



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Análisis de la incidencia de los
cambios fuertes de pendiente en el
comportamiento hidráulico de las
redes de acueducto.
Casos de estudio: comunas Tesorito,
Palogrande, Ecoturístico Cerro de
oro y la Florida (Villamaría)**

Jhonnatan Alexander Llano Mosquera

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Maestría en Ingeniería – Recursos hidráulicos
Manizales, Colombia
2017

**Análisis de la incidencia de los
cambios fuertes de pendiente en el
comportamiento hidráulico de las
redes de acueducto.
Casos de estudio: comunas Tesorito,
Palogrande, Ecoturístico Cerro de
oro y la Florida (Villamaría)**

Jhonnatan Alexander Llano Mosquera

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos hidráulicos

Directora:

Ph.D. JEANNETTE DEL CARMEN ZAMBRANO NÁJERA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Ingeniería – Recursos hidráulicos

Manizales, Colombia

2017

Resumen

Las redes de distribución de agua potable de la ciudad de Manizales están regidas por la presencia de una topografía montañosa que genera cambios abruptos en las presiones. El problema que presenta el sistema es la necesidad de disipar energía en el camino sin agotar la misma, puesto que el cambio de pendientes positivas a negativas concibe deficiencias en algunos sectores.

Este documento se enfoca en el análisis del comportamiento hidráulico de las redes de acueducto basado en los efectos generados por el cambio fuerte de pendiente y su incidencia en la gestión y operación del sistema. Es posible representar de forma gráfica un sistema de distribución por medio de un modelo hidráulico, el cual requiere ser validado con información obtenida en campo y constituida de la topología de las redes y usar el modelo para detectar posibles problemas en las redes.

Los modelos son utilizados para analizar toda la red de la ciudad y detectar comportamientos atípicos, por ejemplo, en los lugares donde la presión puede fluctuar entre 50 y 150 psi en menos de 500 metros y generar afectaciones a largo plazo. Además, proponer mejoras al sistema de distribución de agua mediante la instalación de válvulas que regulan el flujo del agua y reducen las fluctuaciones descritas anteriormente. Las válvulas se ubican de acuerdo con la determinación de los pisos de presión y la evaluación de las tuberías con mayor incidencia en el sistema de distribución.

Finalmente, el modelo es utilizado para optimizar la red, por medio de la aplicación la función objetivo de "maximizar la cobertura de presiones adecuadas". Es posible que las zonas de la ciudad con una presión superior al 70% que la estipulada se modifiquen para reducir la presión a solo un 5% más que el rango. La red resultante mejora el comportamiento del acueducto y su eficiencia.

Palabras clave: Modelación, calibración, optimización, pendientes, gestión, redes y acueducto.

Abstract

Analysis of the incidence of the strong changes of slope in the hydraulic behavior of the aqueduct networks. Case study: Tesorito, Palogrande, Ecoturístico Cerro de oro communes and La Florida (Villamaría)

The water distribution network in the city of Manizales govern by presence of a mountainous topography generated by abrupt changes in pressures. The problem presented by system is need to dissipate energy on the road without exhausting it, since change from positive to negative slopes produce pressure deficiencies in some network places.

This paper focuses on the analysis of the hydraulic behavior of the water distribution in presence of strong changes of its slope and the incidence of these slopes in the management and operation of the system. It is possible to represent the distribution system using a graphical representation of the hydraulic model according to the topology captured in field and constituted of networks topology, to use the model to detect possible problems in the network.

The models used to analyze all the network of the city and to detect atypical behaviors, for example, in which places the pressure can fluctuate between 50 and 150 psi in less than 500 meters and generate long-term effects. In addition, to propose improvements to Water Distribution System by installing valves that regulate the flow of the water and reduce the above-described fluctuations. Valves locate according to the determination of pressure floors and evaluation of pipes with highest incidence in the distribution system.

Finally, the model used to optimize the network, through the application the objective function of "maximizing the coverage of adequate pressures". It is possible that city areas with a water pressure 70% higher than the stipulated it modified to reduce the pressure to only a 5% higher than the range. The resulting network improves the behavior of the aqueduct and it efficiency.

Keywords: Modeling, calibration, optimization, slopes, management, networks and aqueduct.

