..... 52
5.1.2 Variación de costos ..... 53
5.1.3 Variación porcentual de costos ..... 56
5.2 Análisis de Resiliencia ..... 61
5.3 Análisis de velocidades y presiones máximas ..... 65
5.4 Análisis de incertidumbre ..... 65
5.5 Prácticas de diseño de RDAPs ..... 66
**6 Conclusiones** ..... 67
**7 Recomendaciones** ..... 69
**8 Referencias** ..... 70
**9 Anexos** ..... 73

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Pasos de metodología OPUS. Adaptado de Saldarriaga et al. (2012) ..... 5

Figura 2.2. Esquema del algoritmo genético definido por Oliker & Ostfeld (2013) como parte de un proceso de diseño optimizado multiobjetivo. ..... 6

Figura 3.1. Interfaz de cálculo de costos antes de la modificación del programa REDES. ..... 17

Figura 3.2. Interfaz de cálculo de costos después de modificación del programa REDES. ..... 17

Figura 3.3. Ventana de ajuste de parámetros de diseño optimizado en REDES. ..... 18

Figura 3.4. Opciones de diseño mediante metodología OPUS. ..... 19

Figura 3.5. Definición de otros parámetros necesarios para el diseño optimizado con la metodología OPUS. ..... 20

Figura 3.6. Opciones de diseño con Algoritmos Genéticos en OPUS. ..... 20

Figura 3.7. Otros parámetros de la metodología de algoritmos genéticos. ..... 21

Figura 4.1. Topología del modelo de la red La Esperanza. ..... 26

Figura 4.2. Topología del modelo de la red La Arenosa. ..... 28

Figura 4.3. Topología original del modelo de la red Malecón Rodadero. ..... 29

Figura 4.4. Topología modificada del modelo la red Malecón Rodadero. ..... 29

Figura 4.5. Topología original del modelo de la red de Piñuelas. ..... 31

Figura 4.6. Topología modificada del modelo de la red de Piñuelas. ..... 31

Figura 4.7. Topología original del modelo de la red Apulo. ..... 32

Figura 4.8. Topología modificada del modelo de la red Apulo. ..... 33

Figura 4.9. Topología original del modelo de la red Argüello Alto y Bajo. ..... 34

Figura 4.10. Topología modificada del modelo de la red Arguello Alto y Bajo. ..... 34

Figura 4.11. Topología original del modelo de la red Trinidad. ..... 36

Figura 4.12. Topología modificada del modelo de la red Trinidad. ..... 36

Figura 4.13. Topología original del modelo de la red Mesolandia. ..... 37

Figura 4.14. Topología modificada del modelo de la red Mesolandia. ..... 38

Figura 4.15. Topología original del modelo de la red Chuscalito. ..... 39

Figura 4.16. Topología modificada del modelo de la red Chuscalito. ..... 39

Figura 4.17. Topología original del modelo de la red de Alpujarra. ..... 41

Figura 4.18. Topología modificada del modelo de la red de Alpujarra. ..... 41
Figura 4.19. Topología de la sección de la red Alpujarra diseñada optimizadamente ..... 41
Figura 4.20. Topología del modelo de la red Naranjales. ..... 43
Figura 4.21. Topología del modelo de la red Puerto Esperanza. ..... 44
Figura 4.22. Topología del modelo de la red Puerto Rico. ..... 45
Figura 4.23. Topología del modelo de la red San Juan del Soco. ..... 46
Figura 4.24. Topología del modelo de la red San Pedro de Tipisca. ..... 47

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 5.1 Costo original de las redes de acuerdo con la ecuación de Peinado (2016). ..... 54
Gráfica 5.2. Ahorro porcentual del costo logrado en cada una de las redes. ..... 55
Gráfica 5.3 Ahorro total logrado con la implementación de las metodologías OPUS y AG. ..... 56
Gráfica 5.4. Relación entre cambio porcentual en costos y población. ..... 58
Gráfica 5.5. Relación entre cambio porcentual en costos y caudal. ..... 59
Gráfica 5.6. Relación entre cambio porcentual en costos y superficie. ..... 60
Gráfica 5.7. Relación entre cambio porcentual en costos y volumen. ..... 60
Gráfica 5.8. Relación entre cambio porcentual en resiliencia y población. ..... 63
Gráfica 5.9. Relación entre cambio porcentual en resiliencia y caudal. ..... 63
Gráfica 5.10. Relación entre cambio porcentual en resiliencia y superficie. ..... 64
Gráfica 5.11. Relación entre cambio porcentual en resiliencia y volumen. ..... 64

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Modelos de ecuaciones de costos utilizados por Marchionni et al. (2016). ..... 7
Tabla 2.2. Presiones mínimas de diseño establecidas en el RAS 2000. ..... 10
Tabla 2.3. Diámetros internos mínimos de tuberías de RDAP establecidas por el RAS 2000. ..... 10
Tabla 2.4. Parámetros de diseño de RDAPs de la normativa de EPM. ..... 12
Tabla 2.5. Parámetros de diseño de RDAPs de la normativa EAAB. ..... 13
Tabla 3.1. Escenarios de diseño con la metodología OPUS. ..... 22
Tabla 4.1. Identificación de los proyectos pertenecientes a la base de datos. ..... 25
Tabla 4.2. Costos y resiliencia del diseño de La Esperanza con la ecuación de Peinado (2016). ..... 27
Tabla 4.3. Costos y resiliencia del diseño de La Esperanza con la ecuación de Marchionni et al. (2016). ..... 27
Tabla 4.4. Costos y resiliencia del diseño de La Arenosa con la ecuación de Peinado (2016). ..... 28
Tabla 4.5. Costos y resiliencia del diseño de La Arenosa con la ecuación de Marchionni et al. (2016). ..... 28
Tabla 4.6. Costo y resiliencia del diseño de El Malecón Rodadero con ecuación de Peinado (2016). ..... 30
Tabla 4.7. Costo y resiliencia del diseño de Piñuelas con ecuación de Peinado (2016). ..... 32
Tabla 4.8. Costo y resiliencia del diseño de Apulo con ecuación de Peinado (2016). ..... 33
Tabla 4.9. Costo y resiliencia del diseño de Argüello Alto y Bajo con ecuaciones de Peinado (2016). ..... 35
Tabla 4.10. Costo y resiliencia del diseño de Trinidad con ecuaciones de Peinado (2016). ..... 37
Tabla 4.11. Costo y resiliencia del diseño de Mesolandia con ecuaciones de Peinado (2016). ..... 38
Tabla 4.12. Costo y resiliencia del diseño de Chuscalito con ecuaciones de Peinado (2016). ..... 40
Tabla 4.13. Costo y resiliencia del diseño de Alpujarra con ecuación de Peinado (2016). ..... 42
Tabla 4.14. Costo y resiliencia del diseño de Naranjales con ecuación de Peinado (2016). ..... 43
Tabla 4.15. Costo y resiliencia del diseño de Puerto Esperanza con ecuación de Peinado (2016). ..... 44
Tabla 4.16. Costo y resiliencia del diseño de Puerto Rico con ecuación de Peinado (2016). ..... 46
Tabla 4.17. Costo y resiliencia del diseño de San Juan del Soco con ecuación de Peinado (2016). ..... 47
Tabla 4.18. Costo y resiliencia del diseño de San Pedro de Tipisca con ecuación de Peinado (2016). ..... 48
Tabla 4.19. Parámetros de diseño de las redes de la base de datos. ..... 48
Tabla 4.20. Características de las redes presentadas en el MVCT. ..... 49
Tabla 4.21. Resultados de costo para la red original y los diseños optimizados aplicando la ecuación de Peinado (2016). ..... 49

Tabla 4.22 Diferencias entre los costos originales y los costos de las redes optimizadas mediante cada metodología. ..... 50

Tabla 4.23. Resultados de resiliencia para la red original y los diseños optimizados aplicando la ecuación de Peinado (2016). ..... 50

Tabla 4.24 Diferencias entre la resiliencia original y la resiliencia de las redes optimizadas mediante cada metodología. ..... 51

Tabla 4.25. Presiones y velocidades máximas de las redes originales y las diseñadas mediante la metodología OPUS. ..... 51

Tabla 5.1. Verificación de validez de ecuaciones de Peinado (2016). ..... 53

Tabla 5.2. Resultados de variables para análisis de variación porcentual de costos. OPUS. ..... 56

Tabla 5.3. Resultados de variables para análisis de variación porcentual de costos. AG ..... 57

Tabla 5.4. Resultados de variables para análisis de variación porcentual de resiliencia. OPUS. ..... 61

Tabla 5.5. Resultados de variables para análisis de variación porcentual de resiliencia. AG ..... 61

# ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Costo total de suministro e instalación de una red. ..... 8
Ecuación 2.2. Índice de resiliencia de Todini (2000). ..... 8
Ecuación 2.3. Índice de resiliencia de modificado por Jayaram & Srinivasan (2008). ..... 9
Ecuación 3.1. Función de costos para tuberías de PE 100/PN 10 según Marchionni et al. (2016). ..... 16
Ecuación 3.2. Función de costos para tuberías de PVC según Marchionni et al. (2016). ..... 16
Ecuación 3.3. Función de costos para tuberías de PE 100/PN 10 según Peinado (2016). ..... 16
Ecuación 3.4. Función de costos para tuberías de PVC RDE 32.5 según Peinado (2016). ..... 16
Ecuación 3.5. Función de costos para tuberías de PVC RDE 26 según Peinado (2016). ..... 16
Ecuación 3.6. Función de costos para tuberías de PVC RDE 21 según Peinado (2016). ..... 16
Ecuación 3.7. Volumen interno ocupado por una red. ..... 23
Ecuación 3.8. Superficie interna de una red. ..... 23
Ecuación 3.9. Diferencia porcentual entre costo de diseño presentado en MVCT y costo de diseño optimizado. ..... 23
Ecuación 3.10. Diferencia porcentual de costos per cápita. ..... 23
Ecuación 3.11. Diferencia porcentual de costos por unidad de volumen interno de la red. ..... 23
Ecuación 3.12. Diferencia porcentual entre resiliencia de diseño presentado en MVCT y resiliencia de diseño optimizado. ..... 24
Ecuación 3.13. Diferencia porcentual de costos per cápita. ..... 24
Ecuación 3.14. Diferencia porcentual de costos por unidad de volumen interno de la red. ..... 24

# 1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo del de sector agua y saneamiento básico ha sido uno de los principales objetivos de los planes de desarrollo de los últimos gobiernos de Colombia. Sin embargo, los recursos de inversión son escasos, lo cual limita los proyectos que pueden ser ejecutados en este sector. En muchos casos, las instituciones locales y regionales requieren apoyo financiero del gobierno central para llevar a cabo proyectos que mejoren la provisión de servicios de acueducto y alcantarillado para sus comunidades. Por esta razón, el gobierno central ha regulado la presentación, factibilidad, evaluación y aprobación de proyectos del sector agua y saneamiento básico para optimizar la asignación de recursos nacionales para la inversión en proyectos locales y regionales. El Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT) de Colombia es la institución a cargo de esta regulación a través de la expedición de normativas y de la implementación de un mecanismo estandarizado de evaluación, exclusivo para proyectos de este sector. Este mecanismo considera aspectos técnicos, financieros, legales y socioeconómicos de los proyectos y determina cuál de estos es viable para ejecución con recursos de la nación. Este último recibe el nombre de Mecanismo de Viabilización de Proyectos y se encuentra adscrito al Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.

En particular, la construcción de nuevas Redes de Distribución de Agua Potable (RDAPs) en áreas urbanas y rurales de Colombia ha sido parte de las acciones llevadas a cabo en búsqueda del desarrollo deseado del sector agua y saneamiento básico. Tradicionalmente, estas redes han sido diseñadas mediante el método de prueba y error basado en la experiencia del diseñador y en las restricciones establecidas por la normativa del sector. Debido a que este método no implementa criterios formales de optimización económica, las RDAPs en Colombia resultan ser hidráulicamente factibles, pero no garantizan la minimización de los costos asociados con su construcción, operación y mantenimiento. Por lo tanto, la filosofía tradicional de diseño parece no ser efectiva para abordar la problemática asociada con la escasez de recursos de inversión y el gran interés en la construcción de nuevas RDAPs en Colombia. No obstante, hoy en día existen muchas metodologías de optimización de diseño que pueden ser aplicadas con éxito en la solución de este problema. De acuerdo con Saldarriaga (2016), gracias a la existencia de las nuevas metodologías de optimización, el problema del diseño optimizado de RDAPs puede considerarse resuelto (siempre y cuando solo se considere la minimización de los costos de construcción como objetivo de diseño). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es cuantificar el impacto que la aplicación de diseño optimizado de RDAPs tendría en los costos y resiliencia de las RDAPs en Colombia. Para esto, se compara una muestra de diseños de RDAPs presentados en el Mecanismo de Viabilización de Proyectos del MVCT con los diseños optimizados de las mismas redes.

Los diseños optimizados de las redes se logran a través de dos metodologías: Optimal Power Use Surface (OPUS) y Algoritmos Genéticos (AG). La comparación entre las redes se realizará en términos

de costos y resiliencia, teniendo en cuenta características de las redes analizadas, tales como: espacio ocupado, cantidad de material utilizado en su construcción, población servida y caudal suministrado. Los costos de las redes serán estimados mediante ecuaciones de costos encontradas en la literatura y aplicables a las condiciones de las redes estudiadas. La resiliencia será estimada mediante el índice de Todini (2000).

En este trabajo se presenta una base de datos conformada con una muestra de RDAPs presentadas en el Mecanismo de Viabilización de Proyectos del MVCT. Se muestran los costos de los diseños de la base de datos y los costos de los diseños optimizados de dichas redes. Se muestra la disminución de costos a través del cálculo de la variación porcentual entre los costos de suministro e instalación de tuberías de las redes antes y después del diseño optimizado. De manera análoga, se presenta el resultado del cálculo de la resiliencia de las redes de la base de datos y de los diseños optimizados de dichas redes. Así como también la variación porcentual de la resiliencia a causa del diseño optimizado. Por último, la disminución de los costos y la variación de la resiliencia se relacionan con el volumen interno, la superficie interna de las redes, la población servida y el caudal suministrado por cada red.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

Realizar una comparación de costos y resiliencia entre los diseños de RDAPs presentados en el Mecanismo de Viabilización de Proyectos del MVCT y los diseños optimizados de las mismas redes para cuantificar el impacto generado si se aplicara la optimización en el diseño de RDAPs en Colombia.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Construir una base de datos con información hidráulica y topológica de una muestra representativa de los diseños de nuevas RDAPs presentados en el Mecanismo de Viabilización de Proyectos del MVCT.
- Realizar el diseño optimizado de las RDAPs de la base de datos mediante la implementación de dos metodologías basadas en la minimización de costos y cumplimiento de restricciones hidráulicas: OPUS y Algoritmos Genéticos.
- Estimar los costos de las redes de la base de datos y de los diseños optimizados de las mismas mediante ecuaciones de costos encontradas en la literatura.
- Cuantificar la resiliencia de las redes de la base de datos y de los diseños optimizados.
- Identificar impactos sobre el costo y resiliencia de los diseños presentados en el Mecanismo de Viabilización de Proyectos en contraposición con los costos y resiliencia de los diseños optimizados de esas mismas redes.
- Realizar una crítica a la normativa colombiana concerniente a la regulación de los diseños de nuevas redes de distribución de agua potable en cuanto a la exigencia del diseño optimizado de estas redes.

# 2 MARCO TEÓRICO

El objetivo de esta sección no es realizar una descripción exhaustiva de la teoría aplicada durante el desarrollo de esta investigación, sino describir, con el nivel de detalle suficiente, los conceptos y ecuaciones tenidos en cuenta a fin de permitir la compresión del desarrollo de la metodología aplicada y los resultados encontrados en este trabajo. De la misma manera, se espera que este marco teórico permita vislumbrar con mayor claridad la importancia del diseño optimizado de las RDAPs en países en vía de desarrollo como lo es Colombia. No obstante, en cada componente del marco teórico se relacionan las citas de los trabajos en los cuáles se puede ampliar la información referente a cada uno de los conceptos y ecuaciones contempladas.

## 2.1 Diseño optimizado

El diseño optimizado de RDAPs ha sido abordado tradicionalmente como un problema de minimización de costos, restringido adicionalmente por limitaciones hidráulicas destinadas a garantizar un nivel aceptable de servicio al cliente (Laucelli et al., 2009). Los costos que se quieren minimizar pueden estar asociados con la construcción, expansión, rehabilitación, reparación y/o la operación de la RDAP. Sin embargo, comúnmente se encuentra que la función de costos de la RDAP está asociada únicamente con los costos de construcción. A su vez, estos costos de construcción se suelen establecer solo con base en el costo de adquisición e instalación de las tuberías. Por su parte, las restricciones hidráulicas que limitan el diseño optimizado de RDAP suelen estar definidas de acuerdo con las necesidades que tengan los usuarios de la red. En particular, las presiones de servicio y los caudales demandados son los parámetros que restringen hidráulicamente el diseño de la RDAP. De acuerdo con la aproximación tradicional al diseño optimizado, este puede describirse de la siguiente manera:

$$Minimizar\ C = \sum_{i=1}^{n} f_i(x_i)$$

$$s.a.$$

$$P_j \geq P_{min}$$

$$Q_j \geq Qd_j$$

$$D_k \in (Dc_{min}, Dc_{max})$$

Donde $C$ = costo total de la red; $x_i$ = variable asociada al costo; $f_i$ = función de costo asociada a cada variable $x_i$; $P_j$ = presión de servicio en cada nodo de la red; $P_{min}$ = presión mínima de diseño; $Q_j$ = caudal entregado en cada nodo de la red; $Qd_j$ = caudal demandado en cada nodo de la red.

Adicionalmente, los diámetros de las tuberías se encuentran restringidos por la oferta comercial. Esta oferta se resume en una lista discreta de diámetros de tuberías que las compañías producen.

Solicitar una tubería con un diámetro distinto al contenido en la lista de oferta de una compañía puede llegar a ser tan costoso como para que no sea factible esta posibilidad. Sin embargo, a pesar de la limitación del número de diámetros posibles para las tuberías de la red, la cantidad de posibles configuraciones del diseño de una red puede llegar a ser muy alto. Yates et al. (1984) demostraron que el diseño optimizado es un problema NP-duro, por lo cual solo se pueden utilizar métodos aproximados exitosamente para su solución. Por esta razón, se han desarrollado diversas metodologías para dar solución al diseño optimizado de RDAPs, algunas de carácter estocástico y otras determinísticas. Algunas de las metodologías de diseño optimizado destacadas hoy en día son: Harmony Search (Geem, 2009), Honey-Bee Mating (Mohan & Babu, 2010), Annealing Approach (Cunha & Sousa, 1999), Optimal Power Surface Use (OPUS), Algoritmos Genéticos (AG), etc. A continuación, se describe la metodología OPUS y AG, puesto que son las utilizadas en esta investigación.

### 2.1.1 Metodología OPUS

La metodología Superficie de Uso Óptimo de Potencia (OPUS) fue desarrollada por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de los Andes con base en el trabajo de Wu (1975). OPUS puede catalogarse como determinística, basada enteramente en principios hidráulicos. Su objetivo es minimizar los costos de la red mediante el establecimiento de formas eficientes de disipación de energía y distribución del flujo a lo largo del sistema. Esta metodología fue introducida por primera vez por Saldarriaga et al. (2010) y ha demostrado un gran desempeño de optimización en cuanto a la evaluación de la función objetivo y el bajo costo computacional que requiere su implementación. De manera general, OPUS consiste en seis pasos:

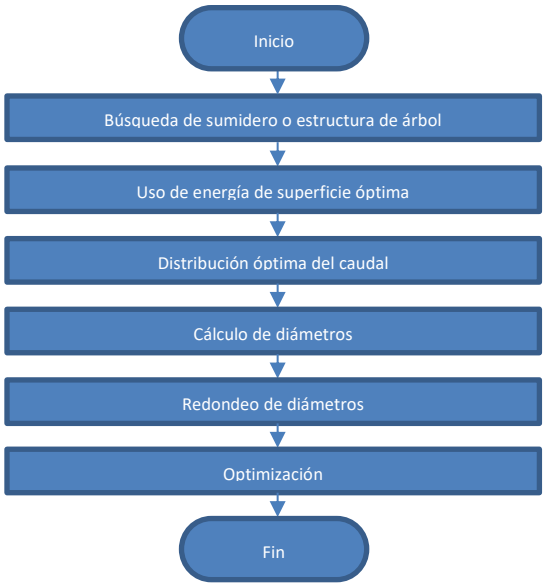



**Figura 2.1. Pasos de metodología OPUS. Adaptado de Saldarriaga et al. (2012)**

### 2.1.2 Algoritmos genéticos

Los Algoritmos Genéticos son un método de búsqueda aleatoria que simula el proceso de la selección natural de la teoría de la evolución de las especies. De acuerdo con Saldarriaga (2016), los AG son métodos de optimización combinatoria usados ampliamente en los últimos años para el diseño óptimo de RDAP. Debido a su carácter estocástico esta metodología no garantiza el encuentro la solución óptima global ni tampoco un resultado óptimo local. Aun así, se consideran eficientes en la búsqueda dentro de espacios de solución tan complejos como el del diseño optimizado de RDAPs (Simpson et al., 1994). A continuación, se muestra un diagrama que explica una metodología que contempla AG en un proceso de diseño optimizado multiobjetivo:

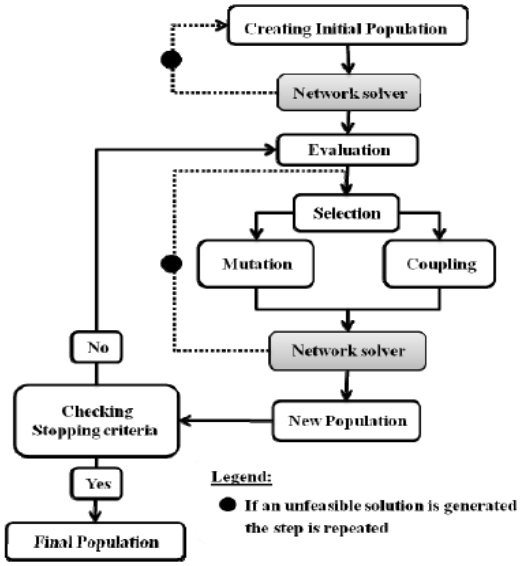



**Figura 2.2. Esquema del algoritmo genético definido por Oliker & Ostfeld (2013) como parte de un proceso de diseño optimizado multiobjetivo.**

## 2.2 Ecuaciones de costo

Existen diversas ecuaciones para estimar los costos de construcción, expansión y rehabilitación y reparación de componentes de RDAP. Generalmente estas ecuaciones son determinadas mediante regresiones que tienen en cuenta el material del componente analizado y el costo de la actividad asociada con este componente (suministro, instalación, reparación, etc.). En 2002 Clark et al. presentaron ecuaciones para estimar el costo de construcción, expansión, rehabilitación y reparación de RDAP con base en los componentes del sistema. Se desarrollaron ecuaciones para cuantificar el costo de instalación de nuevas tuberías, zanjas, incrustaciones y otras operaciones unitarias requeridas para reemplazar o construir nuevos componentes de sistemas de RDPA. En este estudio se tuvieron en consideración materiales de tubería tales como hierro dúctil, asbesto cemento, PVC, concreto, entre otros. Los modelos de costos fueron determinados con base en

información de costos de RDAPs en Estados Unidos que fue recopilada por la Water Supply and Water Resources Division of the U.S. Environmental Protection Agency. La forma general del modelo de costos desarrollado por Clark et al. (2002) se presenta a continuación:

$$y = a + b(x^c) + d(u^e) + f(xu)$$

Donde $y =$ costo de un componente particular $(\$/ft)$; $x =$ parámetro de diseño (el diámetro, por ejemplo); $u =$ variable indicador; y $a, b, c, d, e, f$ son parámetros estimados mediante técnicas de regresión.

Así mismo, Marchionni et al. (2016) estableció una metodología integral y robusta para la estimación de funciones de costo mediante la implementación de técnicas de regresión lineal múltiple. Mediante la implementación de dicha metodología estos autores determinaron funciones de costo para tuberías y otros componentes de las RDAPs. Dichas funciones de costo fueron determinadas con base en variables hidráulicas (caudal, altura de bombeo, potencia de bombeo) y variables físicas (volumen, material, diámetro). Para este trabajo los materiales de tuberías considerados fueron hierro dúctil, polietileno de alta densidad y PVC. Se utilizó información de RDAPs de Portugal para para determinar las funciones de costo presentadas en este trabajo. El costo de construcción de las tuberías de las redes matrices y redes de distribución se estableció como función del diámetro nominal de las tuberías. A continuación, se muestran los modelos de ecuaciones utilizados por Marchionni et al. (2016).

**Tabla 2.1. Modelos de ecuaciones de costos utilizados por Marchionni et al. (2016).**

| Asset | Variables | Analysis | Model equation |
|---|---|---|---|
| Ground storage tank | $Y_i$: $C_{cw} - C_e$ (€/m³); $X_i$: $V$ (m³) | SLR | $Y_i = \alpha_0 \cdot X_i^{\alpha_1} \rightarrow \ln Y_i = \ln \alpha_0 + \alpha_1 \ln X_i$ |
| Elevated tank | $Y_i$: $C_{cw} - C_e$ [€/(m³ m)]; $X_{1i}$: $V$ (m³)·$X_{2i}$: $h$ (m) | MLR | $Y_i = \beta_0 \cdot X_{1i}^{\beta_1} \cdot X_{2i}^{\beta_2} \rightarrow \ln Y_i = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln X_{1i} + \beta_2 \ln X_{2i}$ |
| Pumping station | $Y_i$: $C_{cw} - C_e$ (€/kW); $X_i$: $P_h$ (kW) | SLR | $Y_i = \gamma_0 \cdot X_i^{\gamma_1} \rightarrow \ln Y_i = \ln \gamma_0 + \gamma_1 \ln X_i$ |
| Transmission/distribution pipes | $Y_i$: $C_{Pipe}$ (€/m); $X_i$: $D$ (mm) | SLR | $Y_i = \delta_0 + \delta_1 X_i + \delta_2 X_i^2$ |
| Service connection | $Y_i$: $C_{SC}$ (€/unit); $X_i$: $D$ (mm) | SLR | $Y_i = \lambda_0 + \lambda_1 X_i + \lambda_2 X_i^2$ |

Note: $C_{cw}$ = civil works cost [€/m³, €/(m³ m), €/kW]; $C_e$ = equipment cost [€/m³, €/(m³ m), €/kW]; $C_{Pipe}$ = pipe construction cost (€/m); $C_{SC}$ = service connection construction cost (€/unit); $D$ = nominal diameter (mm); MLR = multiple linear regression; $h$ = height (m); $P_h$ = total hydraulic power (kW); SLR = simple linear regression; $V$ = volume (m³); $\alpha_i$, $\beta_i$, $\gamma_i$, $\delta_i$, $\lambda_i$ = parameters of the models.

Por su parte, Peinado (2016) desarrolló una serie de ecuaciones de costos para diversos componentes de sistemas de acueducto y alcantarillado. La metodología de determinación de las funciones de costo en este trabajo consistió en regresiones lineales múltiples que tuvieron en consideración el material de los componentes y variables descriptivas de estos tales como el diámetro nominal (en el caso de tuberías) y profundidad en el caso de cámaras de inspección de alcantarillado. Los materiales para los cuales se establecieron funciones de costo para el suministro e instalación de tuberías de RDAP son los siguientes: GRP, hierro dúctil, polietileno de alta densidad (PE 100) y PVC con diversas relaciones diámetro espesor (RDE 41, 32.5, 26, 21). En dicho estudió se utilizó información de redes de RDAP y sistemas de alcantarillado de Colombia. La forma general de las ecuaciones de costos estimadas en este trabajo se muestra a continuación:

$$C_T = \sum_{i=1}^{NT} L_i * C_{tub_i}$$

**Ecuación 2.1. Costo total de suministro e instalación de una red.**

Donde $C_T =$ costo total de suministro e instalación de tuberías (COP); $L_i =$ longitud del tramo $i$ $(m)$; $C_{tub_i} =$ costo unitario de suministro e instalación de tubería del tramo $i$ (COP/m); $NT =$ número de tubos de la red $(-)$.

$$C_{tub_i} = \alpha_1 D_i^{\alpha_2}$$
$$C_{tub_i} = \alpha_1 D_i^2 + \alpha_2 D_i + \alpha_3$$

Donde $C_{tub_i} =$ costo unitario de suministro e instalación de tubería del tramo $i$ (COP$/m); $D_i =$ diámetro nominal de la tubería en el tramo $i$ (mm); $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 =$ coeficientes estimados mediante regresión.

## 2.3 Resiliencia de RDAPs

Según la real academia española la resiliencia se define como: capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido. En el caso particular de una RDAP la resiliencia hace referencia a la capacidad que tiene la red de mantener su nivel de servicio por encima del estándar de satisfacción estipulado (las presiones y caudales demandados en cada uno de los nodos de la red) durante y después de un la ocurrencia de un evento adverso. Hoy en día, existen varios índices que permiten cuantificar el valor de la resiliencia de las RDAPs. Uno de estos es el índice de resiliencia de Todini (2000), el cual es uno de los más conocidos y utilizados a nivel mundial. Su formulación se muestra a continuación:

$$I_r = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} q_j^* (h_j - h_j^*)}{\left(\sum_{e=1}^{n_e} Q_e H_e + \sum_{i=1}^{n_b} P_i\right) - \sum_{k=1}^{n_n} q_j^* h_j^*}$$

**Ecuación 2.2. Índice de resiliencia de Todini (2000).**

En la ecuación anterior, $I_r =$ índice de resiliencia de una red $(-)$; $q_j^* =$ caudal demandado en el nodo $j$ de la red $(l/s)$; $h_j^* =$ mínima cabeza requerida en el nodo $j$ de la red $(m)$; $h_j =$ cabeza en real en el nodo $j$ de la red $(m)$; $Q_e =$ caudal ingresado desde el embalse $e$ de la red $(l/s)$; $H_e =$ cabeza real en el embalse $e$ de la red $(m)$; $P_i =$ potencia adicionada por la bomba $i$ de la red $(m * l/s)$; $n_n =$ número de nodos en la red $(-)$; $n_e =$ número de embalses en la red $(-)$; $n_b =$ número de bombas en la red $(-)$.

Este índice puede tomar valores entre cero y uno, donde uno representa la resiliencia ideal de resiliencia y cero la peor resiliencia posible de la red.

También Jayaram & Srinivasan (2008) propusieron una modificación al índice de Todini (2000) para considerar únicamente el superávit de potencia en los nodos, puesto que en estos es que se evalúa el nivel de servicio de las redes. La formulación de este índice de resiliencia modificado se presenta a continuación:

$$MI_r = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} q_j^* (h_j - h_j^*)}{\sum_{k=1}^{n_n} q_j^* h_j^*}$$

**Ecuación 2.3. Índice de resiliencia de modificado por Jayaram & Srinivasan (2008).**

Donde, $MI_r =$ índice de resiliencia modificado de una red $(-)$; $q_j^* =$ caudal demandado en el nodo $j$ de la red $(l/s)$; $h_j^* =$ mínima cabeza requerida en el nodo $j$ de la red $(m)$; $h_j =$ cabeza real en el nodo $j$ de la red $(m)$; $n_n =$ número de nodos en la red $(-)$.

El índice de resiliencia modificado puede tomar valores desde cero hasta infinito. Además, el valor de este índice depende del nivel de referencia respecto al cual se cuantifiquen las cabezas en los nodos. Una misma red, ubicada en dos elevaciones distintas, presentará valores diferentes de $MI_r$.

## 2.4 Normativa de diseño de RDAPs

### 2.4.1 Normativa nacional

En Colombia, la entidad encargada de regular la dinámica del sector de agua potable y saneamiento básico es el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (MVCT) a través del Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico. En el año 2000, cuando esta entidad estaba constituida como el Ministerio de Desarrollo Territorial, emitió la Resolución 1096 (conocida como RAS 2000) para señalar los requisitos técnicos que deben cumplir los diseños, las obras y procedimientos correspondientes al Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico y sus actividades complementarias, señaladas en el artículo 14, numerales 14.19, 14.22, 14.23 y 14.24 de la Ley 142 de 1994, que adelanten las Entidades prestadoras de los servicios públicos municipales de acueducto, alcantarillado y aseo o quien haga sus veces. Esta resolución, en su artículo 10, PASO 1, determina que antes de iniciar cualquier proyecto del sector de agua y saneamiento básico debe definirse el nivel de complejidad del sistema. Con base en dicho nivel de complejidad se establecerá el grado de restricción de las condiciones de diseño. En cuanto a las redes de distribución de agua potable, en este reglamento se establecieron restricciones hidráulicas para el diseño, dependiendo del nivel de complejidad del sistema a diseñar. Dicho nivel de complejidad dependía de condiciones socioeconómicas tales como el tamaño de la población objetivo y la capacidad económica de estas. Entre las restricciones hidráulicas de los diseños de RDAPs estipuladas por la Resolución 1096 del 2000 se encuentra la

presión mínima de diseño, expuesta en su artículo 82 y mostrada en la Tabla 2.2. Así mismo, en el artículo 83 de esta resolución se define la presión máxima permisible, con un valor de 60 m.c.a.

**Tabla 2.2. Presiones mínimas de diseño establecidas en el RAS 2000.**

| Nivel de complejidad | Presión mínima (kPa) | Presión mínima (metros) |
|---|---|---|
| Bajo | 98.1 | 10 |
| Medio | 98.1 | 10 |
| Medio alto | 147.2 | 15 |
| Alto | 147.2 | 15 |

De la misma manera la Resolución 1096 del 2000, en su artículo 85, establece diámetros internos mínimos de diseño para las RDAPs, tal como se muestra a continuación:

**Tabla 2.3. Diámetros internos mínimos de tuberías de RDAP establecidas por el RAS 2000.**

| Nivel de complejidad | Diámetro mínimo |
|---|---|
| Bajo | 38.1 mm (1.5 pulgadas) |
| Medio | 50.0 mm (2.0 pulgadas) |
| Medio alto | 100 mm (4 pulgadas). Zona comercial e industrial<br>63.5 mm (2 ½ pulga) Zona residencial |
| Alto | 150 mm (6 pulgadas) Zona comercial e industrial<br>75 mm (3 pulgadas) Zona residencial |

Por otro lado, no se encuentra que en la Resolución 1096 del 2000 se mencione el diseño optimizado de RDAPs. Por tanto, en lo referente a esta normativa, no hay ninguna exigencia para que las RDAP se diseñen de forma optimizada. Esto llama la atención por cuanto en el artículo 14, numeral 14.12, de la Ley 142, existe una figura llamada *Plan de expansión de costo mínimo* el cual consiste en un plan de inversión a mediano y largo plazo, cuya factibilidad técnica, económica, financiera y ambiental garantizar la minimización de los costos de expansión del servicio. Entonces, al estar la Resolución 1096 del 2000 enmarcada en la Ley 142 se esperaría que el RAS 2000 contemplara, al menos el diseño optimizado de las RDAPs.

Actualmente, la Resolución 0330 del 2017 es la normativa que reglamenta lo referente a los proyectos del sector de agua y saneamiento básico. En esta, tal como reza su Artículo 1 del TÍTULO 1, se reglamentan los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño,

construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo. A diferencia del RAS 2000, en la Resolución 0330 del 2017 ya no se requiere que se determine un nivel de complejidad para los sistemas. No obstante, también establece restricciones hidráulicas para el diseño de RDAPs. En el Título 1, artículo 61, se define que para sistemas con poblaciones menores a 12500 habitantes la presión dinámica mínima corresponde a 10 m.c.a., mientras que para poblaciones de diseño de más de 12500 habitantes la presión dinámica mínima debe ser de 15 m.c.a. En el artículo 63 se establece que la para zonas urbanas el diámetro interno real mínimo de las tuberías no deberá ser menor a 75 mm, mientras que para zonas urbanas todos los diámetros internos reales deberán ser superiores a 50 mm. El valor de presión máxima que establece esta resolución es 50 m.c.a. con posibilidad de superar dicho límite en ciertos nodos con la debida justificación técnica.

Así mismo, el MVCT expidió la Resolución 1063 del 30 de diciembre de 2016 mediante la cual establece las pautas de funcionamiento del Mecanismo de Viabilización de Proyectos del sector de agua potable y saneamiento básico que requieran apoyo financiero de la nación, así como de aquellos que han sido priorizados en el marco de los Planes Departamentales de Agua y de los programas que implemente el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, a través del Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico, y se dictan otras disposiciones. El objeto de esta resolución reza de la siguiente manera: Por medio de la presente resolución se establecen los requisitos y el mecanismo para la presentación, viabilización, reformulación y expedición de conceptos técnicos para los proyectos del sector de agua potable y saneamiento básico que sean presentados por las entidades territoriales que soliciten apoyo financiero de la nación ante el Mecanismo de evaluación y viabilización de proyectos del sector de agua potable y saneamiento básico.

En el Artículo 2 de la resolución 1063 de 2016 se define este Mecanismo de Viabilización de Proyectos como: el proceso mediante el cual el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio a través del Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico, evalúa, aprueba y viabiliza los proyectos del sector de agua potable y saneamiento básico presentados por las entidades territoriales que soliciten apoyo financiero de la Nación, así como las reformulaciones que estos requieran. Así mismo, en el parágrafo correspondiente a este artículo se estipula que: la viabilización de proyectos o su reformulación, corresponde a la verificación de los parámetros requeridos de conformidad con el reglamento técnico del sector, los requisitos establecidos en la presente resolución y la Guía de Presentación de Proyectos de Agua Potable y Saneamiento Básico que hace parte integral de la misma. En ningún caso el Mecanismo de Viabilización de Proyectos suple las funciones o responsabilidades de los ejecutores del proyecto; consultores encargados de estudios, diseños e interventoría; de los contratistas de obra y de los supervisores de los contratos.

### *2.4.1.1 Normativa local*

El artículo 6 de la Resolución 1096 del 7 de noviembre de 2000 reza de la siguiente manera: "*El presente reglamento no afecta la aplicación de normas y especificaciones técnicas que internamente emitan las empresas prestadoras de servicios, siempre que no vayan en detrimento de la calidad del servicio y no contradigan el presente Reglamento Técnico*". Con las mismas palabras lo expresa la Resolución 0330 del 8 de junio de 2017 en su artículo 4, con excepción de la última frase la cual cambia ligeramente así: *"… siempre que no vayan en detrimento de calidad del servicio y acojan como línea base lo establecido en la presente resolución*"; lo cual constituye básicamente la misma afirmación del RAS 2000.

Con base en lo anterior, se entiende que la legislación colombiana faculta a las empresas prestadoras de servicios para que estas establezcan sus propios reglamentos, los cuales deben tener un nivel de requerimiento técnico igual o superior al definido por el reglamento técnico del sector de agua y saneamiento básico. Así, algunas empresas prestadoras de servicios públicos de Colombia deciden emitir reglamentos que faciliten los procesos relacionados con el desarrollo de proyectos que sean de su competencia. En el caso de proyectos de acueducto hay varios casos de reglamentos locales. A continuación, se presenta una breve descripción y análisis de los reglamentos aplicados en las dos ciudades con mayor población del país, en relación con la exigencia de diseño optimizado para redes de distribución de agua potable.

#### 2.4.1.1.1 Normas técnicas EPM

Las Empresas Públicas de Medellín (EPM) es la entidad encargada de la prestación de todos los servicios públicos domiciliarios en la ciudad de Medellín y otros 123 municipios del departamento de Antioquia. El 08 de enero de 2014 fue expedido el decreto 2014-DECGG_1980 mediante el cual se adoptan las "NORMAS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE ACUEDUCTO Y DE ALCANTARILLADO DE LAS EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P." En el caso particular de las normas referentes a los sistemas de acueducto, el propósito es "*fijar los criterios básicos, los requisitos mínimos, los valores específicos y límites, las metodologías y las tecnologías que deben tenerse en cuenta en los diferentes procesos involucrados en la conceptualización y el diseño de sistemas de acueducto"* (EPM, 2013).

A continuación, se muestran los criterios hidráulicos establecidos para lo referente a las RDAPs:

**Tabla 2.4. Parámetros de diseño de RDAPs de la normativa de EPM.**

| Parámetro de diseño | Mínimo | Máximo |
|---|---|---|
| Presión | 20 m.c.a. | 60 m.c.a. |
| Diámetro residencial | 75 mm | No aplica |
| Diámetro industrial | 150 mm | No aplica |
| Velocidad | No aplica | 2.5 m/s |

En lo referente a la optimización de los diseños de RDAPs, esta normativa, en su aparte 5.4.13 Generación de Alternativas, menciona que: *"Cuando EPM no cuente con estudios previos de análisis económico para la definición de los materiales de tuberías, el diseño de la red de distribución debe buscar la alternativa óptima económica de combinación de los diferentes diámetros que cumplan con todas las restricciones hidráulicas y técnicas."* Con esto, EPM hace una exigencia de optimización en el proceso de diseño de RDAPs. Sin embargo, no queda claro cómo debe realizarse dicha optimización y cómo ha de ser verificada la aplicación de alguna metodología de optimización.

#### 2.4.1.1.2 Normas técnicas EAAB

En Bogotá D.C. y otros 11 municipios del departamento de Cundinamarca es la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá la encargada de la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado. Esta entidad también tiene sus propios reglamentos para regular lo relacionado con los proyectos de agua y saneamiento básico que se realizan dentro de su jurisdicción. A estas normativas locales se les da el nombre de Normas Técnicas de Servicio. La norma NS-036 Criterios para Diseño de Red de Acueducto Secundaria y Menor de Distribución tiene el siguiente alcance: *"Esta norma establece los parámetros, criterios y condiciones básicas que se deben tener en cuenta en la elaboración y presentación de diseños para redes secundarias y menores de distribución de sistemas de abastecimiento de agua."* (EAAB, 2018).

**Tabla 2.5. Parámetros de diseño de RDAPs de la normativa EAAB.**

| Parámetro de diseño | Mínimo | Máximo |
|---|---|---|
| Presión | 15 m.c.a. | 50 m.c.a. |
| Diámetro | 4" | 12" |
| Velocidad | No aplica | 2.5 m/s |

En esta normativa no se hace ninguna referencia al diseño optimizado de las RDAPs.

### 2.4.2 Normativa a nivel internacional

Adicionalmente, se consultó la normativa del sector de agua y saneamiento básico de otros países con el fin de establecer puntos de comparación con la normativa colombiana en cuanto a la exigencia de diseño optimizado de RDAPs. Los países incluidos en este trabajo son: Ecuador, Costa Rica y España.

#### *2.4.2.1 Ecuador*

Se consultó el: CPE INEM 005-9-1: Código Ecuatoriano de la construcción C.E.C. Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes.

#### 2.4.2.2 Costa Rica

En este país la regulación del sector de agua potable y saneamiento básico se encuentra a cargo del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Este organismo aprobó la Norma Técnica para diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial. Mediante esta normativa se regula lo referente a los proyectos de acueducto y alcantarillado en todo el país. En este documento no se evidencia ningún tipo de exigencia de optimización para el diseño de RDAPs.

#### 2.4.2.3 España

Se consultaron los "Reglamentos de Servicio" del Canal de Isabel II Gestión S.A.; de la Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla, S.A. (EMASESA); el del Ayuntamiento de Cáceres. Se encontraron las siguientes características en la normativa:

- No existe una normativa nacional respecto al diseño de redes de abastecimiento de agua potable.
- La regulación se encuentra descentralizada y se realiza casi a nivel municipal.
- En los Reglamentos de Servicio consultados no se encontró la exigencia de metodologías de optimización aplicadas para los diseños de RDAPs.

# 3 METODOLOGÍA

La metodología seguida para dar alcance al objetivo de la presente investigación incluye el desarrollo de trabajo de campo y uso de software. En general, esta metodología consiste en: 1) construcción de una base de datos con información hidráulica y topológica de una muestra representativa de los diseños de nuevas RDAPs presentados en el mecanismo de viabilización de proyectos del MVCT, 2) selección de funciones de costos aplicables a las redes incluidas en la base de datos 3) modificación del código fuente del programa REDES para permitir el uso de todas las funciones de costo seleccionadas 4) diseño optimizado de las redes incluidas en la base de datos, 5) estimación de costos y parámetros hidráulicos de los diseños antes y después de ser optimizados, 6) análisis del impacto del diseño optimizado en los resultados de costos y parámetros hidráulicos de las redes incluidas en la base datos, y 7) crítica a la normativa colombiana respecto al diseño optimizado de RDAPs.

## 3.1 Construcción base de datos de RDAPs

Para construir la base datos de diseños de RDAPs presentados en el mecanismo de viabilización de proyectos del MVCT se solicitó la autorización de este Ministerio para poder acceder a la información almacenada en su archivo. Dicho permiso se requirió por escrito, mediante una carta dirigida a la dirección de programas y radicada en la Ventanilla Única del MVCT. Una vez la dirección de programas confirió la autorización de acceso al archivo, se realizaron visitas a las instalaciones del MVCT durante las cuáles se consultó la información que se encontraba disponible de manera digital.

Se buscaron proyectos cuyo objetivo fuese la construcción de nuevas RDAPs que presentaran información referente a la topología y la hidráulica. Fueron incluidos en la base datos aquellos proyectos que tuvieran modelos digitales de las redes con la extensión ".inp" es decir, modelos ejecutables con el programa EPANET, en los cuales se encontrara definido el material de las tuberías, su longitud, su coeficiente de rugosidad ($k_s$) o pérdidas ($C$); ubicación de embalses, tanques, bombas y válvulas; caudales demandados y elevación de cada nodo. Adicionalmente, se buscaron las memorias de diseño de las redes incluidas en la base de datos. Esto último, con el fin de conocer las restricciones topológicas e hidráulicas bajo las cuáles fueron diseñadas dichas redes. Además, se pretende también conocer, con la ayuda de las memorias de diseños, si se implementó alguna metodología de diseño optimizado en las redes. Como objetivo se estableció una meta de 15 redes para conformar la base datos.

A continuación, en la se presentan los resultados de la construcción de la base de datos objetivo de esta investigación. En primer lugar, se muestra la identificación de las redes encontradas mediante un número de correspondencia (ID) y un nombre corto para facilitar la organización de los

resultados encontrados. Para cada uno de los proyectos se indica el año en el cual fueron presentados en el mecanismo de viabilización del MVCT.