Contenido

Resumen.....	4
Abstract	5
Lista de figuras	8
Lista de Tablas	16
Introducción	18
1. Descripción del problema	22
2. Objetivos	28
2.1 Objetivo general	28
2.2 Objetivos específicos.....	28
3. Marco teórico	30
3.1 Pérdidas comerciales	30
3.2 Pérdidas técnicas	30
3.3 Índice de agua no contabilizada (IANC)	31
3.4 Programas de control de pérdidas.....	32
3.5 Estaciones reguladoras de presión.....	34
3.6 Equipos de medición de caudal y presión.....	36
3.6.1 Manómetros digitales.....	36
3.6.2 Medidor ultrasónico	37
3.7 Modelación hidráulica.....	38
3.7.1 Antecedentes de la modelación hidráulica	45
3.7.2 Esqueletización.....	46
3.7.3 Análisis de sensibilidad de variables.....	47
3.8 Optimización hidráulica	48
3.8.1 Formulación del diseño optimizado de las redes.....	49
3.8.2 Algoritmos genéticos.....	49
3.8.3 Técnicas de reducción del espacio muestral.....	52
3.8.4 Variables de decisión y restricciones	54
3.9 Sectorización hidráulica.....	55
4. Metodología.....	57
4.1 Recopilación de información topológica	57
4.1.1 Análisis de información existente	57
4.1.2 Recopilación de información faltante	58
4.2 Selección de puntos de medición de presión y caudal.....	59
4.2.1 Validación, control y seguimiento de los datos.....	62
4.2.2 Construcción de las curvas de presión y patrones de consumo.....	63
4.2.3 Estimación del índice de agua no contabilizada (IANC) para cada zona	63
4.3 Modelo computacional, calibración y validación hidráulica	64
4.3.1 Análisis de sensibilidad de las variables	80
4.3.2 Calibración del modelo	81
4.4 Optimización de las redes hidráulicas	86

4.4.1	Reducción del espacio muestral (Potencia Unitaria - PU)	87
4.4.2	Variables de decisión	87
4.4.3	Funciones objetivo	88
4.4.4	Restricciones	90
4.4.5	Definición proceso de optimización	90
5.	Aplicaciones y resultados	92
5.1	Descripción área de estudio.....	92
5.2	Recopilación de información	104
5.2.1	Análisis de Información existente	104
5.2.2	Recopilación de Información faltante.....	105
5.2.3	Recolección de información de presión y caudal.....	108
5.2.4	Validación, control y seguimiento de los datos	112
5.2.5	Construcción de las curvas de presión y patrones de consumo	114
5.2.6	Índice de Agua No Contabilizada (IANC).....	122
5.3	Modelo, calibración y validación hidráulica	123
5.3.1	Análisis de sensibilidad de las variables.....	129
5.3.2	Calibración del modelo.....	134
5.3.3	Análisis de resultados del comportamiento actual de las redes.....	151
5.4	Propuesta de optimización del funcionamiento de las redes	175
5.4.1	Parámetros de optimización	175
5.4.2	Definición y resultados de la optimización hidráulica	176
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	222
6.1	Conclusiones	222
6.2	Recomendaciones	224
7.	Bibliografía	225

Lista de figuras

Figura 1. Distribución agua existente en el mundo (Boggiano, 2013).....	19
Figura 2. Cambio de pendientes en las redes de distribución (Elaboración propia, 2016)	23
Figura 3. Daño de tubería de acueducto (LA PATRIA, 2014).....	24
Figura 4. Proporción de ciudadanos satisfechos con los servicios públicos (Encuesta de Percepción Ciudadana. Manizales Como Vamos, 2015).....	26
Figura 5. Árbol de problemas (Elaboración propia, 2016)	27
Figura 6. Árbol de objetivos (Elaboración propia, 2016)	29
Figura 7. Pérdidas técnicas generadas por fugas en las redes (Saldarriaga, 2016)	31
Figura 8. Análisis de fugas IANC (Open International Systems, 2014).....	32
Figura 9. Instalación de medidor para zonas de usos irregulares en el sector del Águila en el barrio El Nevado de la ciudad de Manizales (Elaboración propia, 2016)	33
Figura 10. Instalación de medidores para sectores hidráulicos en el barrio La Montana de la ciudad de Manizales (Elaboración propia ,2016)	33
Figura 11. Válvula reductora de presión con dos pilotos reductores controlados (CLA- VAL, 2017).....	35
Figura 12. Estación reguladora ubicada en el tanque bellas artes (Elaboración propia, 2016)	35
Figura 13. Manómetro digital para la medición de presiones (KELLER AG, 2016).....	37
Figura 14. Medidor de caudal y procedimiento para la instalación del equipo (Generalidades Tecnológicas Ltd, 2016).....	38
Figura 15. Logo comercial de los programas WaterGEMS y EPANET para la modelación hidráulica (WaterGEMS.ir, 2015)	43
Figura 16. Proceso de esqueletización de redes de agua potable (Elaboración propia, 2017)	47
Figura 17. Obras realizadas para mejorar la capacidad hidráulica y regulación de las redes en la ciudad de Manizales (Aguas de Manizales, 2016)	48
Figura 18. Fases del algoritmo genético: inicialización, evaluación, repetición, selección, cruce, mutación, evaluación, reemplazo y solución definitiva (X*). (Berzal, 2016).....	50
Figura 19. Comparación entre el conjunto Pareto y la frontera Pareto (Villarreal Marroquín, 2015)	52
Figura 20. Proceso de optimización (Management Science Consulting, 2012)	54