## 3.2 Selección de funciones de costo

Después de realizar una inspección preliminar de las redes incluidas en la base de datos, se determinó que todas estaban diseñadas con alguno de los dos materiales siguientes: Policloruro de vinilo (PVC) o Polietileno (PE). Por esta razón, de los trabajos de Marchionni (2016) y Peinado (2016), se seleccionaron las ecuaciones de costo correspondientes a tales materiales, según las características particulares que presentaba cada diseño. A continuación, se muestran las ecuaciones de costo seleccionadas:

$$C_{HDPE\ PE\ 100/PN\ 10}\left(\frac{€}{\mathrm{m}}\right) = 0.0003D^2 + 0.31D + 21.71$$
$$D\ (mm)\ \in (50, 355); R^2 = 0.78$$

**Ecuación 3.1. Función de costos para tuberías de PE 100/PN 10 según Marchionni et al. (2016).**

$$C_{PVC}\left(\frac{€}{\mathrm{m}}\right) = 0.00047D^2 - 0.04D + 28.52$$
$$D\ (mm)\ \in (63, 400); R^2 = 0.94$$

**Ecuación 3.2. Función de costos para tuberías de PVC según Marchionni et al. (2016).**

$$C_{HDPE\ PE\ 100/PN\ 10}\left(\frac{COP}{m}\right) = 2.323D^2 + 28.109D + 6392$$
$$D\ (mm)\ \in (63, 500); R^2 = 0.99$$

**Ecuación 3.3. Función de costos para tuberías de PE 100/PN 10 según Peinado (2016).**

$$C_{PVC\ RDE\ 32.5}\left(\frac{COP}{m}\right) = 0.2464D^2 + 557.26D - 36683$$
$$D\ (mm)\ \in (76.2, 609.6); R^2 = 0.97$$

**Ecuación 3.4. Función de costos para tuberías de PVC RDE 32.5 según Peinado (2016).**

$$C_{PVC\ RDE\ 26}\left(\frac{COP}{m}\right) = 17.236D^{1.5927}$$
$$D\ (mm)\ \in (50.8, 500); R^2 = 0.98$$

**Ecuación 3.5. Función de costos para tuberías de PVC RDE 26 según Peinado (2016).**

$$C_{PVC\ RDE\ 21}\left(\frac{COP}{m}\right) = 1.243D^2 + 442.16D - 25926$$
$$D\ (mm)\ \in (76.2, 700); R^2 = 0.97$$

**Ecuación 3.6. Función de costos para tuberías de PVC RDE 21 según Peinado (2016).**

Las ecuaciones de costos seleccionadas para el diseño presentaban, en su mayoría, una formulación incompatible con la prestablecida en el programa REDES. Casi todas las funciones de costo elegidas

para esta investigación presentan una forma polinómica de tres términos, mientras que la configuración de funciones prestablecida por el programa presentaba una formulación potencial de un solo término. Por esta razón, fue necesario modificar el código fuente del programa con el fin de poder incluir todas las ecuaciones de costo seleccionadas para adelantar esta investigación.

## 3.3 Modificación del programa REDES

Como se mencionó, se hizo necesario modificar el código fuente y la interfaz del programa redes a fin de poder incluir funciones de costo que tengan forma polinómica de tres términos o formulación potencial de un término. A continuación, se muestra el cambio que sufrió la interfaz del programa cuando se realizó la modificación mencionada en el código fuente y en su interfaz:

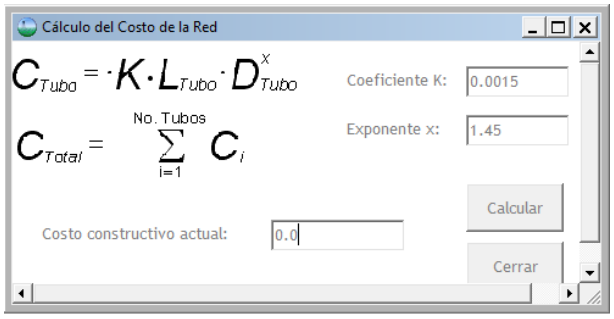



Figura 3.1. Interfaz de cálculo de costos antes de la modificación del programa REDES.

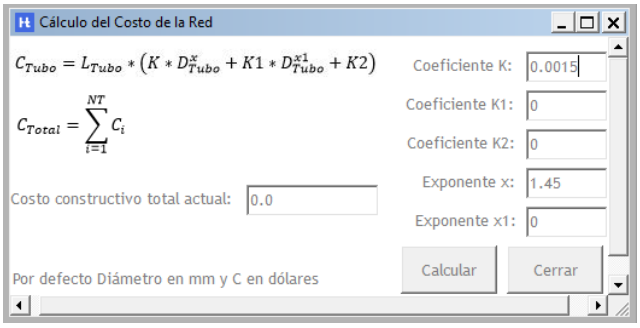



Figura 3.2. Interfaz de cálculo de costos después de modificación del programa REDES.

## 3.4 Diseño optimizado de RDAPs de base de datos

El diseño optimizado de las RDAPs de la base de datos se realizó con el programa REDES, el cual fue desarrollado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de los Andes. Se utilizó la metodología OPUS y Algoritmos Genéticos para el diseño

optimizado de dichas redes. Ambas metodologías se encuentran programadas en el código fuente del programa REDES. Para estas metodologías el programa permite ajustar el valor de la presión mínima de diseño, la función de costos a minimizar, la lista de diámetros comerciales y la rugosidad del material de las tuberías, tal como se muestra en la ventana encontrada a continuación:

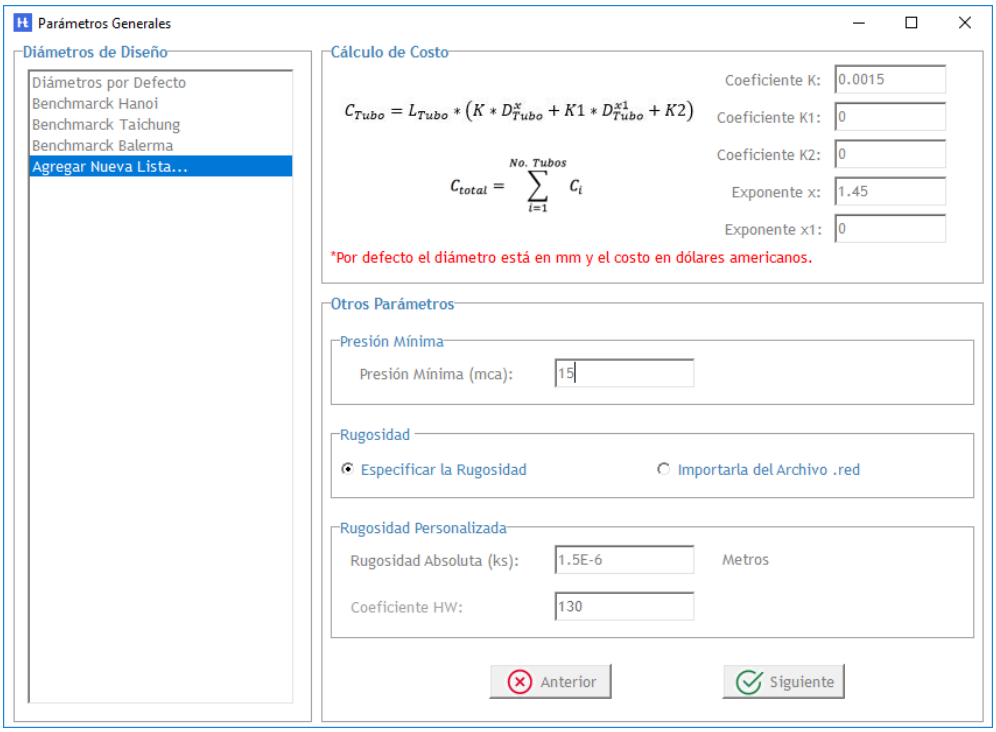



**Figura 3.3. Ventana de ajuste de parámetros de diseño optimizado en REDES.**

En la sección *Diámetros de Diseño* de la Figura 3.3 se ingresan los diámetros internos que conforman la lista de diámetros comerciales aplicable al material del diseño presentado en el MVCT. En el apartado *Cálculo de Costo* se ingresan los valores de los coeficientes que definen la función de costos aplicable a cada red según su material. En la parte llamada *Presión Mínima* de la Figura 3.3 se establece la presión mínima permitida en la red durante cada una de las iteraciones del diseño. En la sección *Rugosidad* se define la rugosidad interna de cada una de las tuberías de la red a diseñar, la cual no cambia durante las iteraciones de diseño. En esta sección siempre se marcó la opción de importar los valores de rugosidad desde el archivo con extensión ".red", es decir el archivo del modelo de EPANET tomado de la base de datos e ingresado en el programa REDES para el diseño.

### 3.4.1 Configuración de metodologías de Diseño

De la misma manera fue necesario configurar ciertos parámetros particulares de cada metodología para poder realizar el diseño optimizado correctamente.

### 3.4.1.1 Configuración de OPUS

A continuación, se muestran las ventanas en las cuales se configuran las opciones y parámetros particulares del diseño mediante la metodología OPUS:

**Figura 3.4. Opciones de diseño mediante metodología OPUS.**

En la sección *Ecuación Hidráulica* de la Figura 3.4 se selecciona la ecuación con la cual son evaluadas las pérdidas por fricción durante cada iteración del diseño. La ecuación hidráulica escogida corresponde a la ecuación hidráulica implementada para el diseño presentado en el MVCT. En el apartado *Diámetros* se indica si se va a implementar una lista de diámetros discretos (lista comercial) o si se diseña con diámetros continuo, es decir iguales a los calculados exactamente en las iteraciones hidráulicas. Para todos los diseños optimizados realizados en esta investigación se implementaron diámetros discretos. Adicionalmente, cuando se selecciona la opción de diámetros discretos en la ventana mostrada en la Figura 3.4, se solicita la definición del método de aproximación de diámetros. Se realizó una inspección preliminar de los resultados de cada método de aproximación y se encontró que el redondeo potencial presentaba muy buenos resultados, por lo cual fue el que se utilizó para todos los diseños. Se seleccionó solo un método de aproximación de diámetros para todos los diseños con el con fin de tener parámetros uniformes que permitieran el análisis de los resultados de la optimización de los diseños. En la ventana mostrada en la Figura 3.5 se establece el valor de la flecha de energía y el exponente de la función de redondeo potencial. Los valores que se presentan en esta figura fueron los mismos para cada uno de los diseños.

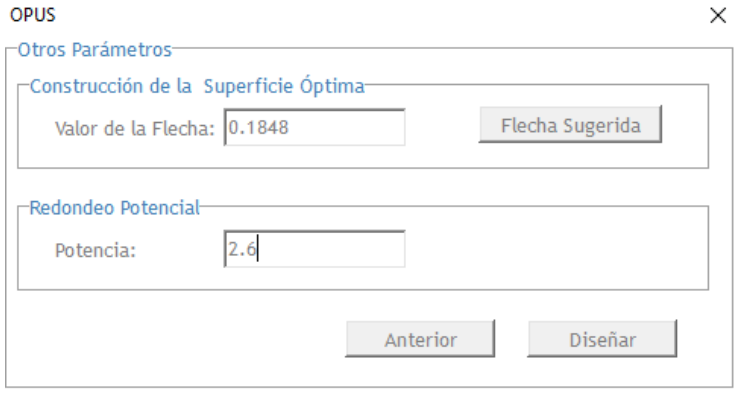



**Figura 3.5. Definición de otros parámetros necesarios para el diseño optimizado con la metodología OPUS.**

El resto de los parámetros de la metodología OPUS del programa REDES se deja con los valores que vienen por defecto.

### *3.4.1.2 Configuración de Algoritmos Genéticos*

De acuerdo con López et al. (2013) el Algoritmo Genético implementado en REDES utiliza la reproducción generacional con recombinación estándar y la selección rueda de ruleta como método de reproducción.

**Figura 3.6. Opciones de diseño con Algoritmos Genéticos en OPUS.**

En la ventana mostrada en la Figura 3.6 la única opción que presenta cambios dependiendo de las redes diseñadas es la sección de ecuación hidráulica. En esta se selecciona la misma ecuación de pérdidas utilizada en los diseños presentados en el MVCT. El resto de las opciones se dejaron con los valores que venían definidos por defecto en el programa REDES.

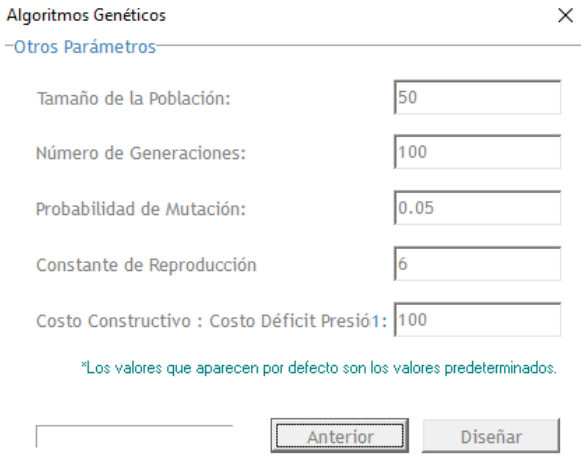



**Figura 3.7. Otros parámetros de la metodología de algoritmos genéticos.**

Los valores de los parámetros modificables en la ventana mostrada en la Figura 3.7 se dejaron iguales a los valores definidos por defecto en el programa.

### 3.4.2 Escenarios de diseño

Con base en la información hidráulica disponible en los modelos de EPANET y en las memorias de diseño de cada red incluida en la base de datos, se identifican las restricciones bajo las cuáles fueron diseñadas cada una de estas redes. Se identifica la lista de diámetros comerciales considerada, el material y la presión mínima permisible por la normativa vigente al momento del diseño de la red.

Una vez definido lo anterior, se procede a establecer las condiciones para el diseño optimizado de la red. Con base en la normativa correspondiente y los objetivos particulares de cada diseño, se determina la presión mínima de diseño de la red y el diámetro mínimo permitido. Teniendo en cuenta que no tiene sentido especificar un diámetro mínimo para la red "matriz" y otro para las redes "menores" de distribución (tal como lo requería el RAS 2000), puesto que la diferenciación entre estos dos tipos de redes tiende a ser subjetivo, se estableció un diámetro mínimo para la totalidad de la red. Este diámetro mínimo correspondió al especificado para las redes "menores" de distribución en la Resolución 1096 del 2000, la cual fue la normativa bajo la cual se realizaron todos los diseños de la base de datos. Por último, con base en el material de la red y el diámetro mínimo aplicable, se define la lista de diámetros comerciales disponibles para el diseño. Estas listas de diámetros incluyen todos los diámetros que estuviesen disponibles, en las listas encontradas en esta investigación, para el material especificado al momento del diseño presentado en el MVCT; aún los diámetros de las tuberías que se indicaban que requerían de un pedido previo para su despacho.

Para los casos en los que el modelo en EPANET presenta un patrón de consumo con factores multiplicadores de la demanda base establecida por los diseñadores, se identifica la hora de mayor

consumo y se establecen las condiciones hidráulicas de esta como las condiciones críticas de diseño. Entonces, se genera un modelo estático con las demandas ajustadas con el factor multiplicador correspondiente a la hora de mayor consumo. En tales casos, este modelo es el que se utiliza para el diseño optimizado en el programa REDES. Esto se hizo con base en lo estipulado por la Resolución 1096 del 2000, en la cual se establece que el diseño de RDAPs debe hacer para el caudal máximo horario (QMH). Para los casos en los que no existen patrones de consumo en los modelos, se toman directamente los modelos disponibles para el diseño optimizado.

Una vez definido todo esto, se procede al diseño optimizado de las redes mediante la metodología OPUS y Algoritmos Genéticos. Entonces, se tendrán como resultado cuatro escenarios de diseño tal como se muestra a continuación:

**Tabla 3.1. Escenarios de diseño con la metodología OPUS.**

| Escenario de diseño | Ecuación de Costo |
|---|---|
| OPUS1 | Peinado (2016) |
| OPUS2 | Marchionni (2016) |
| AG1 | Peinado (2016) |
| AG2 | Marchionni (2016) |

## 3.5 Comparación entre diseños reales y diseños optimizados

Una vez se tienen los diseños optimizados de las redes de la base de datos se procede a comparar tales diseños con los diseños reales presentados en el mecanismo de viabilización del MVCT. Esta comparación se realiza en términos de costos y de resiliencia de las redes.

### 3.5.1 Comparación y análisis de costos

En primer lugar, se realiza una comparación de costos con el fin de establecer si el diseño optimizado tiene un impacto significativo en la reducción de los costos de las redes analizadas. Esto se hace calculando el costo de las redes presentadas en el MVCT y las redes optimizadas con base en las ecuaciones de costo seleccionadas para cada caso y con Ecuación 2.1. Con estos resultados se estima la diferencia porcentual entre los costos correspondientes a la red presentada en el MVCT y la red producto del diseño optimizado.

Así mismo, se relacionan las diferencias porcentuales de los costos con el tamaño inicial de la red, la cual se expresa en función del volumen interno (calculado como la suma del volumen cilíndrico interno de cada uno de los tubos de la red). Además, se relacionan estas diferencias porcentuales con el área superficial interna de la red (calculada como la suma del área superficial interna de cada una de las tuberías de la red) como un indicador aproximado de la cantidad de material utilizado en

cada red. En este punto es importante mencionar que, con el fin de tener un punto de referencia para los valores de costo, volumen interno y superficie interna de la red, estos también fueron calculados con base en la información proporcionada en los presupuestos de los proyectos analizados. Además, las diferencias porcentuales se relacionan con el caudal total suministrado en cada red y con la población atendida por estas. A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas para la comparación de costos:

$$V = \sum_{i=1}^{n_T} \frac{\left(d_i^2 * \pi * L_i\right)}{4}$$

**Ecuación 3.7. Volumen interno ocupado por una red.**

En la cual, $V =$ volumen interno ocupado por una red $(m^3)$; $d_i =$ diámetro de la tubería $i$ de la red $(m)$; $L_i =$ longitud de la tubería $i$ de la red $(m)$; $n_T =$ número de tuberías de la red $(-)$.

$$S = \sum_{i=1}^{n_T} d_i * \pi * L_i$$

**Ecuación 3.8. Superficie interna de una red.**

Donde, $S =$ superficie interna de una red $(m^2)$; $d_i =$ diámetro de la tubería $i$ de la red $(m)$; $L_i =$ longitud de la tubería $i$ de la red $(m)$; $n_T =$ número de tuberías de la red $(-)$.

$$\delta C = \frac{\left(C_{Opt} - C_{MVCT}\right)}{C_{MVCT}} * 100\%$$

**Ecuación 3.9. Diferencia porcentual entre costo de diseño presentado en MVCT y costo de diseño optimizado.**

En la cual, $\delta C =$ diferencia porcentual de costos; $C_{MVCT} =$ costo de la red original presentada en el Mecanismo de Viabilización de Proyectos del MVCT $(COP)$; $C_{Opt} =$ costo de la red generada por el diseño optimizado $(COP)$.

$$\delta C_P = \frac{\delta C}{P}$$

**Ecuación 3.10. Diferencia porcentual de costos per cápita.**

En la cual, $\delta C_P =$ diferencia porcentual de costos per cápita $(\%/hab)$; $\delta C =$ diferencia porcentual de costos $(\%)$; $P =$ población atendida por la red $(hab)$.

$$\delta C_Q = \frac{\delta C}{Q}$$

**Ecuación 3.11. Diferencia porcentual de costos por unidad de volumen interno de la red.**

$\delta C_Q =$ diferencia porcentual de costos por unidad de caudal suministrado a la red $(\%/(l/s))$; $\delta C =$ diferencia porcentual de costos $(\%)$; $Q =$ caudal total suministrado a la red $(l/s)$.

### 3.5.2 Comparación y análisis de resiliencia

Así mismo, se realiza una comparación de resiliencia para establecer si existe un cambio relevante en la confiabilidad de las redes cuando estas son diseñadas de manera optimizada. Para este análisis se utiliza el Índice de Resiliencia de Todini (2000), el cual es un índice ampliamente conocido y utilizado para cuantificar la resiliencia de las redes de distribución de agua potable. El cálculo de dicho índice se encuentra programado en el código fuente del programa REDES. En la Ecuación 2.2 se muestra la formulación utilizada de índice de este índice. Se calculará este parámetro para las redes presentadas en el MVCT y para las redes generadas por el diseño optimizado. De manera análoga al análisis de costos, para cada una de las redes estudiadas se encontrará la diferencia porcentual entre los valores de resiliencia de las redes presentadas en el Mecanismo de Viabilización de Proyectos del MVCT y las redes diseñadas optimizadamente. Además, se relacionan los cambios porcentuales de la resiliencia con el volumen interno de las redes, la superficie interna, la población y el caudal, así como se hace con los costos. A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas para la comparación y análisis de la resiliencia:

$$\delta I_r = \frac{\left(I_{r_{Opt}} - I_{r_{MVCT}}\right)}{I_{r_{MVCT}}} * 100\%$$

**Ecuación 3.12. Diferencia porcentual entre resiliencia de diseño presentado en MVCT y resiliencia de diseño optimizado.**

Donde, $\delta I_r =$ diferencia porcentual de resiliencia; $I_{r_{MVCT}} =$ resiliencia de la red original presentada en el Mecanismo de Viabilización de Proyectos del MVCT $(-)$; $I_{r_{Opt}} =$ resiliencia de la red generada por el diseño optimizado $(-)$.

$$\delta I_{r_P} = \frac{\delta I_r}{P}$$

**Ecuación 3.13. Diferencia porcentual de costos per cápita.**

En la cual, $\delta I_{r_P} =$ diferencia porcentual de resiliencia per cápita $(\%/hab)$; $\delta I_r =$ diferencia porcentual de costos $(\%)$; $P =$ población atendida por la red $(hab)$.

$$\delta I_{r_Q} = \frac{\delta I_r}{Q}$$

**Ecuación 3.14. Diferencia porcentual de costos por unidad de volumen interno de la red.**

$\delta I_{r_Q} =$ diferencia porcentual de resiliencia por unidad de caudal suministrado a la red $(\%/(l/s))$; $\delta I_r =$ diferencia porcentual de resiliencia $(\%)$; $Q =$ caudal total suministrado a la red $(l/s)$.