Figura 21. Justificación económica y operativa de la implementación de la sectorización (Saldarriaga, 2016).....	55
Figura 22. Optimización del circuito hidráulico Adoratrices – Pio XII – Colinas por medio de la sectorización hidráulica (Aguas de Manizales, 2013).....	56
Figura 23. Sistema de información comercial “AMERIKA” (Aguas de Manizales, 2016) .	58
Figura 24. Uso del geófono para localización de fugas (Elaboración propia, 2017)	59
Figura 25. Sistema de información de actividades realizadas en campo “SEGOVIA” (Aguas de Manizales, 2016).....	59
Figura 26. Instalación de los manómetros digitales en la Enea (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	61
Figura 27. Instalación del medidor de caudal portátil en la Enea (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	61
Figura 28. Proceso constructivo de los diferentes puntos de medición (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	62
Figura 29. Procedimiento para la utilización de la herramienta “ <i>ModelBuilder</i> ”, (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	70
Figura 30. Procedimiento para la utilización de la herramienta “ <i>Assign Isolation Valves to pipes</i> ”, (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	71
Figura 31. Procedimiento para la utilización de la herramienta “ <i>TRex</i> ”, (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	72
Figura 32. Procedimiento para Validar el estado de operación de válvulas del sistema (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	74
Figura 33. Procedimiento para Ingresar presiones aguas abajo de válvulas reguladoras (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	74
Figura 34. Procedimiento para Ajuste de las longitudes de las tuberías (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	75
Figura 35. Procedimiento para Ingresar pérdidas menores en las tuberías (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	76
Figura 36. Procedimiento para la agrupación de tuberías por medio de “ <i>Skelebrator Skeletonizer</i> ” (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	76
Figura 37. Procedimiento para la detección de errores por medio de “ <i>Queries</i> ” (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	77
Figura 38. Procedimiento para el cambio del estado de análisis del modelo (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	78
Figura 39. Procedimiento para el ingreso de la curva o patrón de consumo (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	78
Figura 40. Procedimiento para la utilización de la herramienta “ <i>LoadBuilder</i> ” (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	79
Figura 41. Criterios de Calibración ECAC (The Engineering Computer Applications Committee, 1999).....	82
Figura 42. Criterios de calibración Bentley (BENTLEY SYSTEMS INC, 2006)	83
Figura 43. Metodología desarrollada en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA (Saldarriaga, 2008)	84

Figura 44. Resultados de la metodología desarrollada en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA (Saldarriaga, 2008).....	86
Figura 45. Administración de presión mediante válvula reductora de presión (INGENIERIA DE FLUIDOS, 2016).....	88
Figura 46. Mapa de Colombia con división política (Enciclopedia Colombiana, 2010; Duque, 2014)	92
Figura 47. División territorial de Manizales, (Ortega Riaño, 2014).....	94
Figura 48. Localización redes de acueducto, enfoque del estudio (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2016).....	95
Figura 49. Mapa de circuitos hidráulicos (Aguas de Manizales, 2015)	97
Figura 50. Ubicación espacial de daños en la zona de estudio por circuito hidráulico (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2016)	101
Figura 51. Ubicación espacial de hidrantes en la zona de estudio por circuito hidráulico (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2016)	102
Figura 52. Catastro de Redes acueducto de Manizales (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	104
Figura 53. Imagen de plano de catastro de usuarios y límites espaciales (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	106
Figura 54. Plano con información de redes rehabilitadas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	107
Figura 55. Localización punto para medición de caudal en la zona de estudio por cada circuito hidráulico (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	108
Figura 56. Tomas de presión con errores de medición en periodos de lectura de 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	113
Figura 57. Tomas de presión validadas en periodos de lectura de 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	114
Figura 58. Curvas de caudal de la zona de estudio por sector hidráulico durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	116
Figura 59. Patrones de consumo de la zona de estudio por sector hidráulico durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	116
Figura 60. Curvas de presión circuito T1 El Cable salida de 8 durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	117
Figura 61. Curvas de presión circuito T23B derivación de 14 HF durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	118
Figura 62. Curvas de presión circuito T23 salida de 12 Alta Suiza durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	119
Figura 63. Curvas de presión circuito T23 salida de 8 durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	119
Figura 64. Curvas de presión circuito Enea III durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	120
Figura 65. Curvas de presión circuito T34 Enea II durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	120
Figura 66. Curvas de presión circuito T33 Enea I durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	121