# 4 RESULTADOS

Durante el trabajo de campo se recolectó e inspeccionó información digital de un total de 72 proyectos. De estos, 27 correspondían a redes completamente nuevas y 37 a proyectos de optimización, es decir, modificaciones parciales de redes existentes. Se encontró que 8 proyectos del total no estaban relacionados con RDAPs. Finalmente, de las redes nuevas, se seleccionaron 15 redes que contaban con la información suficiente para el análisis proyectado para esta investigación. A continuación, se presentan las redes seleccionadas para la base de datos:

**Tabla 4.1. Identificación de los proyectos pertenecientes a la base de datos.**

| ID | Proyecto | Nombre corto |
|---|---|---|
| 01 | Construcción de Redes de Acueducto y Alcantarillado Sanitario y Pluvial para el Proyecto de Vivienda de Interés Social La Esperanza en el Municipio de Puerto Salgar - Cundinamarca (2011) | La Esperanza |
| 02 | Construcción del Sistema de Acueducto del Barrio La Arenosa - Municipio de Santo Tomás, Atlántico (2017) | La Arenosa |
| 03 | Construcción de las Redes de Acueducto y Alcantarillado Sanitario en el Área de Intervención del Proyecto, Malecón en la Bahía de El Rodadero en la Ciudad de Santa Marta, Magdalena, Caribe (2017) | Malecón Rodadero |
| 04 | Construcción del Sistema de Acueducto del Corregimiento de Piñuelas, Municipio de Pivijay, Departamento del Magdalena (2016) | Piñuelas |
| 05 | Acueducto y Alcantarillado Urbanización "Volver a Vivir" Apulo - Cundinamarca (2010) | Apulo |
| 06 | Construcción del Sistema de Acueducto de las Veredas de Argüello Alto y Argüello Bajo del Municipio de Yacuanquer Departamento de Nariño (2016) | Argüello Alto y Bajo |
| 07 | Ampliación de la Red de Distribución de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario para la Zona de Expansión entre Calles 1 y 6 Sur, y de la Carrera 6ª a la Carrera 8ª del Municipio de Trinidad, Departamento de Casanare (2013) | Trinidad |
| 08 | Construcción Redes de Acueducto Barrio Mesolandia – Municipio de Malambo, Atlántico (2015) | Mesolandia |
| 09 | Construcción de Acueducto en la Vereda Chuscalito - Municipio de la Union, Antioquia (2015) | Chuscalito |
| 10 | Formulación y Estructuración del Proyecto Integral para la Construcción del Acueducto Veredal Vega de Gramal y los Medios del Municipio Alpujarra – Tolima (2016) | Alpujarra |
| 11 | Diseño Hidráulico del Acueducto de la Comunidad de Naranjales – Municipio de Puerto Nariño Amazonas (2005) | Naranjales |
| 12 | Diseño Hidráulico del Acueducto de la Comunidad de Puerto Esperanza – Municipio de Puerto Nariño Amazonas (2005) | Puerto Esperanza |
| 13 | Diseño Hidráulico del Acueducto de la Comunidad de Puerto Rico – Municipio de Puerto Nariño Amazonas (2005) | Puerto Rico |

| ID | Proyecto | Nombre corto |
|---|---|---|
| 14 | Diseño Hidráulico del Acueducto de la Comunidad de San Juan del Soco – Municipio de Puerto Nariño Amazonas (2005) | San Juan del Soco |
| 15 | Diseño Hidráulico del Acueducto de la Comunidad de San Pedro de Tipisca – Municipio de Puerto Nariño Amazonas (2005) | San Pedro de Tipisca |

## 4.1 Red La Esperanza

Esta red corresponde al acueducto de un proyecto de vivienda de interés social llamado La Esperanza, ubicado en el municipio de Puerto Salgar, Cundinamarca. Dicho proyecto busca beneficiar a $3292$ personas con un caudal total de $18.28\ l/s$, en la hora de máximo consumo. El modelo de la red cuenta con un embalse; $96$ nodos y $141$ tuberías. De acuerdo con el modelo, las longitudes de las tuberías suman $7558.2\ m$; el volumen interno de estas es $32.27\ m^3$ y la superficie interna de $1638.09\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.922$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $7248\ m$; la sección interna de los tubos ocupa un volumen de $26.25\ m^3$ y posee una superficie interna de $1553.83\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $93{,}250{,}188.0\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología de la red:

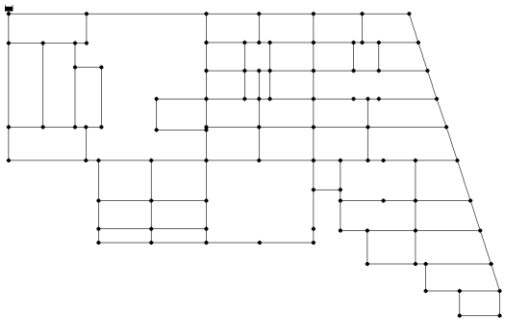


Figura 4.1. Topología del modelo de la red La Esperanza.

Al revisar la memoria y los planos de diseño se encuentra que esta red se diseñó utilizando dos clases de tubería: PVC RDE 26 y PVC RDE 32.5. La primera clase se utilizó para tubos con diámetro interno de $55.7\ mm$ y la segunda para tuberías con diámetros internos de $83.42\ mm$, $107.28\ mm$ y $157.92\ mm$. Se determina que la lista de diámetros comerciales seleccionada corresponde a la línea Unión Platino de PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Medio Alto al sistema, por lo cual la presión mínima de diseño se define como $15\ m.c.a.$ y el diámetro interno mínimo debería ser $63.5\ mm$. Sin embargo, en el modelo de EPANET se encuentra que se utilizaron tuberías con diámetro de $55.7\ mm$, el cual se encuentra por debajo del límite establecido por el RAS 2000. Se consideró que esto fue producto de una justificación técnica hecha por el diseñador de acuerdo con las condiciones de este proyecto.

Para el diseño optimizado de la red La Esperanza, se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño real. La presión mínima de diseño se toma igual a $15\ m.c.a.$ y el diámetro mínimo igual al diámetro más pequeño encontrado en el modelo original, es decir, $55.7\ mm$. Ahora, debido a que se tenían dos posibles tipos de tubería para las cuales en el trabajo de Peinado (2016) se tienen funciones de costo diferentes, se estimaron los costos por unidad de metro lineal de tubería para cada diámetro de la lista de diámetros comerciales, según su correspondiente función de costo, de acuerdo con el material de cada tubería. En este caso, las funciones de costos aplicables eran la Ecuación 3.4 y la Ecuación 3.5. Del trabajo de Peinado se seleccionó la Ecuación 3.4 para el diseño optimizado, puesto que era la correspondiente a la mayor cantidad de diámetros posibles. Del trabajo de Marchionni et. al. (2016) se seleccionó la Ecuación 3.2 para el diseño optimizado y para la cuantificación del costo de la red, puesto que era la única ecuación disponible de ese trabajo para tuberías de PVC. A continuación, se presentan los resultados de costos y resiliencia:

**Tabla 4.2. Costos y resiliencia del diseño de La Esperanza con la ecuación de Peinado (2016).**

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 91,387,120 | 0.922 |
| OPUS | 71,861,222 | 0.393 |
| AG | 64,340,787 | 0.302 |

**Tabla 4.3. Costos y resiliencia del diseño de La Esperanza con la ecuación de Marchionni et al. (2016).**

| Diseño | Costo (€) | IR |
|---|---|---|
| Original | 213,044 | 0.922 |
| OPUS | 209,848 | 0.393 |
| AG | 210,415 | 0.273 |

## 4.2 Red La Arenosa

La Arenosa es un proyecto de expansión de la cobertura del servicio de acueducto en el barrio que lleva el mismo nombre. Este barrio se encuentra ubicado en el municipio de Santo Tomás Atlántico. Dicho proyecto pretende beneficiar a una población $6340$ habitantes con un caudal total de $25.72\ l/s$, en la hora de máximo consumo. El modelo de la red cuenta con un embalse; $36$ nodos y $52$ tuberías. De acuerdo con el modelo, las longitudes de las tuberías suman $4238.0.m$; el volumen interno de estas es $55.63\ m^3$ y la superficie interna es $1600.86\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.437$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $4224.0\ m$; la sección interna de los tubos ocupa un volumen de $55.14\ m^3$ y posee una superficie interna de $1590.97\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $242{,}420{,}126\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología de la red:

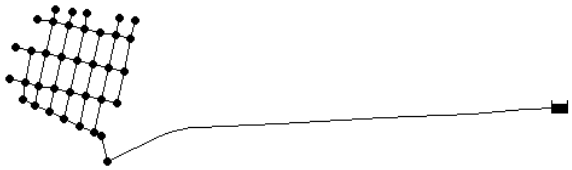


Figura 4.2. Topología del modelo de la red La Arenosa.

En la memoria y los planos de diseño de La Arenosa se encuentra que esta red se diseñó utilizando tuberías de PE 100/PN 10 con diámetros internos de $79.2\ mm$, $96.8\ mm$ y $141.0\ mm$. Con base en los diámetros internos observados en el modelo de EPANET de la red, se determina que la lista de diámetros comercial utilizada corresponde a la línea de Acuaflex ofrecida por PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Medio Alto al sistema, por lo cual la presión mínima de diseño corresponde a $15\ m.c.a.$ y el diámetro interno mínimo puede ser $63.5\ mm$, de acuerdo con el RAS 2000.

Para el diseño optimizado se definen las mismas restricciones que se encuentran en la memoria de diseño, es decir, la misma lista de diámetros comerciales, presión mínima de $15\ m.c.a.$ y diámetro interno mínimo de $63.5\ mm$. Además, la ecuación de costos seleccionada para el diseño optimizado y la cuantificación de los costos de suministro e instalación fue la Ecuación 3.3 del trabajo de Peinado (2016). Del trabajo de Marchionni et al. (2016) se seleccionó la Ecuación 3.1. A continuación, se presentan los resultados de costos y resiliencia de esta red:

Tabla 4.4. Costos y resiliencia del diseño de La Arenosa con la ecuación de Peinado (2016).

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 255,436,593 | 0.235 |
| OPUS | 223,317,902 | 0.219 |
| AG | 222,694,118 | 0.213 |

Tabla 4.5. Costos y resiliencia del diseño de La Arenosa con la ecuación de Marchionni et al. (2016).

| Diseño | Costo (€) | IR |
|---|---|---|
| Original | 298,780 | 0.235 |
| OPUS | 278,042 | 0.219 |
| AG | 279,993 | 0.229 |

## 4.3 Malecón Rodadero

Esta red hace parte de un proyecto enfocado en el mejoramiento del servicio de acueducto en la zona del Malecón en la bahía de El Rodadero de la ciudad de Santa Marta, Magdalena. Dicho proyecto busca beneficiar a $9197$ personas con un caudal total de $41.47\ l/s$, en la hora de máximo consumo. El modelo de la red cuenta con dos embalses; $85$ nodos y $95$ tuberías. Sin embargo, se encuentra que en el modelo están incluidas tuberías correspondientes a conexiones domiciliarias, con diámetros menores al límite estipulado por la normativa para RDAPs. Por esta razón, se hizo necesario modificar la topología, con el fin de lograr un modelo representativo de la red, sin tener en cuenta las conexiones domiciliarias. Para esto se eliminaron las tuberías con diámetro inferior al límite de la normativa y se trasladaron las demandas a los nodos adyacentes cuando fuese necesario.

Una vez realizada la modificación de la topología mencionada se encuentra que el modelo modificado tiene $2$ embalses, $53$ nodos y $63$ tuberías. Además, las longitudes de las tuberías suman $1765.7\ m$; el volumen interno de estas es $27.41\ m^3$ y la superficie interna $767.84\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.215$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $1763.2\ m$; la sección interna de los tubos ocupa un volumen de $27.32\ m^3$ y poseen una superficie interna de $765.99\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $87{,}347{,}895\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología original de la red y de la red modificada para el diseño optimizado:

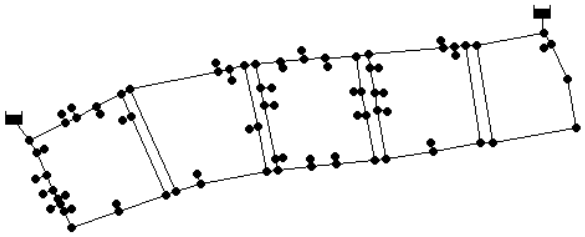


**Figura 4.3. Topología original del modelo de la red Malecón Rodadero.**

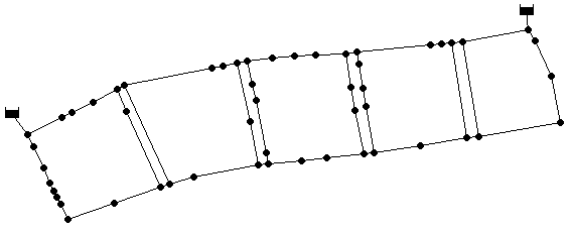


**Figura 4.4. Topología modificada del modelo la red Malecón Rodadero.**

Al revisar la memoria y los planos de diseño se encuentra que esta red (sin tener en cuenta las conexiones domiciliarias) se diseñó utilizando tuberías de PVC RDE 32.5. Los diámetros internos de las tuberías seleccionadas para el diseño fueron: $107.28\ mm$ y $157.92\ mm$. Con base en esto, se determina que la lista de diámetros comerciales seleccionada corresponde a la línea Unión Platino de PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Alto al sistema, por lo cual la presión mínima de diseño se debería definir como $15\ m.c.a.$, de acuerdo con el RAS 2000. Sin embargo, se encuentra que la presión mínima en el diseño fue de $14.87$mm. El diámetro interno mínimo debería ser $75\ mm$.

Para el diseño optimizado de la red El Malecón Rodadero, se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño original. Se define la presión mínima de diseño igual a $14.87\ m.c.a.$ y el diámetro mínimo de $75\ mm$. Se seleccionó la Ecuación 3.4 de Peinado (2016) para la cuantificación de los costos de la red y como función objetivo del diseño optimizado. A partir de esta red, ya no se utilizaron las ecuaciones de Marchionni et al. (2016) por los motivos presentados en la sección de análisis de resultados. A continuación, se presentan los resultados de costo y resiliencia para esta red:

**Tabla 4.6. Costo y resiliencia del diseño de El Malecón Rodadero con ecuación de Peinado (2016).**

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 73,877,613 | 0.215 |
| OPUS | 35,949,929 | 0.26 |
| AG | 51,401,510 | 0.297 |

## 4.4 Piñuelas

Un objetivo de este proyecto es darle cobertura de acueducto a Piñuelas, corregimiento del municipio de Pivijay, Magdalena, el cual, al momento del diseño, no contaba con una RDAP. Dicho proyecto pretende beneficiar a una población $1072$ habitantes con un caudal total de $4.44\ l/s$, en la hora de máximo consumo. Se encontró en el modelo el tramo correspondiente a la conducción de agua cruda desde la fuente de abastecimiento hasta la PTAP proyectada. Por esta razón, se modificó la red para eliminar las tuberías correspondientes a la conducción. Hecho esto, se reemplazó el tanque que alimentaba la red de distribución por un embalse que modelara la cabeza hidráulica del tanque en la hora de máximo consumo. Así mismo, se eliminaron las válvulas de la red, puesto que su presencia no es necesaria para el diseño optimizado. Además, se reemplazaron las características de una tubería de acero al carbón, utilizada en el paso por un cuerpo de agua, por características de una tubería de PE 100/PN 10. Esto para facilitar el diseño optimizado de la red y la comparación de costos entre la red original y las diseñadas optimizadamente.

De esta manera, el modelo modificado cuenta con $1$ embalse, $74$ nodos, $90$ tuberías cuyas longitudes de suman $5148.0.m$; el volumen interno de estas es $17.30\ m^3$ y la superficie interna de

$1041.44\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.954$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $5255.5\ m$; la sección interna de los tubos ocupa un volumen de $17.41\ m^3$ y posee una superficie interna de $1055.90\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $107{,}933{,}734\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología original de la red y de la red modificada para el diseño optimizado:

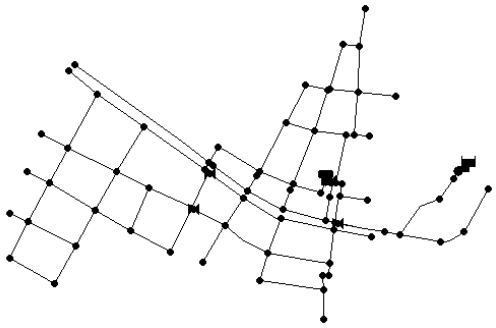


**Figura 4.5. Topología original del modelo de la red de Piñuelas.**

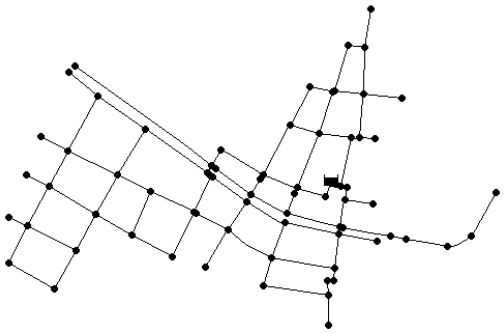


**Figura 4.6. Topología modificada del modelo de la red de Piñuelas.**

En la memoria y los planos de diseño de Piñuelas se encuentra que esta red se diseñó utilizando tuberías de PE 100/PN 10 con diámetros internos de $55.6\ mm$ y $79.4\ mm$. Con base en los diámetros internos observados en el modelo de EPANET de la red, se determina que la lista diámetros comercial utilizada no corresponde a la línea de Acuaflex ofrecida por PAVCO. Sin embargo, se encuentra que los diámetros internos son muy parecidos a los de PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Bajo al sistema, por lo cual la presión mínima de diseño corresponde a $10\ m.c.a.$ y el diámetro interno mínimo puede ser $38.1\ mm$.

Para el diseño optimizado se definen las mismas restricciones que se encuentran en la memoria de diseño, es decir, una lista de diámetros comerciales parecida, presión mínima de $10\ m.c.a.$ y

diámetro interno mínimo de $38.1\ mm$. Fue posible agregar diámetros más pequeños a la lista de diámetros de diseño contemplada en el proyecto, puesto que la normativa así lo permitía y existía en la oferta de PAVCO tuberías con diámetro interno de $45.20\ mm$ de PE 100/PN 8. La ecuación de costos seleccionada para el diseño optimizado y la cuantificación de los costos de suministro e instalación fue la Ecuación 3.3 del trabajo de Peinado (2016). A continuación, se presentan los resultados de costo y resiliencia para esta red:

**Tabla 4.7. Costo y resiliencia del diseño de Piñuelas con ecuación de Peinado (2016).**

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 109,182,084 | 0.954 |
| OPUS | $ 70,752,206 | 0.547 |
| AG | $ 70,752,206 | 0.547 |

## 4.5 Apulo

Esta red es una extensión del acueducto del municipio de Apulo, Cundinamarca y su fin es abastecer con este servicio a la Urbanización Volver a Vivir. Dicho proyecto busca beneficiar a $445$ personas con un caudal total de $1.58\ l/s$, en la hora de máximo consumo. El modelo de la red cuenta con un tanque; $34$ nodos y $39$ tuberías. Fue necesario, cambiar el tanque por un embalse con la misma cabeza del tanque para el diseño optimizado de la red. También fue necesario cambiar los diámetros de las tuberías. Estaban especificado los diámetros nominales, los cuales fueron cambiados por los internos.

De acuerdo con el modelo, las longitudes de las tuberías suman $878.6\ m$; el volumen interno de estas es $2.18\ m^3$ y la superficie interna de $154.38\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.973$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $878.6\ m$; la sección interna de los tubos ocupa un volumen de $2.18\ m^3$ y posee una superficie interna de $154.37\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $16{,}257{,}900\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología de la red:

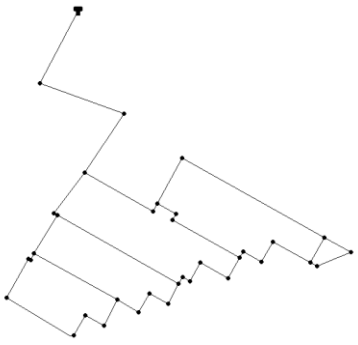


**Figura 4.7. Topología original del modelo de la red Apulo.**

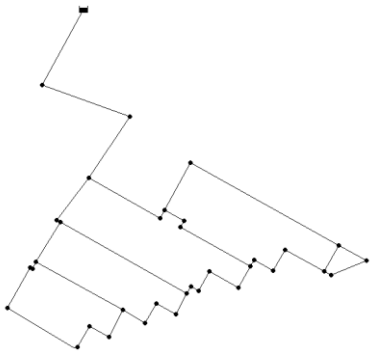


Figura 4.8. Topología modificada del modelo de la red Apulo.

Al revisar la memoria y los planos de diseño se encuentra que esta red se diseñó utilizando tuberías de PVC RDE 21. Los diámetros internos de las tuberías seleccionadas para el diseño fueron: $80.42\ mm$ y $54.58\ mm$. Con base en esto, se determina que la lista de diámetros comerciales seleccionada corresponde a la línea Unión Platino de PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Medio al sistema, por lo cual la presión mínima de diseño se define como $10\ m.c.a.$ y el diámetro interno mínimo debería ser $50\ mm$.

Para el diseño optimizado de la red Apulo, se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño original. Se define la presión mínima de diseño igual a $10\ m.c.a.$ y el diámetro mínimo de $50\ mm$. Se seleccionó la Ecuación 3.6 de Peinado (2016) para la cuantificación de los costos de la red y como función objetivo del diseño optimizado. A continuación, se presentan los resultados de costo y resiliencia del diseño de la red de Apulo:

Tabla 4.8. Costo y resiliencia del diseño de Apulo con ecuación de Peinado (2016).

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | $ 8,264,451 | 0.973 |
| OPUS | $ 7,891,630 | 0.961 |
| AG | $ 7,891,630 | 0.961 |

## 4.6 Argüello Alto y Bajo

El objetivo de este proyecto es darle cobertura del servicio de acueducto a las veredas de Argüello Alto y Argüello Bajo del municipio de Yacuanquer, Nariño. Dicho proyecto pretende beneficiar a una población de $1089$ habitantes con un caudal total de $3.5\ l/s$, en la hora de máximo consumo. Se encontró que en el modelo se incluía el tramo correspondiente a la conducción de agua cruda desde la fuente de abastecimiento seleccionada hasta la PTAP proyectada. Por esta razón, se modificó la red para eliminar las tuberías correspondientes a dicha conducción. Hecho esto, se reemplazó el tanque que alimentaba la red de distribución por un embalse de manera que este modelara la

cabeza hidráulica del tanque en la hora de máximo consumo. Así mismo, se eliminaron las válvulas de la red, puesto que su presencia no es necesaria para el diseño optimizado.

De esta manera, el modelo modificado cuenta con $1$ embalse, $775$ nodos, $775$ tuberías cuyas longitudes de suman $8663.4\ m$; el volumen interno de estas es $16.8\ m^3$ y la superficie interna de $1322.74\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.885$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $8928.0\ m$; la sección interna de los tubos ocupa un volumen de $17.24\ m^3$ y posee una superficie interna de $1360.65\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $125{,}053{,}038\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología original de la red y de la red modificada para el diseño optimizado:

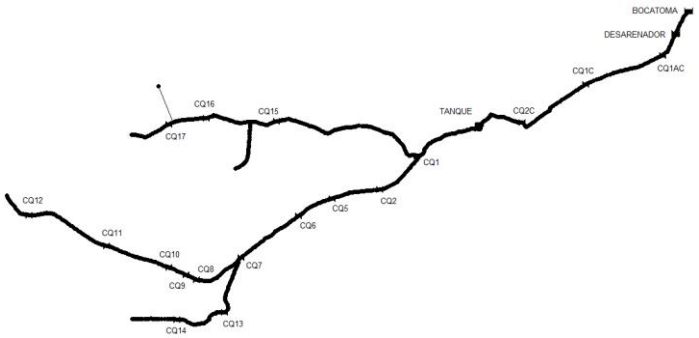



**Figura 4.9. Topología original del modelo de la red Argüello Alto y Bajo.**

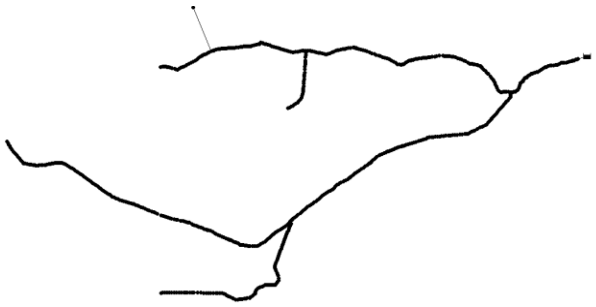


**Figura 4.10. Topología modificada del modelo de la red Arguello Alto y Bajo.**

Al revisar la memoria y los planos de diseño se encuentra que esta red se diseñó utilizando tres clases de tubería: PVC RDE 21, PVC RDE 26 y PVC RDE 32.5. La primera clase se utilizó para tubos con diámetro interno de $43.68\ mm$, la segunda para tuberías con diámetros internos de $55.70\ mm$ y la tercera para diámetros internos de $83.42\ mm$. Se determina que la lista de diámetros comerciales seleccionada corresponde a tuberías ofrecidas por PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Bajo al sistema, por lo cual la presión mínima de diseño se define como $10\ m.c.a.$ y el diámetro interno mínimo debería ser $38.1\ mm$.