Figura 67. Representación gráfica del modelo hidráulico T1 el cable salida de 8 en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	123
Figura 68. Representación gráfica del modelo hidráulico T23B derivación de 14 HF en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	124
Figura 69. Representación gráfica del modelo hidráulico T23 salida de 12 Alta Suiza en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	125
Figura 70. Representación gráfica del modelo hidráulico T23 salida de 8 en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	126
Figura 71. Representación gráfica del modelo hidráulico tanque Enea III en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	127
Figura 72. Representación gráfica del modelo hidráulico T33 Enea I en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	128
Figura 73. Representación gráfica del modelo hidráulico T34 Enea II en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	129
Figura 74. Análisis de sensibilidad del parámetro demandas desconocidas con respecto a la gráfica de caudal y presión en el circuito T23B derivación 14HF en el sector de Milán (Elaboración propia, 2017)	130
Figura 75. Análisis de sensibilidad del parámetro Emisores con respecto a la gráfica de caudal y presión en el circuito T23B derivación 14HF en el sector de Milán (Elaboración propia, 2017)	131
Figura 76. Análisis de sensibilidad del parámetro diámetros con respecto a la gráfica de caudal y presión en el circuito T23B derivación 14HF en el sector de Milán (Elaboración propia, 2017)	132
Figura 77. Análisis de sensibilidad del parámetro rugosidades con respecto a la gráfica de caudal y presión en el circuito T23B derivación 14HF en el sector de Milán (Elaboración propia, 2017)	133
Figura 78. Análisis de sensibilidad del parámetro pérdidas menores con respecto a la gráfica de caudal y presión en el circuito T23B derivación 14HF en el sector de Milán (Elaboración propia, 2017)	134
Figura 79. Gradiente hidráulico para reservorio elaborado de acuerdo con la curva de presión (Elaboración propia, 2017)	135
Figura 80. Gradiente hidráulico para válvula reguladora de presión (Elaboración propia, 2017)	136
Figura 81. Comparación de escenarios creados para la determinación del “modelo unificado” en la curva de caudal (Elaboración propia, 2017)	141
Figura 82. Comparación de escenarios creados para la determinación del “modelo unificado” en la curva de presión (Elaboración propia, 2017)	141
Figura 83. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la masa de la zona de estudio (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017) ...	146
Figura 84. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía - T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	146
Figura 85. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía - T23 salida de 8 (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017) ...	147

Figura 86. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía – T1 El cable salida de 8 (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	147
Figura 87. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía - T23B derivación 14HF (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	148
Figura 88. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía – Enea III (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	149
Figura 89. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía – T34 Enea II (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	149
Figura 90. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía – T33 Enea I (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	150
Figura 91. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T1 el cable salida de 8 (Elaboración propia, 2017)	151
Figura 92. Presiones en el circuito hidráulico modelado T1 el cable salida de 8 (Elaboración propia, 2017)	152
Figura 93. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T1 el cable salida de 8 (Elaboración propia, 2017)	153
Figura 94. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T1 el cable salida de 8 (Elaboración propia, 2017)	153
Figura 95. Demandas en el circuito hidráulico modelado T1 el cable salida de 8 (Elaboración propia, 2017)	154
Figura 96. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)	155
Figura 97. Presiones en el circuito hidráulico modelado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)	155
Figura 98. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)	156
Figura 99. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)	157
Figura 100. Demandas en el circuito hidráulico modelado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)	157
Figura 101. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)	158
Figura 102. Presiones en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)	159
Figura 103. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)	160
Figura 104. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)	160
Figura 105. Demandas en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)	161
Figura 106. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 8 (Elaboración propia, 2017)	162

Figura 107. Presiones en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 8 (Elaboración propia, 2017)	162
Figura 108. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 8 (Elaboración propia, 2017)	163
Figura 109. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 8 (Elaboración propia, 2017)	164
Figura 110. Demandas en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 8 (Elaboración propia, 2017)	164
Figura 111. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)	165
Figura 112. Presiones en el circuito hidráulico modelado tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)	166
Figura 113. Diámetros en el circuito hidráulico modelado tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)	167
Figura 114. Velocidades en el circuito hidráulico modelado tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)	167
Figura 115. Demandas en el circuito hidráulico modelado tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)	168
Figura 116. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)	169
Figura 117. Presiones en el circuito hidráulico modelado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)	169
Figura 118. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)	170
Figura 119. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)	171
Figura 120. Demandas en el circuito hidráulico modelado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)	171
Figura 121. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)	172
Figura 122. Presiones en el circuito hidráulico modelado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)	173
Figura 123. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)	173
Figura 124. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)	174
Figura 125. Demandas en el circuito hidráulico modelado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)	174
Figura 126. Determinación de las ubicaciones de las VRP para el sector T1 El Cable salida de 8" por medio de límites naturales (Elaboración propia, 2017)	177
Figura 127. Ubicación óptima VRP en la calle 70 con carrera 28B, sector de Palermo para el circuito T1 El Cable salida de 8" (Elaboración propia, 2017)	178
Figura 128. Determinación de las redes para la instalación de VRP en el barrio Sancancio por medio de la topología del sector (Elaboración propia, 2017)	178