Para el diseño optimizado de la red Argüello Alto y Bajo, se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño original, la cual es una suma de tuberías encontrada en el Manual de Tubosistemas Presión PVC y la línea Unión Platino de PAVCO. Se define la presión mínima de diseño igual a $10\ m.c.a.$ y el diámetro mínimo de $38.1\ mm$. Se seleccionó la Ecuación 3.4 y la Ecuación 3.5 de Peinado (2016) para la cuantificación de los costos de la red y la Ecuación 3.4 como función objetivo del diseño optimizado. A continuación, se presentan los resultados de costo y resiliencia del diseño de la red Argüello Alto y Bajo:

**Tabla 4.9. Costo y resiliencia del diseño de Argüello Alto y Bajo con ecuaciones de Peinado (2016).**

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | $ 55,610,343 | 0.885 |
| OPUS | $ 39,896,825 | 0.646 |
| AG | $ 39,896,825 | 0.646 |

## 4.7 Trinidad

La Trinidad es un proyecto de expansión de la cobertura del servicio de acueducto en el barrio Villa Polita del municipio Trinidad, Casanare. Dicho proyecto pretende beneficiar a una población de $2917$ habitantes con un caudal total de $16.49\ l/s$, en la hora de máximo consumo. El modelo de la red cuenta con un embalse que modela la conexión con la red existente del municipio, un tanque; $63$ nodos y $87$ tuberías. Fue necesario, cambiar el tanque por un embalse para el diseño optimizado de la red. A este embalse, se le asignó la misma cabeza del tanque en la hora de máximo consumo. Así mismo, se quitaron las válvulas presentes en el modelo, las cuales no eran necesarias para el diseño optimizado.

De acuerdo con el modelo modificado, las longitudes de las tuberías suman $3288.1\ m$; el volumen interno de estas es $15.41\ m^3$ y la superficie interna $786.37\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.909$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $3010.7\ m$; la sección interna de los tubos ocupa un volumen de $15.92\ m^3$ y posee una superficie interna de $768.95\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $65{,}357{,}716\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología original de la red y de la red modificada para el diseño optimizado:

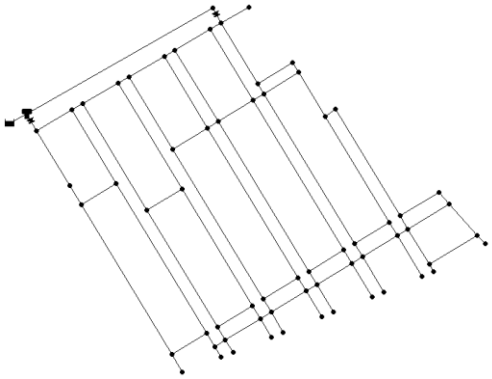


**Figura 4.11. Topología original del modelo de la red Trinidad.**

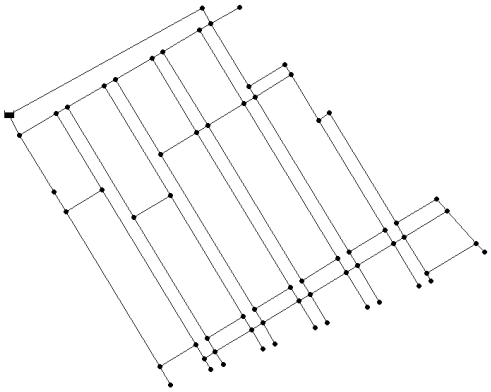


**Figura 4.12. Topología modificada del modelo de la red Trinidad.**

En la memoria y los planos de diseño de Trinidad se encuentra que esta red se diseñó utilizando tuberías de PE 100/PN 10 con diámetros internos de $55.4\ mm$, $79.2\ mm$ y $96.80\ mm$. Con base en los diámetros internos observados en el modelo de EPANET de la red, se determina que la lista de diámetros comerciales utilizada corresponde a la línea de Acuaflex ofrecida por PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Medio al sistema, por lo cual la presión mínima de diseño corresponde a $10\ m.c.a.$ y el diámetro interno mínimo puede ser $50.0\ mm$.

Para el diseño optimizado se definen las mismas restricciones que se encuentran en la memoria de diseño, es decir, la misma lista de diámetros comerciales, presión mínima de $10\ m.c.a.$ y diámetro interno mínimo de $50.0\ mm$. La ecuación de costos seleccionada para el diseño optimizado y la cuantificación de los costos de suministro e instalación fue la Ecuación 3.3 del trabajo de Peinado (2016). A continuación, se presentan los resultados de costo y resiliencia para esta red:

Tabla 4.10. Costo y resiliencia del diseño de Trinidad con ecuaciones de Peinado (2016).

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | $ 87,889,367 | 0.909 |
| OPUS | $ 57,182,189 | 0.163 |
| AG | $ 57,910,532 | 0.102 |

## 4.8 Mesolandia

Esta red es una extensión del acueducto del municipio de Malambo, Atlántico y su fin es abastecer con este servicio al barrio Mesolandia, reemplazando una red existente que presentaba mal funcionamiento. Dicho proyecto busca beneficiar a $4644$ personas con un caudal total de $20.43\ l/s$, en la hora de máximo consumo. El modelo de la red incluye una sección que no corresponde a la nueva red diseñada, la cual debe ser eliminada del modelo. Hecho esto, se agrega un embalse en el nodo en dónde empieza la nueva red con la cabeza correspondiente. Así mismo, se quitaron las válvulas contempladas, puesto que estas no son necesarias para para el diseño optimizado. Finalmente, el modelo modificado queda con un embalse; $89$ nodos y $104$ tuberías.

De acuerdo con el modelo modificado, las longitudes de las tuberías suman $6169.6\ m$; el volumen interno de estas es $45.54\ m^3$ y la superficie interna es $1809.99\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.594$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $5560\ m$; la sección interna de los tubos ocupa un volumen de $35.67\ m^3$ y posee una superficie interna de $1534.45\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $234{,}108{,}348\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología original de la red y de la red modificada para el diseño optimizado:

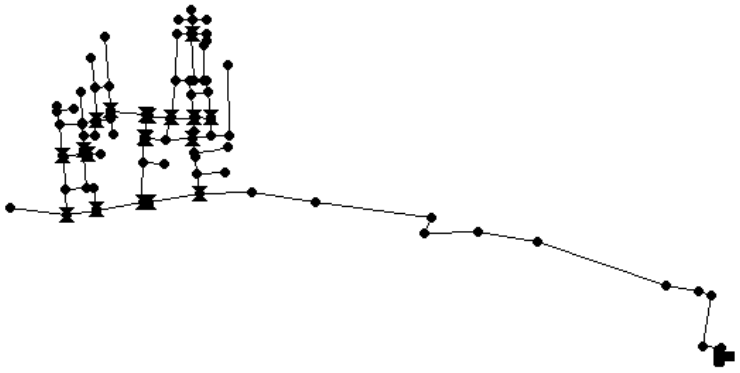


Figura 4.13. Topología original del modelo de la red Mesolandia.

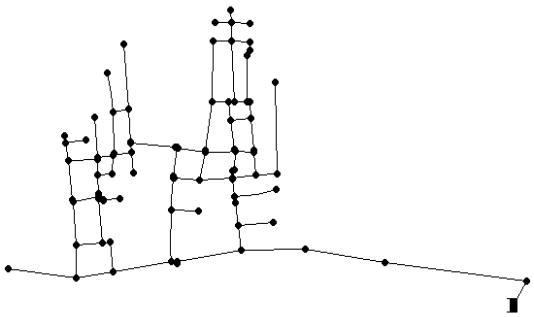


Figura 4.14. Topología modificada del modelo de la red Mesolandia.

Al revisar la memoria y los planos de diseño se encuentra que esta red se diseñó utilizando tuberías de PE 100/PN 10. Los diámetros internos de las tuberías seleccionadas para el diseño fueron: $79.4\ mm$ y $141.2\ mm$ y $146.1\ mm$. Con base en esto, se determina que la lista de diámetros comerciales es muy parecida a la línea Acuaflex de PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Alto al sistema, por lo cual la presión mínima de diseño se define como $15\ m.c.a.$ y el diámetro interno mínimo debería ser $75\ mm$.

Para el diseño optimizado de la red Mesolandia, se toma la lista de diámetros de PAVCO, porque es muy parecida a la utilizada en el diseño original y es la que estaba disponible en esta investigación. Se define la presión mínima de diseño como $15\ m.c.a.$ y el diámetro mínimo de $75\ mm$. Se seleccionó, del trabajo de Peinado (2016) la Ecuación 3.4 para la cuantificación de los costos y como función objetivo del diseño optimizado. A continuación, se presentan los resultados de costo y resiliencia para esta red:

Tabla 4.11. Costo y resiliencia del diseño de Mesolandia con ecuaciones de Peinado (2016).

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 230,065,676 | 0.594 |
| OPUS | 207,342,713 | 0.522 |
| AG | 207,342,713 | 0.592 |

## 4.9 Chuscalito

Esta red busca el mejoramiento del servicio de acueducto en la vereda Chuscalito del municipio la Unión, Antioquia. Dicho proyecto busca beneficiar a $448$ personas con un caudal total de $1.46\ l/s$, en la hora de máximo consumo. El modelo de la red cuenta con la sección del sistema que transporta el agua hasta la PTAP. Adicionalmente, se encuentra que en el modelo están incluidas tuberías correspondientes a conexiones domiciliarias, con diámetros menores al límite estipulado por la normativa para RDAPs. Por esta razón, se hizo necesario modificar la topología, con el fin de lograr un modelo representativo de la red de distribución, sin tener en cuenta el sistema previo a este y

tampoco las conexiones domiciliarias. Para esto, se eliminó la sección previa a la PTAP y se reemplazó el tanque correspondiente al almacenamiento de esta por un embalse que tuviese la misma cabeza hidráulica en la hora de máximo consumo. Además, se eliminaron las tuberías con diámetro inferior al límite de la normativa y se trasladaron las demandas a los nodos adyacentes cuando fuese necesario.

Con la modificación de la topología mencionada se encuentra que modelo modificado tiene $1$ embalse, $211$ nodos y $213$ tuberías. Además, las longitudes de las tuberías suman $6548.0\ m$; el volumen interno es $35.11\ m^3$ y la superficie interna $1672.71\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.989$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $6576.0\ m$; un volumen interno de $35.34\ m^3$ y una superficie interna de $1681.80\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $174{,}408{,}143\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología original de la red y de la red modificada para el diseño optimizado:

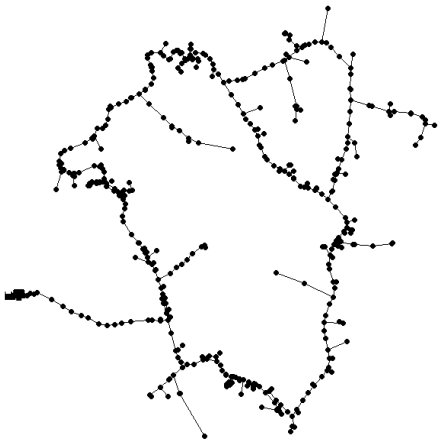


**Figura 4.15. Topología original del modelo de la red Chuscalito.**

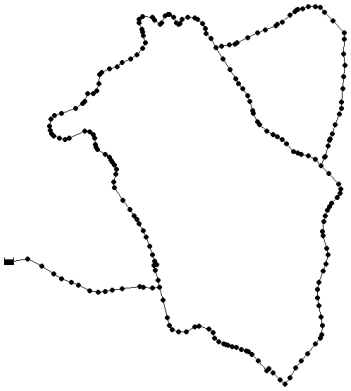


**Figura 4.16. Topología modificada del modelo de la red Chuscalito.**

En la memoria y los planos de diseño de Chuscalito se encuentra que esta red se diseñó utilizando tuberías de PE 100/PN 10 con diámetros internos de $55.4\ mm$, $79.2\ mm$ y $96.80\ mm$. Con base en los diámetros internos observados en el modelo de EPANET de la red, se determina que la lista diámetros comercial utilizada corresponde a la línea de Acuaflex ofrecida por PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Bajo al sistema, por lo cual la presión mínima de diseño corresponde a $10\ m.c.a.$ y el diámetro interno mínimo puede ser $38.1\ mm$.

Para el diseño optimizado se definen las mismas restricciones que se encuentran en la memoria de diseño, es decir, la misma lista de diámetros comerciales (incluyendo el diámetro interno de $45.2\ mm$ correspondiente a tuberías de PE 100/PN 8), presión mínima de $10\ m.c.a.$ y diámetro interno mínimo de $38.1\ mm$. La ecuación de costos seleccionada para el diseño optimizado y la cuantificación de los costos de suministro e instalación fue la Ecuación 3.3 del trabajo de Peinado (2016). A continuación, se presentan los resultados de costo y resiliencia para esta red:

**Tabla 4.12. Costo y resiliencia del diseño de Chuscalito con ecuaciones de Peinado (2016).**

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 192,979,537 | 0.989 |
| OPUS | 96,898,053 | 0.898 |
| AG | 114,519,927 | 0.897 |

## 4.10 Alpujarra

Con el proyecto referente a esta red se busca suministrar el servicio de agua potable a las veredas Vega de Gramal y Los Medios, del municipio de Alpujarra, Tolima. Con este proyecto se busca beneficiar a $699$ personas con un caudal total de $2.31\ l/s$, en la hora de máximo consumo. Se encuentra que en el modelo están incluidas tuberías correspondientes a conexiones domiciliarias, con diámetros menores al límite estipulado por la normativa para RDAPs y una sección previa a la RDPA. Por esta razón, se hizo necesario modificar la topología, con el fin de lograr un modelo representativo de la red de distribución, sin tener en cuenta el sistema previo a este y tampoco las conexiones domiciliarias. Para esto, se eliminaron las tuberías con diámetro inferior al límite de la normativa y se trasladaron las demandas a los nodos adyacentes cuando fuese necesario. Adicionalmente, se reemplazó el tanque correspondiente al almacenamiento de esta red por un embalse que tuviese la misma cabeza hidráulica en la hora de máximo consumo.

Una vez realizada la modificación de la topología mencionada se encuentra que modelo modificado tiene $1$ embalse, $1483$ nodos y $1484$ tuberías. Además, las longitudes de las tuberías suman $29416.3\ m$; el volumen interno de estas es $172.22\ m^3$ y la superficie interna $7834.94\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.892$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $29416.2\ \ m$; la sección interna de los tubos ocupa un volumen de

$172.22\ m^3$ y posee una superficie interna de $7834.94\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $1{,}032{,}246{,}439\ COP$. Adicionalmente, es importante mencionar que el diseño optimizado de esta red se realizó para una sección de esta, puesto que para los tramos iniciales se presentaban presiones muy cercanas a la presión mínima de diseño que impedían el diseño optimizado. Por esto, seleccionó una sección en la cual se pudieran cambiar los diámetros de las tuberías y lograr el diseño optimizado de esta. El resto de la red se dejó igual. Una vez diseñada optimizadamente, la sección de la red fue integrada al resto de esta para el cálculo de los costos. A continuación, se presenta una vista de la topología original de la red y de la red modificada, y el tramo seleccionado para el diseño optimizado:

**Figura 4.17. Topología original del modelo de la red de Alpujarra.**

**Figura 4.18. Topología modificada del modelo de la red de Alpujarra.**

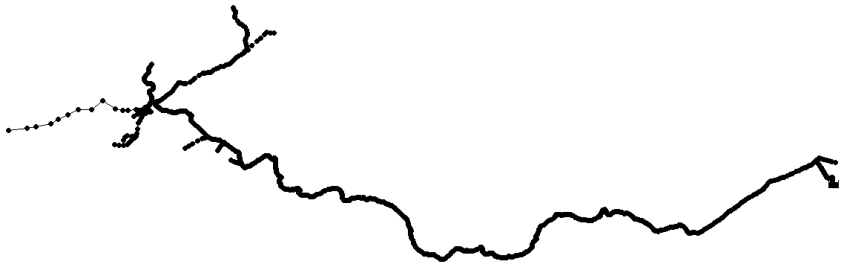


**Figura 4.19. Topología de la sección de la red Alpujarra diseñada optimizadamente**

En la memoria y los planos de diseño de Alpujarra se encuentra que esta red se diseñó utilizando tuberías de PE 100/PN 10 con diámetros internos de $55.4\ mm$ y $96.80\ mm$. Con base en los diámetros internos observados en el modelo de EPANET de la red, se determina que la lista diámetros comercial utilizada corresponde a la línea de Acuaflex ofrecida por PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Bajo al sistema, por lo cual la presión mínima de diseño corresponde a $10\ m.c.a.$ y el diámetro interno mínimo puede ser $38.1\ mm$.

Para el diseño optimizado se definen las mismas restricciones que se encuentran en la memoria de diseño, es decir, la misma lista de diámetros comerciales (incluyendo el diámetro interno de $45.2\ mm$ correspondiente a tuberías de PE 100/PN 8), presión mínima de $10\ m.c.a.$ y diámetro interno mínimo de $38.1\ mm$. La ecuación de costos seleccionada para el diseño optimizado y la cuantificación de los costos de suministro e instalación fue la Ecuación 3.3 del trabajo de Peinado (2016). A continuación, se presentan los resultados de costo y resiliencia para esta red:

**Tabla 4.13. Costo y resiliencia del diseño de Alpujarra con ecuación de Peinado (2016).**

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 933,236,606 | 0.892 |
| OPUS | 727,682,991 | 0.606 |
| AG | 895,586,124 | 0.625 |

## 4.11 Naranjales

Esta red corresponde al acueducto para la comunidad indígena de Naranjales, municipio de Puerto Nariño, Amazonas. Dicho proyecto busca beneficiar a $1398$ personas con un caudal total de $11.31\ l/s$, en la hora de máximo consumo. Se encontró que el modelo de la red tenía especificados como diámetros internos los diámetros nominales de las tuberías. Por esta razón, se modificó la red para asignar los diámetros internos reales a cada tubería. Con esta modificación, el modelo de la red cuenta con un embalse; $21$ nodos y $30$ tuberías.

De acuerdo con el modelo las longitudes de las tuberías suman $1637.1\ m$; el volumen interno de estas es $6.89\ m^3$ y la superficie interna es $374.79\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.467$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $1638.1\ m$; la sección interna de los tubos ocupa un volumen de $6.89\ m^3$ y posee una superficie interna de $374.99\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $\$\ 30{,}861{,}000\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología de la red:

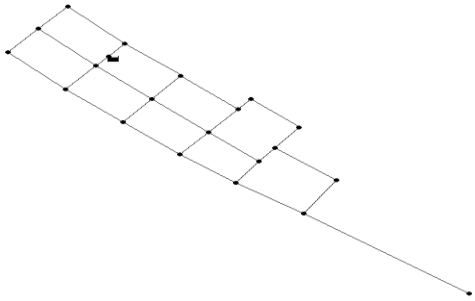


Figura 4.20. Topología del modelo de la red Naranjales.

Al revisar la memoria y los planos de diseño se encuentra que esta red se diseñó utilizando tuberías de PVC RDE 26 con diámetros internos de $67.45\ mm$ y $82.04\ mm$. Se determina que la lista de diámetros comerciales seleccionada corresponde a tuberías ofrecidas por PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Bajo al sistema. En la memoria de diseño se especifica que la presión mínima de diseño debe ser del orden de $4.0\ m.c.a.$ No obstante, en el modelo modificado con los diámetros internos se encontró que la presión mínima era de $3.58\ m.c.a.$, lo cual se justificaría considerando las condiciones particulares de la población objetivo descritas en la memoria de diseño. En particular, se menciona que es una población indígena con edificaciones en palafito con máximo dos niveles. Con base en la normativa el diámetro interno mínimo debería ser $38.1\ mm$.

Para el diseño optimizado de la red Naranjales, se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño real. La presión mínima de diseño se toma igual a $3.58\ m.c.a.$ y el diámetro mínimo igual a $38.1\ mm$. En este caso, las funciones de costos aplicable para la cuantificación de costos y como función objetivo para el diseño optimizado es la Ecuación 3.5, proveniente del trabajo de Peinado (2016). A continuación, se presentan los resultados de costos y resiliencia:

Tabla 4.14. Costo y resiliencia del diseño de Naranjales con ecuación de Peinado (2016).

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 23,599,499 | 0.467 |
| OPUS | 15,034,245 | 0.43 |
| AG | 19,174,478 | 0.456 |

## 4.12 Puerto Esperanza

Esta red corresponde al acueducto para la comunidad indígena de Puerto Esperanza, municipio de Puerto Nariño, Amazonas. Dicho proyecto busca beneficiar a $1034$ personas con un caudal total de $8.37\ l/s$, en la hora de máximo consumo. Se encontró que el modelo de la red tenía especificados como diámetros internos los diámetros nominales de las tuberías. Por esta razón, se modificó la red para asignar los diámetros internos reales a cada tubería. Con esta modificación, el modelo de la

red cuenta con un embalse; 12 nodos y 17 tuberías. De acuerdo con el modelo las longitudes de las tuberías suman $1871\ m$; el volumen interno de estas es $5.11\ m^3$ y la superficie interna es $345.36\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.809$. Por otro lado, según el presupuesto del proyecto, se cuantifica una longitud total de tuberías de $1822\ m$; la sección interna de los tubos ocupa un volumen de $4.99\ m^3$ y posee una superficie interna de $336.8\ m^2$. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $21{,}629{,}000\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología de la red:

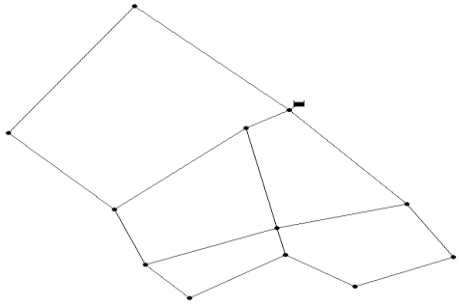


**Figura 4.21. Topología del modelo de la red Puerto Esperanza.**

Al revisar la memoria y los planos de diseño se encuentra que esta red se diseñó utilizando tuberías de PVC RDE 26 con diámetros internos de $55.7\ mm$ y $67.45\ mm$. Se determina que la lista de diámetros comerciales seleccionada corresponde a tuberías ofrecidas por PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Bajo al sistema. En la memoria de diseño se especifica que la presión mínima puede ser superior a $4.0\ m.c.a.$ y con base en la normativa el diámetro interno mínimo debería ser $38.1\ mm$.

Para el diseño optimizado de la red Puerto Esperanza, se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño real. La presión mínima de diseño se toma igual a $3.58\ m.c.a.$, puesto esta red presentaba prácticamente las mismas características que la red de Naranjales y fue diseñada por el mismo consultor. El diámetro mínimo de diseño se definió igual a $38.1\ mm$. En este caso, las funciones de costos aplicable para la cuantificación de costos y como función objetivo para el diseño optimizado es la Ecuación 3.5, proveniente del trabajo de Peinado (2016). A continuación, se presentan los resultados de costos y resiliencia:

**Tabla 4.15. Costo y resiliencia del diseño de Puerto Esperanza con ecuación de Peinado (2016).**

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 18,669,418 | 0.809 |
| OPUS | 9,176,720 | 0.565 |
| AG | 9,286,332 | 0.559 |

## 4.13 Puerto Rico

Esta red corresponde al acueducto para la comunidad indígena de Puerto Rico, municipio de Puerto Nariño, Amazonas. Dicho proyecto busca beneficiar a $531$ personas con un caudal total de $4.3\ l/s$, en la hora de máximo consumo. Se encontró que el modelo de la red tenía especificados como diámetros internos los diámetros nominales de las tuberías. Por esta razón, se modificó la red para asignar los diámetros internos reales a cada tubería. Con esta modificación, el modelo de la red cuenta con un embalse; $6$ nodos y $6$ tuberías. De acuerdo con el modelo las longitudes de las tuberías suman $990.0\ m$; el volumen interno de estas es $3.15\ m^3$ y la superficie interna de $197.17\ m^2$. En este modelo se estimó una resiliencia de $0.636$ De acuerdo con el presupuesto se tienen las mismas características de la red que en el modelo. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $\$\ 14{,}428{,}800\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología de la red:

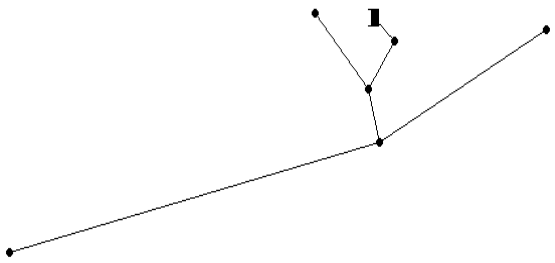


Figura 4.22. Topología del modelo de la red Puerto Rico.

Al revisar la memoria y los planos de diseño se encuentra que esta red se diseñó utilizando tuberías de PVC RDE 26 con diámetros internos de $55.7\ mm$ y $67.45\ mm$. Se determina que la lista de diámetros comerciales seleccionada corresponde a tuberías ofrecidas por PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Bajo al sistema. En la memoria de diseño se especifica que la presión mínima de diseño puede ser superior a $4.0\ m.c.a.$ y con base en la normativa el diámetro interno mínimo debería ser $38.1\ mm$.

Para el diseño optimizado de la red Puerto Rico, se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño real. La presión mínima de diseño se toma igual a $3.58\ m.c.a.$, puesto esta red presentaba prácticamente las mismas características que la red de Naranjales y fue diseñada por el mismo consultor. El diámetro mínimo de diseño se definió igual a $38.1\ mm$. En este caso, las funciones de costos aplicable para la cuantificación de costos y como función objetivo para el diseño optimizado es la Ecuación 3.5, proveniente del trabajo de Peinado (2016). A continuación, se presentan los resultados de costos y resiliencia:

Tabla 4.16. Costo y resiliencia del diseño de Puerto Rico con ecuación de Peinado (2016).

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 11,373,032 | 0.636 |
| OPUS | 7,537,393 | 0.253 |
| AG | 7,620,296 | 0.31 |

## 4.14 San Juan del Soco

Esta red corresponde al acueducto para la comunidad indígena de San Juan del Soco, municipio de Puerto Nariño, Amazonas. Dicho proyecto busca beneficiar a $671$ personas con un caudal total de $5.43\ l/s$, en la hora de máximo consumo. Se encontró que el modelo de la red tenía especificados como diámetros internos los diámetros nominales de las tuberías. Por esta razón, se modificó la red para asignar los diámetros internos reales a cada tubería. Con esta modificación, el modelo de la red cuenta con un embalse; $15$ nodos y $19$ tuberías. De acuerdo con el modelo las longitudes de las tuberías suman $1320\ m$; el volumen interno de estas es $3.93\ m^3$ y la superficie interna de $253.93\ m^2$. Además, el modelo presenta una resiliencia de $0.782$. De acuerdo con el presupuesto se tienen las mismas características de la red que en el modelo. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $17{,}697{,}000 COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología de la red:

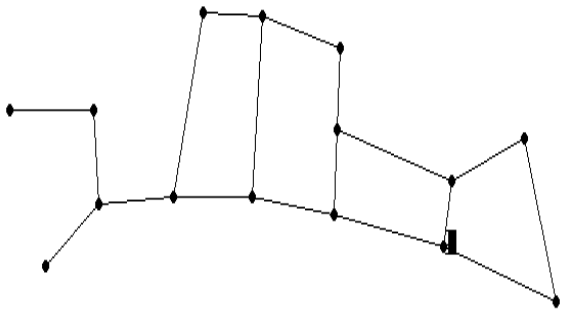


Figura 4.23. Topología del modelo de la red San Juan del Soco.

Al revisar la memoria y los planos de diseño se encuentra que esta red se diseñó utilizando tuberías de PVC RDE 26 con diámetros internos de $55.7\ mm$, $67.45\ mm$ y $79.2\ mm$. Se determina que la lista de diámetros comerciales seleccionada corresponde a tuberías ofrecidas por PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Bajo al sistema. En la memoria de diseño se especifica que la presión mínima de diseño puede ser superior a $4.0\ m.c.a.$ en cualquier punto. Con base en la normativa el diámetro interno mínimo debería ser $38.1\ mm$.

Para el diseño optimizado de la red San Juan del Soco, se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño real. La presión mínima de diseño se toma igual a $3.58\ m.c.a.$, puesto esta red presentaba prácticamente las mismas características que la red de Naranjales y fue diseñada por el mismo consultor. El diámetro mínimo de diseño se definió igual a $38.1\ mm$. En este caso, las funciones de costos aplicable para la cuantificación de costos y como función objetivo para el diseño optimizado es la Ecuación 3.5, proveniente del trabajo de Peinado (2016). A continuación, se presentan los resultados de costos y resiliencia:

**Tabla 4.17. Costo y resiliencia del diseño de San Juan del Soco con ecuación de Peinado (2016).**

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 14,309,501.48 | 0.782 |
| OPUS | 7,955,479 | 0.619 |
| AG | 8,128,725 | 0.608 |

## 4.15 San Pedro de Tipisca

Esta red corresponde al acueducto para la comunidad indígena de Puerto Esperanza, municipio de Puerto Nariño, Amazonas. Dicho proyecto busca beneficiar a $489$ personas con un caudal total de $3.96\ l/s$, en la hora de máximo consumo. Se encontró que el modelo de la red tenía especificados como diámetros internos los diámetros nominales de las tuberías. Por esta razón, se modificó la red para asignar los diámetros internos reales a cada tubería. Con esta modificación, el modelo de la red cuenta con un embalse; $12$ nodos y $15$ tuberías. De acuerdo con el modelo las longitudes de las tuberías suman $1142.6\ m$; el volumen interno de estas es $2.84\ m^3$ y la superficie interna de $197.98\ m^2$. Además, la resiliencia de la red es de $0.804$. Según el presupuesto del proyecto, Se tienen las mismas características. El costo de la red de acuerdo con el presupuesto es de $13{,}069{,}000\ COP$. A continuación, se presenta una vista de la topología de la red:

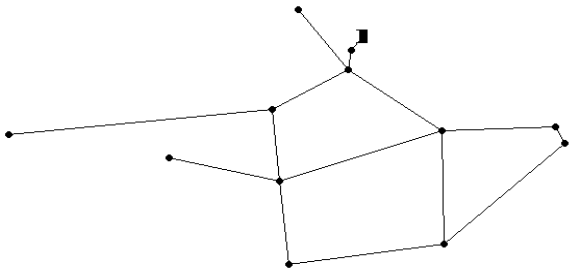


**Figura 4.24. Topología del modelo de la red San Pedro de Tipisca.**

Al revisar la memoria y los planos de diseño se encuentra que esta red se diseñó utilizando dos clases de tuberías: PVC RDE 21 y PVC RDE 26 con diámetros internos de $43.68\ mm$ para la primera clase y $55.7\ mm$, $67.45\ mm$ y $82.04\ mm$ para la segunda. Se determina que la lista de diámetros comerciales seleccionada corresponde a tuberías ofrecidas por PAVCO. Así mismo, se encuentra en la memoria de diseño que se asignó un nivel de complejidad Bajo al sistema. En la memoria de diseño se especifica que la presión mínima de diseño puede llegar a ser $4.0\ m.c.a.$ Con base en la normativa el diámetro interno mínimo debería ser $38.1\ mm$.

Para el diseño optimizado de la red San Juan del Soco, se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño real. La presión mínima de diseño se toma igual a $3.58\ m.c.a.$, puesto esta red presentaba prácticamente las mismas características que la red de Naranjales. El diámetro mínimo de diseño se definió igual a $38.1\ mm$. En este caso, las funciones de costos aplicable para la cuantificación de costos y como función objetivo para el diseño optimizado es la Ecuación 3.5, proveniente del trabajo de Peinado (2016). A continuación, se presentan los resultados de costos y resiliencia:

**Tabla 4.18. Costo y resiliencia del diseño de San Pedro de Tipisca con ecuación de Peinado (2016).**

| Diseño | Costo (COP) | IR |
|---|---|---|
| Original | 10,212,548 | 0.84 |
| OPUS | 6,281,411 | 0.555 |
| AG | 6,791,867 | 0.686 |

## 4.16 Resumen de resultados

Por último, se presenta un resumen de la información y resultados encontrados con el diseño optimizado de las redes:

**Tabla 4.19. Parámetros de diseño de las redes de la base de datos.**

| Red | Material | $P\ (hab)$ | Nivel de complejidad | $Q\ (l/s)$ | $P_{min}\ (m.c.a.)$ | $D_{min}\ (mm)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 01 | PVC RDE 26, 32.5 | 3295 | Medio Alto | 18.28 | 15 | 55.7 |
| 02 | PE 100/PN 10 | 6340 | Medio Alto | 25.72 | 15 | 63.5 |
| 03 | PVC RDE 32.5 | 9197 | Alto | 41.47 | 14.87 | 75 |
| 04 | PE 100/PN 10 | 1072 | Bajo | 4.44 | 10 | 38.1 |
| 05 | PVC RDE 21 | 445 | Medio | 1.58 | 10 | 50 |
| 06 | PVC RDE 21. 26, 32.5 | 1089 | Bajo | 3.50 | 10 | 38.1 |
| 07 | PE 100/ PN 10 | 2917 | Medio | 16.49 | 10 | 50 |
| 08 | PE 100/PN 10 | 4644 | Alto | 13.62 | 15 | 75 |
| 09 | PE 100/PN 10 | 448 | Bajo | 1.46 | 10 | 38.1 |

| Red | Material | $P\ (hab)$ | Nivel de complejidad | $Q\ (l/s)$ | $P_{min}\ (m.c.a.)$ | $D_{min}\ (mm)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | PE 100/PN 10 | 699 | Bajo | 2.31 | 10 | 38.1 |
| 11 | PVC RDE 26 | 1398 | Bajo | 11.31 | 3.58 | 38.1 |
| 12 | PVC RDE 26 | 1034 | Bajo | 8.37 | 3.58 | 38.1 |
| 13 | PVC RDE 26 | 531 | Bajo | 4.30 | 3.58 | 38.1 |
| 14 | PVC RDE 26 | 671 | Bajo | 5.43 | 3.58 | 38.1 |
| 15 | PVC RDE 21, 26 | 489 | Bajo | 3.96 | 3.58 | 38.1 |

Tabla 4.20. Características de las redes presentadas en el MVCT.

| Red | $L_{mod}\ (m)$ | $L_{pres}\ (m)$ | $V_{mod}\ (m^3)$ | $V_{pres}\ (m^3)$ | $S_m\ (m^2)$ | $S_{pres}\ (m^2)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 01 | 7558.2 | 7248.0 | 32.27 | 26.25 | 1638.09 | 1553.83 |
| 02 | 4238.0 | 4224.0 | 55.63 | 55.14 | 1600.86 | 1590.97 |
| 03 | 1765.7 | 1763.2 | 27.41 | 27.32 | 767.84 | 765.99 |
| 04 | 5148.0 | 5255.5 | 17.30 | 17.41 | 1041.44 | 1055.90 |
| 05 | 878.6 | 878.6 | 2.18 | 2.18 | 154.38 | 154.37 |
| 06 | 8663.4 | 8928.0 | 16.80 | 17.24 | 1322.74 | 1360.65 |
| 07 | 3288.1 | 3010.7 | 15.41 | 15.92 | 786.37 | 768.95 |
| 08 | 6169.6 | 5560.0 | 45.54 | 35.67 | 1809.99 | 1534.45 |
| 09 | 6548.0 | 6576.0 | 35.11 | 35.34 | 1672.71 | 1681.80 |
| 10 | 29416.3 | 29416.2 | 172.22 | 174.22 | 7834.94 | 7834.92 |
| 11 | 1638.1 | 1639.0 | 6.89 | 6.89 | 374.79 | 374.99 |
| 12 | 1871.0 | 1822.0 | 5.11 | 4.99 | 345.36 | 336.80 |
| 13 | 990.4 | 990.4 | 3.15 | 3.15 | 197.17 | 197.17 |
| 14 | 1319.5 | 1320.0 | 3.97 | 3.97 | 254.86 | 254.86 |
| 15 | 1142.6 | 1143.0 | 2.84 | 2.84 | 197.98 | 197.98 |

Tabla 4.21. Resultados de costo para la red original y los diseños optimizados aplicando la ecuación de Peinado (2016).

| Red | $Costo_{Original}\ (COP)$ | $Costo_{OPUS}\ (COP)$ | $Costo_{AG}\ (COP)$ |
|---|---|---|---|
| 01 | $ 91,387,120.48 | $ 71,861,221.95 | $ 64,340,786.94 |
| 02 | $ 255,436,592.71 | $ 221,012,363.77 | $ 221,348,053.51 |
| 03 | $ 73,877,613.08 | $ 35,949,929.41 | $ 51,401,509.83 |
| 04 | $ 109,182,083.74 | $ 70,752,206.12 | $ 70,752,206.12 |
| 05 | $ 8,264,450.51 | $ 7,891,629.81 | $ 7,891,629.81 |
| 06 | $ 55,610,343.08 | $ 39,896,824.58 | $ 39,896,824.58 |
| 07 | $ 87,889,366.58 | $ 57,182,188.90 | $ 57,910,532.15 |
| 08 | $ 230,065,676.18 | $ 207,342,713.27 | $ 207,342,713.27 |
| 09 | $ 192,979,536.95 | $ 96,898,052.98 | $ 114,519,927.23 |
| 10 | $ 933,236,606.44 | $ 727,682,990.68 | $ 895,586,124.39 |
| 11 | $ 23,599,499.42 | $ 15,034,244.80 | $ 19,174,478.20 |

| Red | $Costo_{Original}$ $(COP)$ | $Costo_{OPUS}$ $(COP)$ | $Costo_{AG}$ $(COP)$ |
|---|---|---|---|
| 12 | $ 18,669,418.22 | $ 9,176,719.67 | $ 9,286,332.22 |
| 13 | $ 11,373,031.77 | $ 7,537,392.73 | $ 7,620,296.04 |
| 14 | $ 14,309,501.48 | $ 7,955,479.49 | $ 8,128,724.59 |
| 15 | $ 10,212,548.10 | $ 6,281,410.99 | $ 6,791,866.55 |

**Tabla 4.22 Diferencias entre los costos originales y los costos de las redes optimizadas mediante cada metodología.**

| Red | $\Delta C_{OPUS}$ $(COP)$ | $\Delta C_{AG}$ $(COP)$ |
|---|---|---|
| 01 | -$ 19,525,899 | -$ 27,046,334 |
| 02 | -$ 34,424,229 | -$ 34,088,539 |
| 03 | -$ 37,927,684 | -$ 22,476,103 |
| 04 | -$ 38,429,878 | -$ 38,429,878 |
| 05 | -$ 372,821 | -$ 372,821 |
| 06 | -$ 15,713,519 | -$ 15,713,519 |
| 07 | -$ 30,707,178 | -$ 29,978,834 |
| 08 | -$ 22,722,963 | -$ 22,722,963 |
| 09 | -$ 96,081,484 | -$ 78,459,610 |
| 10 | -$ 205,553,616 | -$ 37,650,482 |
| 11 | -$ 8,565,255 | -$ 4,425,021 |
| 12 | -$ 9,492,699 | -$ 9,383,086 |
| 13 | -$ 3,835,639 | -$ 3,752,736 |
| 14 | -$ 6,354,022 | -$ 6,180,777 |
| 15 | -$ 3,931,137 | -$ 3,420,682 |

**Tabla 4.23. Resultados de resiliencia para la red original y los diseños optimizados aplicando la ecuación de Peinado (2016).**

| Red | $I_{r_{Original}}$ $(-)$ | $I_{r_{OPUS}}$ $(-)$ | $I_{r_{AG}}$ $(-)$ |
|---|---|---|---|
| 01 | 0.922 | 0.393 | 0.302 |
| 02 | 0.437 | 0.19 | 0.183 |
| 03 | 0.215 | 0.26 | 0.297 |
| 04 | 0.954 | 0.547 | 0.547 |
| 05 | 0.973 | 0.961 | 0.961 |
| 06 | 0.885 | 0.646 | 0.646 |
| 07 | 0.909 | 0.163 | 0.102 |
| 08 | 0.594 | 0.522 | 0.522 |
| 09 | 0.989 | 0.898 | 0.897 |
| 10 | 0.892 | 0.606 | 0.625 |
| 11 | 0.467 | 0.43 | 0.456 |
| 12 | 0.809 | 0.565 | 0.559 |
| 13 | 0.636 | 0.253 | 0.31 |

| Red | $I_{r_{Original}}\ (-)$ | $I_{r_{OPUS}}\ (-)$ | $I_{r_{AG}}\ (-)$ |
|---|---|---|---|
| 14 | 0.782 | 0.619 | 0.608 |
| 15 | 0.84 | 0.555 | 0.686 |

**Tabla 4.24 Diferencias entre la resiliencia original y la resiliencia de las redes optimizadas mediante cada metodología.**

| Red | $\Delta I_{R_{OPUS}}\ (-)$ | $\Delta I_{r_{AG}}\ (-)$ |
|---|---|---|
| 01 | 0.529 | -0.620 |
| 02 | -0.247 | -0.254 |
| 03 | 0.045 | 0.082 |
| 04 | -0.407 | -0.407 |
| 05 | -0.012 | -0.012 |
| 06 | -0.239 | -0.239 |
| 07 | -0.746 | -0.807 |
| 08 | -0.072 | -0.072 |
| 09 | -0.091 | -0.092 |
| 10 | -0.286 | -0.267 |
| 11 | -0.037 | -0.011 |
| 12 | -0.244 | -0.250 |
| 13 | -0.383 | -0.326 |
| 14 | -0.163 | -0.174 |
| 15 | -0.285 | -0.154 |

**Tabla 4.25. Presiones y velocidades máximas de las redes originales y las diseñadas mediante la metodología OPUS.**

| Red | $P_{max_{Orig}}\ (m.c.a.)$ | $P_{max_{OPUS}}\ (m.c.a.)$ | $v_{max_{Orig}}\ (m/s)$ | $v_{max_{OPUS}}\ (m/s)$ |
|---|---|---|---|---|
| 01 | 25.77 | 24.2 | 0.93 | 3.34 |
| 02 | 26.77 | 24.8 | 1.35 | 1.85 |
| 03 | 15.72 | 15.9 | 1.8 | 1.38 |
| 04 | 20.78 | 18.9 | 0.9 | 1.84 |
| 05 | 39.89 | 39.5 | 0.64 | 0.68 |
| 06 | 488.86 | 401 | 0.9 | 2.34 |
| 07 | 20.38 | 19.1 | 1.58 | 3.58 |
| 08 | 31.13 | 31.1 | 1.3 | 1.47 |
| 09 | 86.21 | 81.1 | 0.2 | 0.47 |
| 10 | 106.12 | 79.9 | 0.31 | 0.79 |
| 11 | 6.19 | 6.43 | 2.14 | 1.29 |
| 12 | 32.19 | 27.4 | 2.34 | 1.58 |
| 13 | 10.7 | 9.11 | 1.2 | 1.76 |
| 14 | 9.62 | 8.67 | 1.52 | 1.03 |
| 15 | 19.71 | 16.9 | 0.75 | 1.63 |

# 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en la metodología estipulada se procede a realizar el análisis de los resultados encontrados en esta investigación. Se presentan tablas y gráficas para mostrar de manera conveniente dicho análisis. En primer lugar, se encuentra el análisis de los costos de la red y después el análisis de la resiliencia.

## 5.1 Análisis de Costos

### 5.1.1 Selección de una única lista de ecuaciones de costo

Para empezar, se explica el por qué a partir de la red 03 no se continuó implementando la ecuación de Marchionni et al. (2016) para la cuantificación de los costos de las redes. Por un lado, al observar la Tabla 4.2 y la Tabla 4.3, es decir lo resultados de diseño de la red La Esperanza, se encuentra que cuando se utiliza OPUS los resultados de resiliencia son iguales para la ecuación de Peinado (2016) y para la ecuación de Marchionni et al. (2016), utilizadas como función objetivo del diseño. Lo mismo sucede con los resultados presentados en la Tabla 4.4 y la

Tabla 4.5 del diseño de la red La Arenosa. Al inspeccionar las redes producidas por el diseño optimizado en estos dos casos, se observa que con ambas ecuaciones de costo y la metodología OPUS se produce exactamente el mismo diseño. Para La Arenosa se realizaron algunos otros diseños preliminares considerando parámetros diferentes de diseño y se encontró siempre que los resultados de OPUS eran iguales entre sí, sin importar la función de costos que se usara.

Esto da indicios de que los resultados de diseño aplicando la metodología OPUS no están relacionados con la función de costos seleccionada. Esto último tiene sentido si se piensa que esta metodología se basa exclusivamente en criterios hidráulicos. Por otro lado, en el caso de los diseños realizados con la metodología AG sí se encuentran diferencias en los resultados de resiliencia cuando se cambia la ecuación de costos. No obstante, estas diferencias son bajas y pueden ser atribuidas al carácter estocástico que posee la metodología AG para lograr sus resultados.

Por otro lado, se considera que las ecuaciones de Peinado (2016) poseen idoneidad para la cuantificación de costos de suministro e instalación de tuberías en Colombia, puesto que fueron ecuaciones deducidas con base en información de proyectos reales desarrollados en este país. Idoneidad que no poseen las ecuaciones de Marchionni et al. (2016) por haber sido desarrolladas con base en información de redes de Portugal. Además, las unidades de las ecuaciones de Peinado (2016), es decir, los pesos colombianos, son las mismas que las de los presupuestos analizados en esta investigación, por lo cual es posible, con estas ecuaciones, realizar una comparación directa de costos entre los reportados por los presupuestos y los estimados con dichas ecuaciones. Así mismo,

estas unidades son más fácilmente entendidas e interiorizadas por personas colombianas, a quienes está dirigida, en primera instancia, esta investigación.