Figura 129. Ubicación óptima de VRP en el barrio Sancancio (Elaboración propia, 2017)	180
Figura 130. Ubicación optima VRP en la carrera 24 entre calles 65A y 66, sector de Guayacanes para el circuito T1 El Cable salida de 8" (Elaboración propia, 2017)	181
Figura 131. Presiones en el circuito optimizado T1 El Cable salida de 8" (Elaboración propia, 2017)	182
Figura 132. Velocidades en el circuito optimizado T1 El Cable salida de 8" (Elaboración propia, 2017)	182
Figura 133. Estado válvulas de cierre/apertura en el circuito optimizado T1 El Cable salida de 8" (Elaboración propia, 2017)	183
Figura 134. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito T1 El Cable salida de 8", antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017)	183
Figura 135. Determinación de las ubicaciones de las VRP para el sector T23B derivación de 14 HF por medio de limites naturales (Elaboración propia, 2017)	184
Figura 136. Ubicación de válvula 27236VC (Elaboración propia, 2017)	185
Figura 137. Ubicación de válvula 32034VC (Elaboración propia, 2017)	186
Figura 138. Ubicación óptima de VRP en el barrio Palermo (Elaboración propia, 2017)	187
Figura 139. Ubicación de válvula 27195VC (Elaboración propia, 2017)	188
Figura 140. Ubicación optima VRP en el barrio Tejares, para el circuito T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)	188
Figura 141. Ubicación de válvula 27272VC (Elaboración propia, 2017)	189
Figura 142. Ubicación de válvula 32035VC (Elaboración propia, 2017)	190
Figura 143. Ubicación de válvula 33003VC - 33004VC y 33005VC - 33034VC (Elaboración propia, 2017)	190
Figura 144. Ubicación optima VRP en la urbanización Arboletes, sector de San Marcel para el circuito T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)	191
Figura 145. Ubicación optima VRP en el barrio El Trébol para el circuito T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)	192
Figura 146. Presiones en el circuito optimizado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)	193
Figura 147. Velocidades en el circuito optimizado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)	193
Figura 148. Estado válvulas de cierre/apertura en el circuito optimizado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)	194
Figura 149. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito T23B derivación de 14 HF, antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017)	194
Figura 150. Nueva alimentación para el barrio Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)	195
Figura 151. Determinación de las redes para la instalación de VRP en el barrio Colseguros por medio de la topología del sector (Elaboración propia, 2017)	196
Figura 152. Ubicación óptima de VRP en el barrio Colseguros (Elaboración propia, 2017)	197
Figura 153. Determinación de las redes para la instalación de VRP en el barrio Alta Suiza por medio de la topología del sector (Elaboración propia, 2017)	198

Figura 154. Ubicación óptima de VRP en el barrio Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)	199
Figura 155. Conexión entre el barrio Colseguros y Alta Suiza sobre la calle 73 con carrera 18 (Elaboración propia, 2017)	200
Figura 156. Presiones en el circuito optimizado T23 salida de 8 y T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)	201
Figura 157. Velocidades en el circuito optimizado T23 salida de 8 y T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)	201
Figura 158. Estado válvulas de cierre/apertura en el circuito optimizado T23 salida de 8 y T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)	202
Figura 159. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito T23 salida de 8 y T23 salida de 12 Alta Suiza, antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017)	202
Figura 160. Determinación de las ubicaciones de las VRP para el sector Tanque Enea III por medio de límites naturales (Elaboración propia, 2017)	203
Figura 161. Localización VRP en el circuito optimizado Tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)	204
Figura 162. Estado de las presiones por medio de las VRP ubicadas en el circuito optimizado Tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)	204
Figura 163. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito Tanque Enea III, antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017)	205
Figura 164. Determinación de las ubicaciones de las VRP para el sector T33 Enea I por medio de límites naturales (Elaboración propia, 2017)	206
Figura 165. Redes de acueducto en el barrio La Enea (Elaboración propia, 2017)	207
Figura 166. Redes de acueducto en el barrio San Marcel (Elaboración propia, 2017)	207
Figura 167. Ubicación óptima VRP en la carrera 37 entre calles 95 y 94B, sector de La Enea para el circuito T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)	208
Figura 168. Ubicación de válvula 41010VC (Elaboración propia, 2017)	209
Figura 169. Ubicación de válvula 41009VC (Elaboración propia, 2017)	209
Figura 170. Ubicación de válvula 41003VC (Elaboración propia, 2017)	210
Figura 171. Ubicación de válvula 40005VC (Elaboración propia, 2017)	210
Figura 172. Ubicación de válvula 41008VC (Elaboración propia, 2017)	211
Figura 173. Ubicación de válvula 32002VC (Elaboración propia, 2017)	211
Figura 174. Ubicación de válvula 31007VC (Elaboración propia, 2017)	212
Figura 175. Ubicación óptima VRP en el caserío el alto de la virgen, sector de La Florida para el circuito T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)	212
Figura 176. Ubicación de válvula 31006VC y 31010VC (Elaboración propia, 2017)	213
Figura 177. Presiones en el circuito optimizado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)	214
Figura 178. Velocidades en el circuito optimizado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)	214
Figura 179. Estado válvulas de cierre/apertura en el circuito optimizado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)	215
Figura 180. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito T33 Enea I, antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017)	215

Figura 181. Determinación de las ubicaciones de las VRP para el sector T34 Enea II por medio de límites naturales (Elaboración propia, 2017)	216
Figura 182. Ubicación óptima VRP en la carrera 37 entre calles 101 y 101B, sector de La Enea para el circuito T34 Enea II (Elaboración propia, 2017).....	217
Figura 183. Ubicación óptima VRP en la alimentación para el aeropuerto La Nubia, sector de La Enea para el circuito T34 Enea II (Elaboración propia, 2017).....	218
Figura 184. Ubicación óptima VRP en la carrera 37 entre calles 95B y 95D, sector de La Enea para el circuito T34 Enea II (Elaboración propia, 2017).....	218
Figura 185. Presiones en el circuito optimizado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)	219
Figura 186. Velocidades en el circuito optimizado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)	220
Figura 187. Estado válvulas de cierre/apertura en el circuito optimizado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)	220
Figura 188. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito T34 Enea II, antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017).....	221

Lista de Tablas

Tabla 1. Cuadro Comparativo Ventajas, Desventajas, Fortalezas y Limitaciones para la Metodología de WaterGEMS (Solano López, 2012).....	65
Tabla 2. Información requerida de cada elemento hidráulico para la modelación hidráulica (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	71
Tabla 3. Conversión de unidades utilizada en las tuberías de PE (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	73
Tabla 4. Coeficientes de rugosidad definidos para cada material (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017).....	73
Tabla 5. Cantidad de daños por material en la zona de estudio por circuito hidráulico (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2016)	103
Tabla 6. Cantidad de metros de redes por material en la zona de estudio por circuito hidráulico (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2016)	103
Tabla 7. Consumos promedio de un periodo de seis meses por sector hidráulico en volumen (Elaboración propia, 2017).....	105
Tabla 8. Resultados del programa de búsqueda de fugas imperceptibles (Aguas de Manizales, 2017).....	107

Tabla 9. Cantidad de hidrantes en buen y mal estado por sector hidráulico (Aguas de Manizales, 2017)	109
Tabla 10. Resultados obtenidos en la medición en campo del caudal y presiones por sector hidráulico determinando los máximos, mínimos y el medio por elemento (Elaboración propia, 2017)	110
Tabla 11. Consolidado de los IANC de los sectores zona de estudio, (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)	122
Tabla 12. Caudal de facturación y el medido en campo para determinar las pérdidas de cada modelo (Elaboración propia, 2017)	136
Tabla 13. Procedimiento para la determinación de la línea base 2 (Elaboración propia, 2017).....	138
Tabla 14. Resultados obtenidos después de realizar el análisis de masas (Elaboración propia, 2017)	138
Tabla 15. Procedimiento para la determinación del “modelo unificado” (Elaboración propia, 2017)	139
Tabla 16. Metodología para la creación de los escenarios de la línea base 2 (Elaboración propia, 2017)	140
Tabla 17. Resultados obtenidos del cálculo del error medio cuadrático para cada sector hidráulico (Elaboración propia, 2017)	142
Tabla 18. Comparación y reducciones del error medio cuadrático entre el “modelo unificado” y el modelo calibrado (Elaboración propia, 2017).....	145
Tabla 19. Parámetros utilizados para la optimización en unidades internacionales e inglesas	176
Tabla 20. Análisis de la Potencia Unitaria de las redes para la instalación de VRP en el barrio Sancancio (Elaboración propia, 2017).....	179
Tabla 21. Análisis de la Potencia Unitaria de las redes para la instalación de VRP en el barrio Palermo (Elaboración propia, 2017)	186
Tabla 22. Análisis de la Potencia Unitaria de las redes para la instalación de VRP en el barrio Colseguros (Elaboración propia, 2017)	197
Tabla 23. Análisis de la Potencia Unitaria de las redes para la instalación de VRP en el barrio Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)	198

Introducción

En el mundo se tiene escasa conciencia sobre el cuidado del agua, así como de sus beneficios, aun sabiendo que desde la declaración sobre el agua y el desarrollo sostenible en la conferencia internacional de Dublín sobre Agua y Medio Ambiente (CIAMA), realizada en el año 1992 entre los días 26 y 30 del mes de enero en la cual se definieron los siguientes principios (Ciama, 1992):

Principio No. 1: El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente.