Adicionalmente, dicha idoneidad se evaluó comparando los costos calculados con las ecuaciones de Peinado (2016) y los costos reportados en el presupuesto, teniendo en cuenta las características de las redes de acuerdo con el modelo y de acuerdo con el presupuesto. Se calcularon diferencias porcentuales para las longitudes, volúmenes internos, superficies internas y los costos de acuerdo con la información de los modelos y del presupuesto:

**Tabla 5.1. Verificación de validez de ecuaciones de Peinado (2016).**

| Red | $\delta L$ (%) | $\delta S$ (%/$hab$) | $\delta V$ (%/($l/s$)) | $\delta C$ (%) |
|---|---|---|---|---|
| 01 | -4.28 | -5.42 | -22.94 | 2.00 |
| 02 | -0.33 | -0.62 | -0.88 | -5.37 |
| 03 | -0.14 | -0.24 | -0.31 | 15.42 |
| 04 | 2.05 | 1.37 | 0.66 | -1.16 |
| 05 | 0.00 | -0.01 | 0.05 | 49.17 |
| 06 | 2.96 | 2.79 | 2.54 | 55.53 |
| 07 | -9.21 | -2.27 | 3.18 | -34.47 |
| 08 | -10.96 | -17.96 | -27.68 | 1.73 |
| 09 | 0.43 | 0.54 | 0.66 | -10.65 |
| 10 | 0.00 | 0.00 | 1.15 | 9.59 |
| 11 | 0.06 | 0.05 | 0.02 | 23.53 |
| 12 | -2.69 | -2.54 | -2.34 | 13.68 |
| 13 | 0.00 | 0.00 | -0.07 | 21.18 |
| 14 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 19.14 |
| 15 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 21.86 |

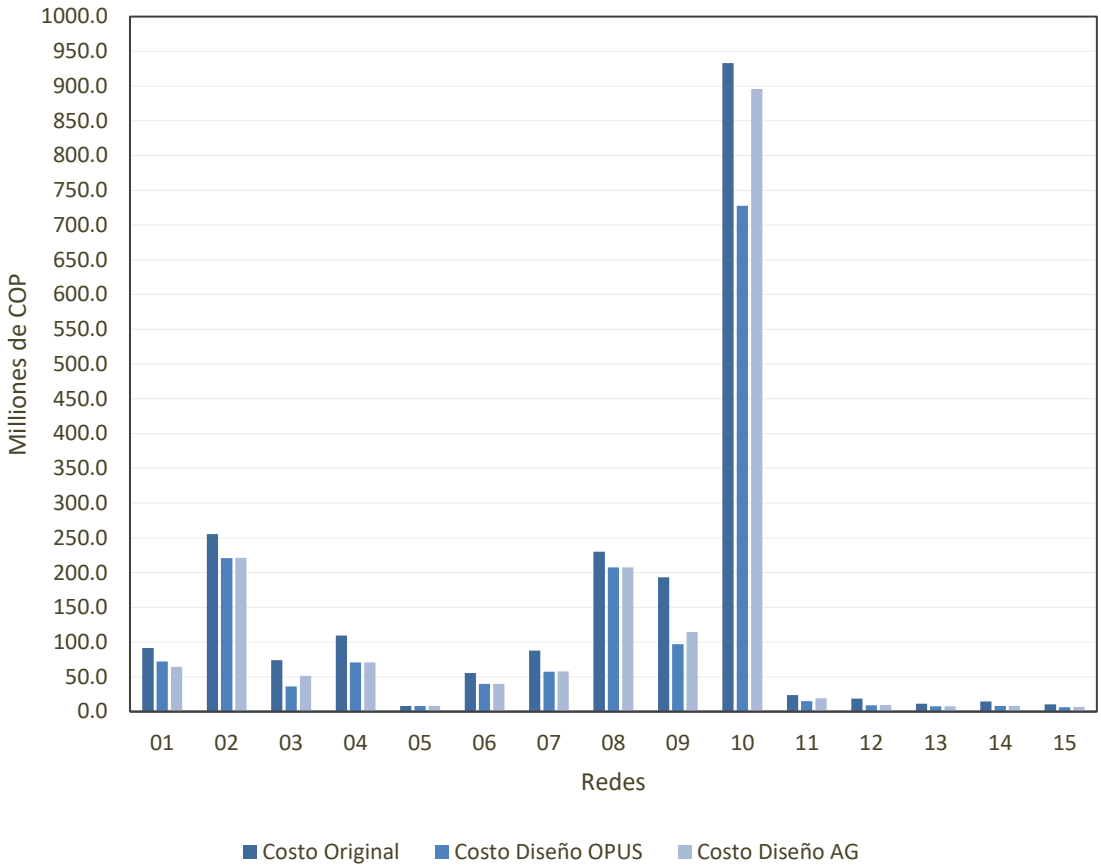
Como se observa en la Tabla 5.1, hay pequeñas discrepancias entre las características de las redes calculadas con base en la información del modelo y el presupuesto. Asimismo, salvo por la red 05 y 06 para todas las redes se presentan costos significativamente parecidos si se estiman con la ecuación de costos o con base en los precios estipulados en el presupuesto.

Por tales razones, se decidió utilizar únicamente las ecuaciones de Peinado (2016) para la cuantificación de los costos en esta investigación.

### 5.1.2 Variación de costos

En esta sección se realiza un análisis de los cambios que sufrieron los costos de suministro e instalación de las redes a causa del diseño optimizado.

A continuación, se presenta el costo original de cada una de las redes conformantes de la base de datos de esta investigación, así como también los costos de dichas redes después de que sus diseños fueran optimizados:



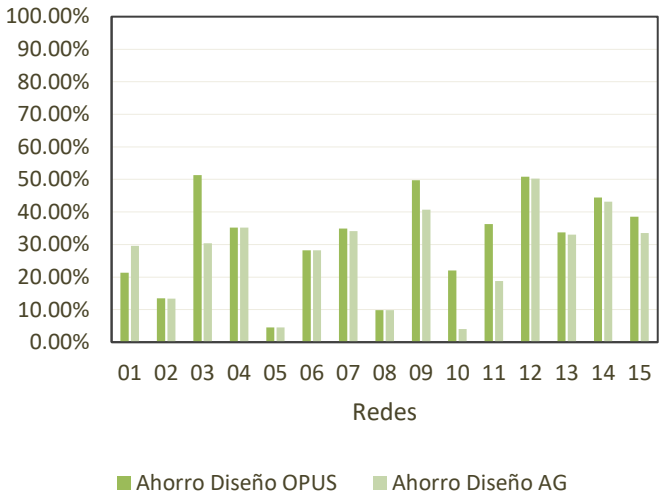

**Gráfica 5.1 Costo original de las redes de acuerdo con la ecuación de Peinado (2016).**

Como se evidencia en la Tabla 4.21, Tabla 4.22 y la Gráfica 5.1 que el diseño optimizado en todos los casos logró establecer diseños con costos menores a los de los diseños originalmente presentados ante el Mecanismo de Viabilización de Proyectos del MVCT.

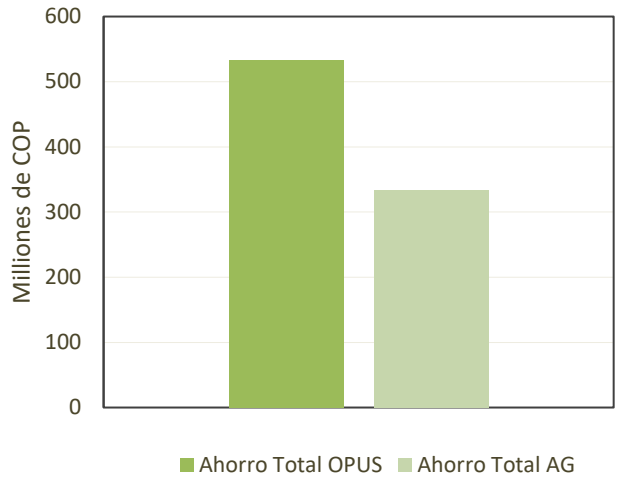
En este punto, es importante resaltar que la red 05, es decir, la red Apulo, presenta la menor de las disminuciones de costos al aplicar las metodologías de diseño optimizado. Esto se debe a que dicha red estaba diseñada prácticamente en su totalidad con el diámetro mínimo permitido por la normativa. Solamente una de sus tuberías tenía un diámetro más grande que el diámetro mínimo. Por esto, la optimización de dicha red solo cambió ese diámetro mayor por el diámetro mínimo, logrando una disminución total poco significativa. El de la red 05 es un diseño atípico, posiblemente

atribuido a que era una extensión de una red existente en la cual, en el punto de conexión a la red existente, existía una cabeza significativamente alta como para alimentar el tanque proyectado y permitir que este tanque tuviera una la energía suficiente para suplir las pérdidas por fricción y de energía necesarias para transportar el agua hacia los usuarios, aún con diámetros mínimos. Es probable que el diseñador haya notado esto y con base en ello haya planteado dicho diseño.

La disminución del valor del costo se considera como un ahorro que se hubiese podido realizar si las metodologías de optimización hubiesen sido usadas en vez del método tradicional de diseño. Entonces, se procedió a calcular el ahorro total que hubiese representado la implementación de las metodologías OPUS y AG. Esto se hizo sumando los ahorros logrados para cada una de las redes. A continuación, se presentan los resultados de ahorro total de cada metodología:




**Gráfica 5.2. Ahorro porcentual del costo logrado en cada una de las redes.**




Gráfica 5.3 Ahorro total logrado con la implementación de las metodologías OPUS y AG.

En la Gráfica 5.3 se observa que el ahorro total logrado por la implementación de OPUS es mayor que el que se hubiese alcanzado con la metodología AG. El valor del ahorro adicional logrado por OPUS es $199{,}536{,}636\ COP$. Esto es congruente con lo mostrado en la Tabla 4.22, en la cual se observa que en la mayoría de los casos OPUS provocó una mayor disminución que la provocada por AG en el costo de las redes. Adicionalmente, se hace evidente que el ahorro logrado con ambas metodologías es suficiente para cubrir los costos de varias redes como las incluidas en la base de datos de esta investigación. Por ejemplo, la suma del costo original de las redes 03, 05, 06, 07, 11, 12, 13, 14 y 15 es $303{,}805{,}772\ COP$, los cuales podrían cubrirse con el ahorro logrado con la metodología AG. Si además se suma el valor de las redes 01 y 04 se tendría un costo total de $504{,}374{,}976\ COP$, el cual podría ser cubierto con el ahorro alcanzado con OPUS. En este último caso, se estaría cubriendo el costo total de 11 redes. Esto demuestra la necesidad de implementación de metodologías de diseño optimizado de RDAPs si lo que se quiere optimizar es la inversión de recursos económicos para aumentar la construcción de nuevos de proyectos de RDAPs en Colombia y de esta manera aumentar la cobertura del servicio de acueducto y la calidad de vida de sus habitantes.

### 5.1.3 Variación porcentual de costos

Se procedió a analizar el cambio porcentual de los costos de las redes en relación con las características de estas: población servida, caudal, volumen interno ocupado y superficie interna con base en las variables propuestas en la metodología, tal como se muestra a continuación:

Tabla 5.2. Resultados de variables para análisis de variación porcentual de costos. OPUS.

| Red | $\delta C_{OPUS}$ (%) | $\delta C_P$ (%/$hab$) | $\delta C_Q$ (%/($l/s$)) |
|---|---|---|---|
| 01 | -21.37 | -0.0065 | -1.1688 |
| 02 | -13.48 | -0.0021 | -0.5240 |

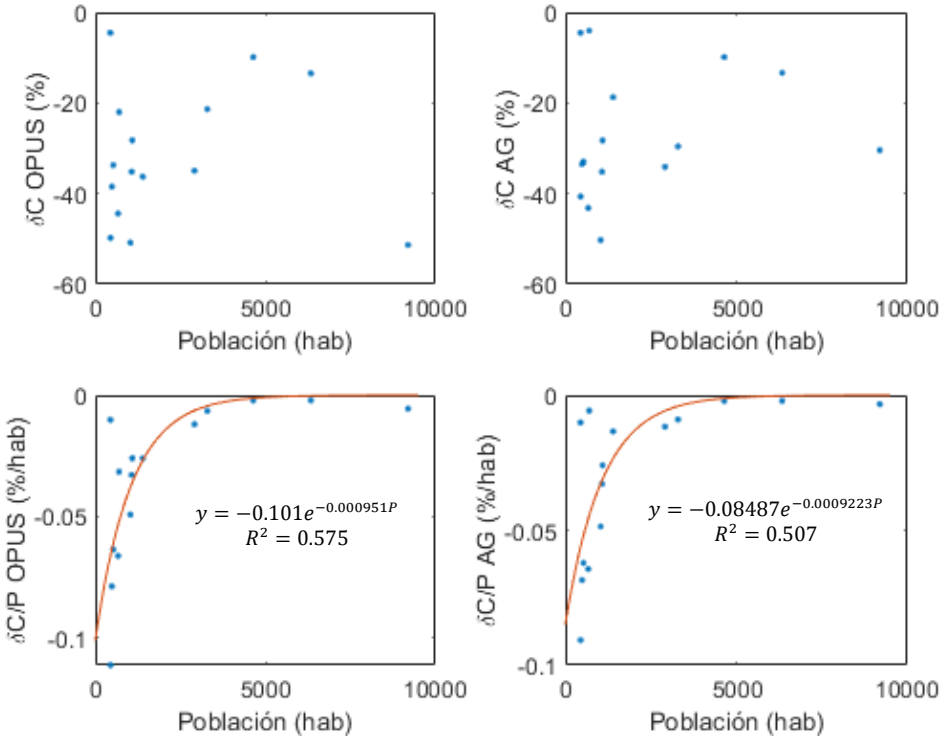
| Red | $\delta C_{OPUS}$ (%) | $\delta C_P$ (%/hab) | $\delta C_Q$ (%/(l/s)) |
|---|---|---|---|
| 03 | -51.34 | -0.0056 | -1.2380 |
| 04 | -35.20 | -0.0328 | -7.9275 |
| 05 | -4.51 | -0.0101 | -2.8552 |
| 06 | -28.26 | -0.0259 | -8.0733 |
| 07 | -34.94 | -0.0120 | -2.1188 |
| 08 | -9.88 | -0.0021 | -0.4834 |
| 09 | -49.79 | -0.1111 | -34.1017 |
| 10 | -22.03 | -0.0315 | -9.5350 |
| 11 | -36.29 | -0.0260 | -3.2090 |
| 12 | -50.85 | -0.0492 | -6.0748 |
| 13 | -33.73 | -0.0635 | -7.8432 |
| 14 | -44.40 | -0.0662 | -8.1776 |
| 15 | -38.49 | -0.0787 | -9.7205 |

**Tabla 5.3. Resultados de variables para análisis de variación porcentual de costos. AG**

| Red | $\delta C_{AG}$ (%) | $\delta C_P$ (%/hab) | $\delta C_Q$ (%/(l/s)) |
|---|---|---|---|
| 01 | -29.60 | -0.0090 | -1.6190 |
| 02 | -13.35 | -0.0021 | -0.5189 |
| 03 | -30.42 | -0.0033 | -0.7336 |
| 04 | -35.20 | -0.0328 | -7.9275 |
| 05 | -4.51 | -0.0101 | -2.8552 |
| 06 | -28.26 | -0.0259 | -8.0733 |
| 07 | -34.11 | -0.0117 | -2.0685 |
| 08 | -9.88 | -0.0021 | -0.4834 |
| 09 | -40.66 | -0.0908 | -27.8472 |
| 10 | -4.03 | -0.0058 | -1.7465 |
| 11 | -18.75 | -0.0134 | -1.6579 |
| 12 | -50.26 | -0.0486 | -6.0047 |
| 13 | -33.00 | -0.0621 | -7.6737 |
| 14 | -43.19 | -0.0644 | -7.9546 |
| 15 | -33.49 | -0.0685 | -8.4583 |

#### *5.1.3.1 Variación porcentual de costos y población*

En esta sección se grafican y analizan los cambios porcentuales en los costos y los cambios porcentuales en los costos normalizados por la población versus la población atendida por cada red.



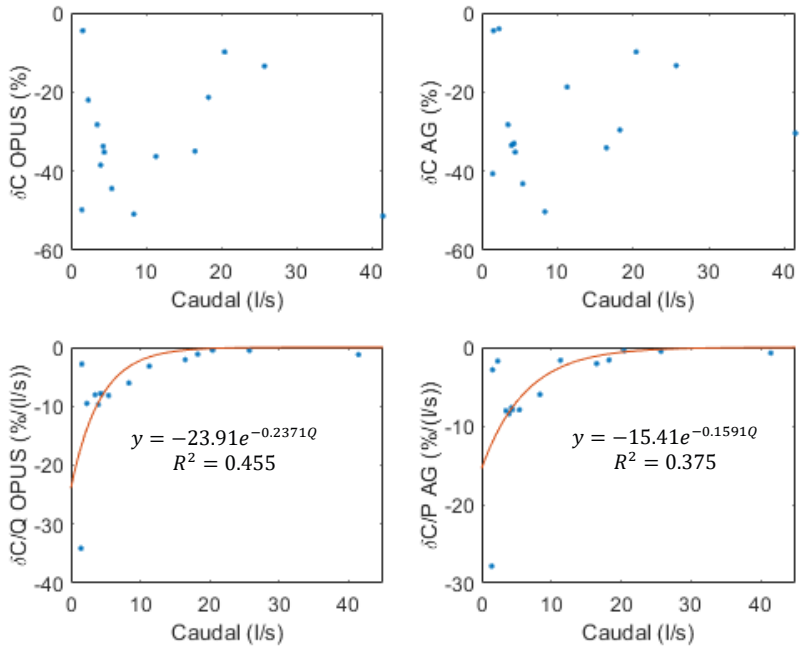

**Gráfica 5.4. Relación entre cambio porcentual en costos y población.**

En la Gráfica 5.4 no se observa que haya una relación clara entre la variación porcentual de los costos de las redes y la población atendida por estas. Esto es así para los resultados de ambas metodologías de diseño optimizado.

Por otro lado, sí se observa, para ambas metodologías de diseño optimizado, una tendencia exponencial entre la variación porcentual per cápita de los costos y el tamaño de la población servida. Se observa que entre más grande era la población de las redes analizadas, menor fue la disminución porcentual de los costos correspondientes a una persona de la población. Esto quiere decir que, si el costo de las redes analizadas fuese asumido directamente por las personas de las poblaciones atendidas, entre más grande sea la población, menor impacto en el beneficio porcentual respecto al costo experimentaría una persona. Dado esto, si dos poblaciones tienen una red con el mismo costo inicial, se espera que haya un mayor ahorro per cápita de recursos para las personas de la población más pequeñas. Adicionalmente, si se piensa que entre más grande sea una población, mayor será su capacidad económica, entonces se puede argumentar que con los diseños optimizados habrá un beneficio adicional real experimentado por las personas de poblaciones más pequeñas.

### *5.1.3.2 Variación porcentual de costos y caudal*

En esta sección se grafican y analizan los cambios porcentuales en los costos y los cambios porcentuales en los costos normalizados por el caudal versus el caudal entregada a cada red.




**Gráfica 5.5. Relación entre cambio porcentual en costos y caudal.**

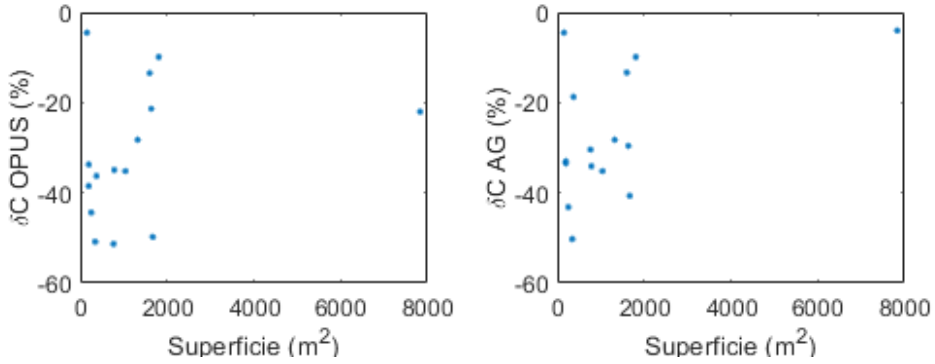
En la Gráfica 5.5. que no se observa que haya una relación clara entre la variación porcentual de los costos de las redes y el caudal con el que se alimentan la red. Esto es así para los resultados de ambas metodologías de diseño optimizado.

Por otro lado, sí se observa, para ambas metodologías de diseño optimizado, una tendencia exponencial entre la variación porcentual por unidad de caudal y el caudal total que alimenta entregado. Se observa que entre más grande era el caudal total entregado por las redes analizadas, menor fue la disminución porcentual de los costos por litro de agua entregado cada segundo de agua. Esto quiere decir que, si el costo de las redes analizadas se evaluara por litro de agua que entregará cada segundo la red, se tiene entre mayor sea el caudal total entregado, menor impacto en el beneficio porcentual respecto al costo de inversión experimentaría la población por transportar un litro por segundo de agua adicional. Dado esto, si dos poblaciones tienen una red con el mismo costo inicial, se espera que haya un mayor ahorro unitario de inversión económica en el transporte del agua para aquella población que requiera menos agua. En otras palabras, cuando se use el diseño optimizado habrá una mayor eficiencia en la inversión para el transporte de agua para aquellas poblaciones que consuman menos agua.

En general, se observó que, al intentar relacionar el caudal con la variación porcentual de costos, el comportamiento encontrado es similar al demostrado por la población en relación con la variación porcentual de costos. Esto hace sentido si consideramos que el caudal está fuertemente relacionado con la población de manera lineal.

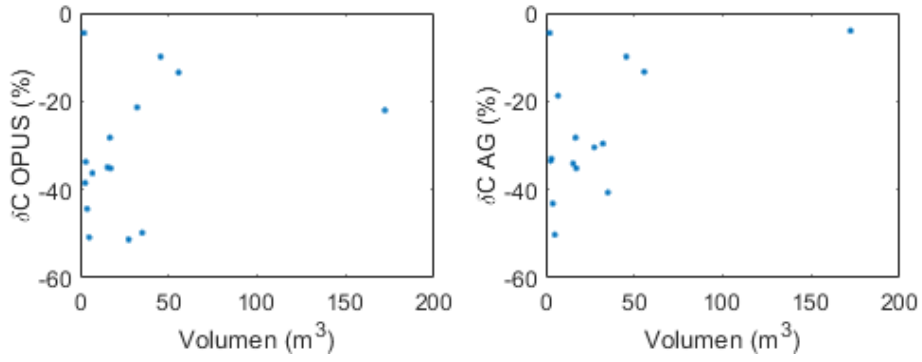
### *5.1.3.3 Variación porcentual de costos y tamaño de la red*

En esta sección se grafican y analizan los cambios porcentuales en los costos versus el área superficial interna y versus el volumen interno de las tuberías de las de redes.




**Gráfica 5.6. Relación entre cambio porcentual en costos y superficie.**

En la Gráfica 5.6 no se observa que haya una relación clara entre la variación porcentual de los costos de las redes y el área superficial interna de la red. Esto es así para los resultados de ambas metodologías de diseño optimizado.




**Gráfica 5.7. Relación entre cambio porcentual en costos y volumen.**

En la Gráfica 5.7 no se observa que haya una relación clara entre la variación porcentual de los costos de las redes y el volumen ocupado por los diámetros internos de las tuberías de la red. Esto es así para los resultados de ambas metodologías de diseño optimizado.

## 5.2 Análisis de Resiliencia

Se encuentra que el diseño optimizado en todos los casos genera una disminución del Índice de Resiliencia al tiempo que aumenta la potencia específica disipada. Esto tiene sentido al considerar que el índice de resiliencia se cuantifica respecto a la presión mínima permisible y el valor de la presión en los de la red. En un diseño optimizado se buscan reducir los diámetros para disminuir el costo total. Esto provoca una disminución generalizada de las presiones en la red, lo cual genera la disminución del índice de resiliencia, puesto que lleva a las presiones del sistema a ser generalizadamente más cercanas a la presión mínima permisible.

**Tabla 5.4. Resultados de variables para análisis de variación porcentual de resiliencia. OPUS.**

| Red | $\delta I_{r_{OPUS}}$ (%) | $\delta I_{r_P}$ (%/$hab$) | $\delta I_{r_Q}$ (%/($l/s$)) |
|---|---|---|---|
| 01 | -57.375 | -0.0174 | -3.1387 |
| 02 | -56.522 | -0.0089 | -2.1976 |
| 03 | 20.930 | 0.0023 | 0.5047 |
| 04 | -42.662 | -0.0398 | -9.6087 |
| 05 | -1.233 | -0.0028 | -0.7806 |
| 06 | -27.006 | -0.0248 | -7.7159 |
| 07 | -82.068 | -0.0281 | -4.9768 |
| 08 | -12.121 | -0.0026 | -0.5933 |
| 09 | -9.201 | -0.0205 | -6.3022 |
| 10 | -32.063 | -0.0459 | -13.8800 |
| 11 | -7.923 | -0.0057 | -0.7005 |
| 12 | -30.161 | -0.0292 | -3.6034 |
| 13 | -60.220 | -0.1134 | -14.0047 |
| 14 | -20.844 | -0.0311 | -3.8387 |
| 15 | -33.929 | -0.0694 | -8.5678 |

**Tabla 5.5. Resultados de variables para análisis de variación porcentual de resiliencia. AG**

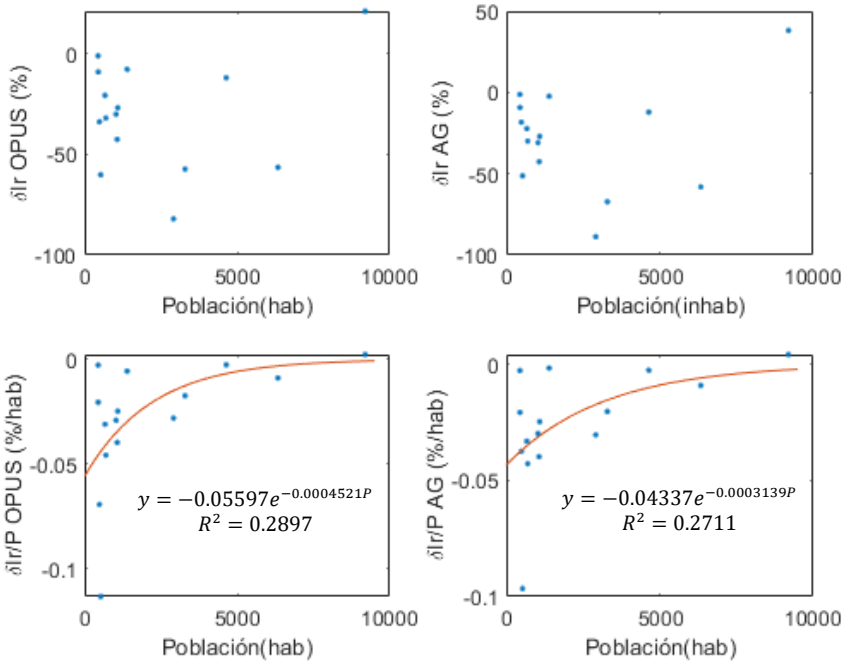
| Red | $\delta I_{r_{AG}}$ (%) | $\delta I_{r_P}$ (%/$hab$) | $\delta I_{r_Q}$ (%/($l/s$)) |
|---|---|---|---|
| 01 | -67.245 | -0.0204 | -3.6786 |
| 02 | -58.124 | -0.0092 | -2.2599 |
| 03 | 38.140 | 0.0041 | 0.9197 |
| 04 | -42.662 | -0.0398 | -9.6087 |
| 05 | -1.233 | -0.0028 | -0.7806 |
| 06 | -27.006 | -0.0248 | -7.7159 |
| 07 | -88.779 | -0.0304 | -5.3838 |
| 08 | -12.121 | -0.0026 | -0.5933 |
| 09 | -9.302 | -0.0208 | -6.3715 |
| 10 | -29.933 | -0.0428 | -12.9579 |

| Red | $\delta I_{r_{AG}}$ (%) | $\delta I_{r_P}$ (%/$hab$) | $\delta I_{r_Q}$ (%/($l/s$)) |
|---|---|---|---|
| 11 | -2.355 | -0.0017 | -0.2083 |
| 12 | -30.902 | -0.0299 | -3.6920 |
| 13 | -51.258 | -0.0965 | -11.9204 |
| 14 | -22.251 | -0.0332 | -4.0977 |
| 15 | -18.333 | -0.0375 | -4.6296 |

#### *5.2.1.1 Variación porcentual de resiliencia y población*

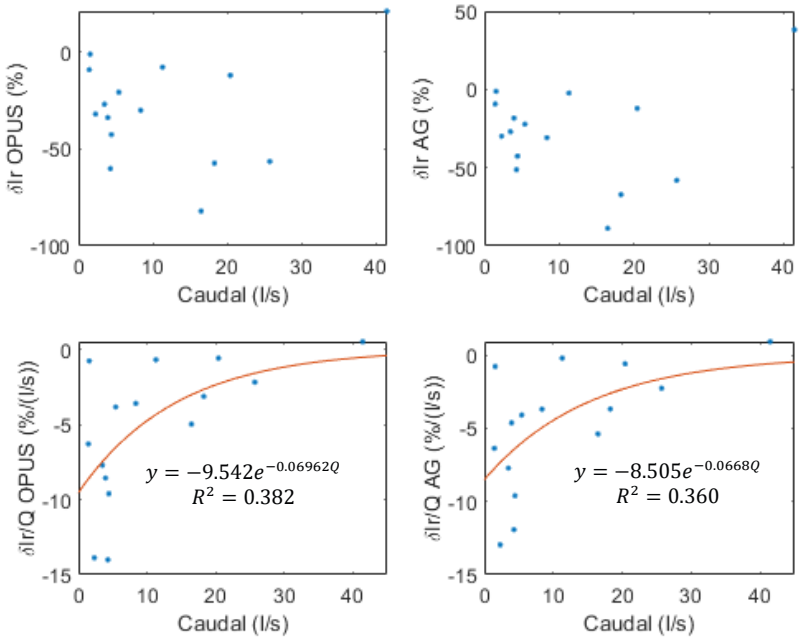
En esta sección se grafican los cambios porcentuales en la resiliencia y los cambios porcentuales en la resiliencia normalizados por la población versus la población atendida por cada red.

En la Gráfica 5.8 no se encuentra ninguna relación entre la variación porcentual de la resiliencia y la población atendida por una red. Por otro lado, sí se observa una ligera tendencia exponencial entre la población y el cambio porcentual en la resiliencia per cápita. A mayor población, menor impacto tiene el diseño optimizado en la disminución de la resiliencia para una persona. Esto se puede interpretar como que, entre mayor sea una población, menor empeoramiento porcentual habrá en la confiabilidad del servicio para una persona por causa de la implementación del diseño optimizado.




Gráfica 5.8. Relación entre cambio porcentual en resiliencia y población.

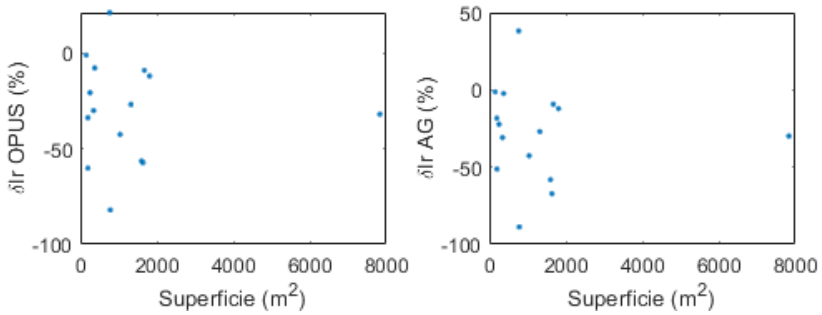
### 5.2.1.2 *Variación porcentual de resiliencia y caudales*




Gráfica 5.9. Relación entre cambio porcentual en resiliencia y caudal.

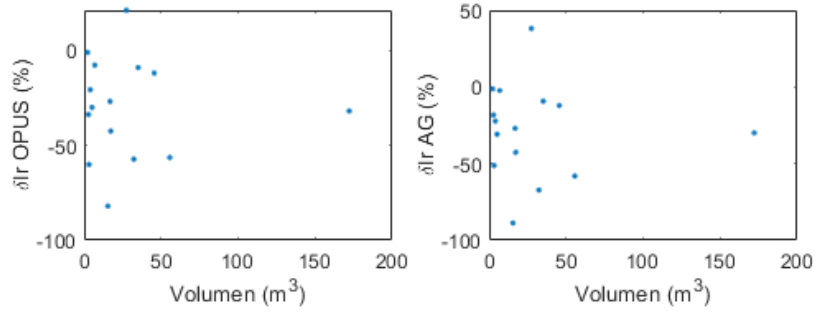
Debido a la fuerte relación existente entre el caudal y la población servida en la Gráfica 5.9 se evidencia un comportamiento muy parecido al descrito para la Gráfica 5.8. Por lo cual, el análisis para este caso es similar al de la relación de población con resiliencia. A mayores caudales, menor disminución porcentual de la resiliencia por unidad de caudal transportado por la red. Esto quiere decir que entre más agua demande una población, menor disminución de la confiabilidad habrá por cada litro de agua entregado cada segundo.

#### *5.2.1.3 Variación porcentual de resiliencia y tamaño de la red*




**Gráfica 5.10. Relación entre cambio porcentual en resiliencia y superficie.**

En la Gráfica 5.10 no se observa que haya una relación clara entre la variación porcentual de resiliencia de las redes y la superficie interna de la red. Esto es así para los resultados de ambas metodologías de diseño optimizado.




**Gráfica 5.11. Relación entre cambio porcentual en resiliencia y volumen.**

En la Gráfica 5.11 no se observa que haya una relación clara entre la variación porcentual de resiliencia de las redes y el volumen interno de la red. Esto es así para los resultados de ambas metodologías de diseño optimizado.

## 5.3 Análisis de velocidades y presiones máximas

Además de los parámetros de diseño contemplados en esta investigación, las velocidades máximas y las presiones máximas son parámetros restringidos por la normativa y la resistencia de los materiales de las tuberías. Con el diseño optimizado se espera un aumento en las velocidades de las redes y una disminución en las presiones. Esto debido a que el diseño optimizado, con el objetivo de disminuir los costos, provoca una disminución generalizada de los diámetros de las tuberías que conforman una red, para lo cual, debido a que el caudal se mantiene constante, la misma cantidad de agua fluirá por un área menor, produciendo un aumento en las velocidades. A su vez, este aumento en las velocidades del agua dentro de la red generará un aumento en las pérdidas por fricción y las pérdidas menores del sistema, lo cual conlleva a una disminución generalizada de las presiones en los nodos del sistema. Esto se evidencia en los resultados de la Tabla 4.25.

En el RAS 2000, que fue la normativa bajo la cual se diseñaron todas las redes de la base de datos, no se especifica ninguna restricción para la velocidad máxima del agua en RDAPs. Donde sí se aprecia un valor recomendable para este parámetro es en el Título B del RAS, publicado en 2010, en el cual se recomienda una velocidad máxima de $6\ m/s$ para el PVC y $5\ m/s$ para el PEAD (PE 100/PN 10 en el caso de esta investigación). Con base en esto, de acuerdo con la Tabla 4.25, se encuentra que en ninguno de los diseños optimizados con la metodología OPUS excedió este valor recomendable de velocidad máxima.

Por su parte, como se mencionó en el marco teórico, sí existe un valor restrictivo de presión máxima en el RAS 2000. Dicho valor es $60\ m.c.a.$ y se indica que cualquier valor por encima de este debe ser justificado ante la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. En la Tabla 4.25 se encuentra que los diseños optimizados de las redes 06, 09 y 10 no cumplen con esta restricción. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las redes 06 y 10, tenían válvulas y/o cámaras de quiebre en presiones en su configuración original y que estas fueron eliminadas para el diseño optimizado. Las presiones originales para estas redes fueron halladas sin tener en cuenta las válvulas. Agregando válvulas a los diseños optimizados es posible disminuir la presión máxima por debajo del límite especificado por la normativa.

## 5.4 Análisis de incertidumbre

Es importante tener en cuenta que los resultados presentados se encuentran afectados por la incertidumbre asociada con la aplicación, en algunos casos, de las ecuaciones de costos a tuberías con clases diferentes (diferente relación de diámetro-espesor) para las cuales fueron desarrolladas y a tuberías con diámetros por fuera del rango de diámetros para las cuales las funciones de costos fueron deducidas. Esto sucedió para los casos de la red 04, 06, 09, 10, 11, 12, 13, 14 y 15. Así mismo, existe una incertidumbre asociada con el hecho de que las funciones de costos fueron estimadas con información histórica de precios, es decir, incluyendo información de varios años, mientras que

en esta investigación fueron aplicadas directamente a redes diseñadas para un año específico, con un listado de precios de un año dado. Deben considerarse factores como la inflación y la regionalización de los precios de las tuberías, puesto que el transporte (costo incluido en el suministro de las redes) y la instalación dependen de las condiciones particulares de cada zona, por ejemplo: tipo de suelo, accesibilidad, disponibilidad de mano de obra, etc.

## 5.5 Prácticas de diseño de RDAPs

Se encontró que, en algunas redes, no obstante ser posible la utilización de diámetros más pequeños con diferente RDE, pero del mismo material, estos no fueron considerados en los diseños originales presentados en el Mecanismo de Viabilización de Proyectos del MVCT. Así mismo, se encontró que en redes de PE 100/PN 10 era posible la utilización de tuberías con diámetro nominal de 75 mm, pero estas no fueron utilizadas. Tal vez porque dichas tuberías requerían de un pedido anticipado para su producción, al menos para el caso del proveedor PAVCO. Tal como se mencionó en la sección de metodología, en los diseños optimizados fueron incluidos todos los diámetros que estuviesen por encima del mínimo exigido por la norma y que fuera del mismo material del diseño original presentado en el MVCT. Se consideró que el utilizar diámetros con diferente RDE o diámetros de tuberías que requerían un pedido anticipado de fabricación no constituían una limitante para el desarrollo del diseño de RDAPs, ni tampoco una afectación significativa para los costos y la construcción de la red. Mas bien, se entendió que no incluir estos diámetros representaba una afectación negativa a los diseños de las RDAPs.

# 6 CONCLUSIONES

- Para todas las redes analizadas el diseño optimizado con OPUS y AG redujo los costos de suministro e instalación de las tuberías. En la mayoría de los casos OPUS presentó una mayor disminución de costos en el diseño que AG.
- Excepto en un caso, la resiliencia de la red empeoró cuando se realizó el diseño optimizado de las redes mediante las metodologías OPUS y Algoritmos Genéticos.
- La metodología AG presenta resultados similares a los de OPUS. Esto da indicios de que metodologías de optimización de distinta naturaleza (basada en criterios hidráulicos o métodos estocásticos) presentan desempeños similares en los diseños de RDAPs en Colombia.
- El ahorro total logrado con la optimización de los diseños es suficiente para financiar varias redes como las analizadas en esta investigación. Con base en esto se puede afirmar que de implementarse el diseño optimizado se podrían liberar recursos para el financiamiento de nuevos proyectos de RDAPs en Colombia.
- El tamaño de la población se encuentra relacionado de manera exponencial con el ahorro porcentual per cápita que produciría el diseño optimizado en las redes analizadas. En las redes destinadas a poblaciones más pequeñas se espera un mayor beneficio real con la aplicación de diseño optimizado.
- El caudal entregado a una población se encuentra relacionado de manera exponencial con el ahorro porcentual unitario por unidad de caudal que produciría el diseño optimizado en las redes analizadas. Esto implica que para poblaciones con menores consumos se presenta una mayor eficiencia, en términos porcentuales, en la inversión inicial para el transporte del agua, cuando se utiliza diseño optimizado.
- El tamaño de la población se encuentra relacionado de manera exponencial con el empeoramiento porcentual de la resiliencia per cápita que produciría el diseño optimizado en las redes analizadas. Esto quiere decir que en redes destinadas a poblaciones más pequeñas se espera una mayor disminución porcentual en la confiabilidad de la prestación del servicio para cada persona cuando se realice diseño optimizado.
- El caudal entregado a una población se encuentra relacionado de manera exponencial con el empeoramiento porcentual de la resiliencia por unidad de caudal transportado por la red que produciría el diseño optimizado en las redes analizadas. Esto implica que para poblaciones con menores consumos se presenta una mayor disminución porcentual en la confiabilidad de cada litro de agua entregado por segundo cuando se aplica el diseño optimizado a la red.
- No es posible identificar una relación clara entre el porcentaje de reducción de costos y las características de las redes analizadas tales como población, caudal entrega, superficie

interna y volumen interno. Tampoco es posible identificar una relación clara entre el porcentaje de variación de resiliencia y las características de las redes analizadas.

- No incluir todos los diámetros permitidos por la normativa y existen en la oferta comercial obstaculiza la consecución de diseños con menores costos de suministro e instalación de tuberías. No se encuentra una razón suficiente para justificar la no utilización de diámetros más pequeños con diferente RDE o diámetros de tuberías que requiera de pedido previo para su fabricación.
- Con la no exigencia de diseño optimizado en Colombia no se está garantizando la obtención de diseños óptimos en cuento a los costos de suministro e instalación de tuberías de RDAPs. Así mismo, no se evidencia que se estén logrando diseños enfocados en optimizar la resiliencia de las redes. A causa de esto, no hay garantía de que la inversión recursos en la construcción de RDAPs de agua en Colombia se haga de acuerdo con las necesidades socioeconómicas de nuestro país. Existe una necesidad en nuestro país de que se incluya el requerimiento del diseño optimizado de RDAPs en la normativa del sector de agua y saneamiento básico de Colombia, no solo en términos de costos de construcción, sino también de la resiliencia de las redes.

# 7 RECOMENDACIONES

- Para los futuros diseños de las redes de la base de datos se recomienda utilizar una sola función de costos, la ecuación de Peinado (2016). Estas ecuaciones deben ser complementadas con estudios regionales de costos de suministro e instalación de tuberías.
- Realizar una investigación de revisión del estado del arte de las normativas que regulan el diseño de RDAPs en Colombia y alrededor del mundo.
- Realizar la comparación entre los diseños de RDAPs presentados en el MVCT y diseños realizados mediante técnicas de optimización multiobjetivo que involucren, por lo menos, el criterio de costos y resiliencia de la red. Evaluar el desempeño de metodologías multicriterio respecto a metodologías que solo contemplan la reducción de costos como criterio de optimización.
- A los diseñadores se les recomienda tener en consideración todas las listas de diámetros que estén disponibles sin importar la RDE. Además, deben ser incluidos la totalidad de los diámetros pertenecientes en estas listas, a pesar de que algunos de estos requieran de un pedido previo de fabricación.
- Esta investigación debe ser complementada con el análisis de más diseños de nuevas RDAPs en Colombia.
- Se solicita fortalecer los canales de divulgación de conocimiento entre la academia y el sector público en Colombia. Se sugiere que se creen eventos de comunicación en los que estén presentes representantes de ambos sectores y se socialicen las experiencias y necesidades identificados por cada parte, en particular en lo referente al diseño de RDAPs.
- Se recomienda que el MVCT demande la implementación de metodologías para el diseño optimizado de RDAPs en la normativa del sector de agua y saneamiento básico. Esto hará posible la liberación de recursos económicos para inversión en la construcción de nuevas RDAPs.
- Se sugiere que el MVCT incluya la resiliencia de las redes como uno de los parámetros de diseño de nuevas RDAPs en Colombia. Así mismo, el MVCT debe establecer valores aceptables de resiliencia con base en las características socioeconómicas de cada población beneficiada por las RDAPs.
- Se recomienda que el gobierno nacional a través de MVCT o las entidades competentes inviertan en el desarrollo de aplicativos de dominio público que permitan realizar el diseño optimizado de RDAPs.

# 8 REFERENCIAS

Clark, R. M., Sivaganesan, M., Selvakumar, A., & Sethi, V. (2002). Cost Models for Water Supply Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *128*(5), 312–321. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2002)128:5(312)

Cunha, M., & Sousa, J. (1999). Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *125*(4), 215–221. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:4(215)

EAAB. (2018). Criterios para Diseño de Red de Acueducto Secundaria y Menor de Distribución.

EPM. (2013). Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de las Empresas Públicas de Medellín E. S. P. Recuperado de https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/normatividad_y_legislacion/agua/Norma_Diseno_Acueducto_2013.pdf

Geem, Z. W. (2009). Particle-swarm harmony search for water network design. *Engineering Optimization*, *41*(4), 297–311. https://doi.org/10.1080/03052150802449227

Jayaram, N., & Srinivasan, K. (2008). Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing: WATER DISTRIBIUTION NETWORKS. *Water Resources Research*, *44*(1). https://doi.org/10.1029/2006WR005316

Laucelli, D., Giustolisi, O., & Todini, E. (2009). New Concepts and Tools for Pipe Network Design. En *Water Distribution Systems Analysis 2008* (pp. 1–12). Kruger National Park, South Africa: American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/41024(340)22

López, L., Cuero, P., Díaz, O., Páez, D., & Saldarriaga, J. (2013). Diseño de redes de distribución de agua potable por medio de la metodología OPUS e inicio en caliente. Presentado en XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje.

Marchionni, V., Cabral, M., Amado, C., & Covas, D. (2016). Estimating Water Supply Infrastructure Cost Using Regression Techniques. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *142*(4), 04016003. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000627

Mohan, S., & Babu, K. S. J. (2010). Optimal Water Distribution Network Design with Honey-Bee Mating Optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *24*(1), 117–126. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000018

Oliker, N., & Ostfeld, A. (2013). Multi-Objective Optimization of Cost and Resilience of Water Distribution System Design. En *World Environmental and Water Resources Congress 2013* (pp. 845–856). Cincinnati, Ohio: American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784412947.081

Peinado, C. (2016). *Ecuaciones de Costo para el Diseño Optimizado de Redes de Agua Potable y Alcantarillado*. Universidad de los Andes, Bogotá D.C.

Saldarriaga, J., Takahashi, S., Hernéndez, F., Díaz, D. M., & Ochoa, S. (2010). An Energy Methodology for the Design of Water Distribution Systems. En *World Environmental and Water Resources Congress 2010* (pp. 4303–4313). Providence, Rhode Island, United States: American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/41114(371)437

Saldarriaga, Juan. (2016). *Hidráulica de Tuberías, Abastecimiento de Agua, Redes y Riegos* (Third). Bogotá D.C.: ALFAOMEGA.

Simpson, A. R., Dandy, G. C., & Murphy, L. J. (1994). Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *120*(4), 423–443. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(423)

Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, *2*(2), 115–122. https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00049-2

Wu, I. P. (1975). Design on Drip Irrigation Main Lines. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*.

Yates, D., Templeman, A., & Boffrey, T. (1984). The computational complexity of the problem of determining least capital cost designs for water supply networks. *Engineering Optimization*, *7*(2), 143–155.

# 9 ANEXOS

1. Listas de diámetros utilizadas para los diseños optimizados.
2. Hoja de cálculo con el consolidado de los resultados.
3. Modelos de EPANET de redes originales y de diseños optimizados.