Principio No. 2: El aprovechamiento y la gestión del agua deben inspirarse en un planteamiento basado en la participación de los usuarios, los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles.

Principio No. 3: La mujer desempeña un papel fundamental en el abastecimiento, la gestión y la protección del agua.

Principio No. 4: El agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico.

Teniendo en cuenta los pilares para el uso adecuado del agua y su papel preponderante en la preservación de la vida, y conociendo que en el mundo la cantidad de agua para consumo humano es menor del 3% y que sólo el 0.30% del total del agua en la tierra es superficial como se presenta en la Figura 1 (Boggiano, 2013), la planificación y gestión es imperativa.

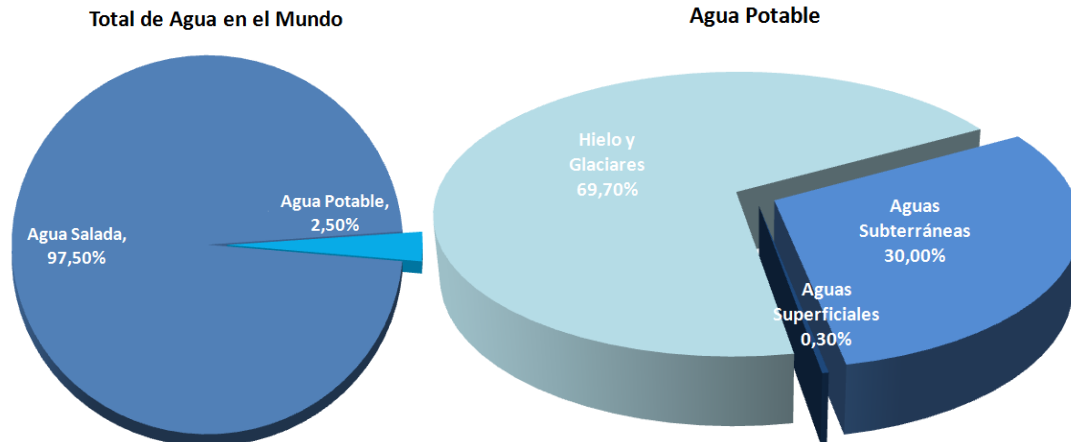


Figura 1. Distribución agua existente en el mundo (Boggiano, 2013)

En los procesos de planificación y gestión del agua, la captación para consumo humano resulta trascendental. El agua en las ciudades es captada en las fuentes a través de los sistemas de distribución, los que permiten llevar a la comunidad el agua de manera adecuada. En Colombia, dichos sistemas son definidos según el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) como un “Conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde el tanque de almacenamiento o planta de tratamiento hasta los puntos de consumo” (MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO, 2010). De manera, que el manejo o gestión de los recursos hídricos en las ciudades depende en gran medida de las empresas prestadores del servicio de distribución de agua –EPS-. Para las EPS uno de los aspectos importantes a tener en consideración es la captación y distribución eficiente, y el uso mínimo posible del recurso hídrico. Por tal razón, evitar las pérdidas o fugas de agua en el sistema resulta de gran importancia.

Dichas pérdidas o fugas pueden ser muy altas o bajas, de acuerdo con la cantidad de elementos que tienen las redes de distribución. Para el análisis, éstas son clasificadas como pérdidas técnicas definidas como aquellas derivadas de los problemas en los elementos de los sistemas de distribución y como pérdidas comerciales definidas como las generadas por errores de medición. Según la empresa de acueducto de Bogotá (2002) las principales causas de las pérdidas son la antigüedad de la tubería, defectos en la construcción de las redes, estanqueidad en los tanques, fallas en la medición del agua suministrada de las plantas de tratamiento, submedición en la micromedición, limitaciones

en la operación, altas presiones, fugas visibles e imperceptibles y usuarios directos o clandestinos.

Al respecto, Suramérica ha sido catalogada como poco eficiente por el Banco Mundial, ya que según estimaciones realizadas por dicha entidad aproximadamente el 45% del agua se pierde antes de llegar al cliente (Banco Mundial, 2013). Esto se atribuye entre otras razones a las carencias de recursos de las empresas que gestionan el recurso del agua en la optimización de redes. En búsqueda de la optimización de los recursos técnicos y económicos se deben analizar nuevas alternativas que ayuden a controlar las pérdidas de una forma que se determinen zonas puntuales para optimizar y repercutan en el comportamiento general del sistema.

En Colombia, según la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA, 2013) el valor aceptable de las pérdidas es del 30% y es reconocido por el sistema tarifario, pero en la realidad las empresas que prestan el servicio del acueducto presentan pérdidas más altas causando un deterioro económico en las mismas y un detrimento ambiental de grandes proporciones.

De acuerdo con lo expresado por Simpson, Dandy y Murphy (1994) el problema de optimización de los sistemas de distribución de agua presenta las singularidades de que los recursos cada vez son más limitados, las reparaciones en la red resultan muy costosas y que anteriormente el funcionamiento estaba basado solamente en la experiencia. Sin embargo, el problema es cada vez más complejo ya que con el paso del tiempo las redes serán más antiguas y por consiguiente obsoletas, ya que aún hay tuberías de materiales obsoletos como el asbesto cemento para las grandes conducciones y plomo para domiciliarias que no solo afectan por su fragilidad y fácil proliferación de daños, sino que pueden llegar a convertirse en problemas de salud pública.

Por lo anterior, el problema del control a fugas se ha venido estudiando desde diferentes enfoques, uno de ellos es la modelación hidráulica. La modelación hidráulica es un proceso que busca reproducir las características de un sistema de distribución real por medio de la creación de un modelo matemático computacional, en el cual sea posible comparar el comportamiento real del sistema con la información hidráulica generada a través del modelo. Las modelaciones hidráulicas tienen una alta incidencia para lograr un mejor

conocimiento del funcionamiento del sistema, lo que permite reducir las pérdidas técnicas determinando cuáles sectores requerirían un cambio de redes con mayor urgencia y adicionalmente genera un conocimiento del comportamiento del sistema con demandas futuras para así determinar las obras necesarias que permitan prestar un servicio eficiente.

Por tanto, en este trabajo se propone el uso de la modelación para el análisis de la incidencia de los cambios fuertes de pendiente en el comportamiento hidráulico de las redes de acueducto de la ciudad de Manizales. Se generará una herramienta que permita gestionar la operación de las redes de acueducto con las condiciones anteriormente indicadas, con el fin de tener un mayor control en la ocurrencia de daños por altas presiones, reducción del agua no contabilizada por presencia de fugas y agilizar las disponibilidades de servicios para nuevos proyectos. El estudio se encuentra enmarcado en el proyecto de Sectorización de las redes de distribución de agua potable de la ciudad de Manizales. Puesto que el proyecto es de gran envergadura lo que implica un largo plazo para su ejecución, se acotó el área de estudio a las comunas Tesorito, Palogrande, Ecoturístico Cerro de oro en el municipio de Manizales y la Florida en el municipio de Villamaría.

1. Descripción del problema

Las redes de distribución de agua potable en Manizales funcionan por gravedad, en consideración con su relieve y en tener una alta presencia de montaña, la ciudad se encuentra ubicada a una altura media de 2150 msnm y en rango de variaciones de la altura entre 1900 msnm y 2400 msnm, lo cual genera altas pendientes que pueden variar desde valores inferiores al uno por ciento y superiores al cien por ciento dentro del territorio y fuertes cambios de las mismas por los sistemas montañosos.

El acueducto de Manizales es operado por la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P., cuenta con 109.921 suscriptores (Aguas de Manizales, 2016). con una densidad poblacional de 4 habitantes por suscriptor, dada la población el sistema para cumplir de forma eficiente la demanda generada, está constituido de 3 plantas de tratamiento, 53 circuitos hidráulicos, 68 tanques de almacenamiento de los cuales 17 se encuentran fuera de servicio, 959 hidrantes de los cuales 108 se encuentran en mal estado, 1059 kilómetros de redes de distribución de agua, y 433 kilómetros de redes domiciliarias, Aguas de Manizales ha encontrado que los principales problemas que se presentan son las altas presiones que adquieren las redes en su trayecto y son causales de una gran cantidad de afectaciones en el servicio.

Este sistema presenta agravantes debido a que en la ciudad existen “sifones”, es decir zonas bajas de alta presión que en tramos cortos de red vuelven a subir y generar pérdidas de presión, como se muestra en la Figura 2, que representa un ejemplo del cambio de pendientes entre los barrios Milán y el Bosque Popular.



Figura 2. Cambio de pendientes en las redes de distribución (Elaboración propia, 2016)

Según la topografía del terreno, se presenta que el agua es suministrada desde las partes altas llegando a un punto de máxima presión y así empieza nuevamente a subir reduciendo la presión. En las partes de máxima presión se encuentran asentamientos poblacionales en los que las altas presiones en la red causan fallas constantes que deben ser controladas. A su vez, desde estos puntos de máxima presión las redes empiezan a subir comenzando a perder presión y aumentando las pérdidas por trayectos de tubería. De manera, que se deben controlar las presiones en los puntos de máxima presión evitando que la presión de servicio no se afecte en las partes altas de la ciudad, para evitar daños en las redes y causando una alta pérdida de agua y económica para la comunidad.

Por tanto, en la operación de las redes de acueducto se presenta la oportunidad de optimizar el funcionamiento, considerando que en la actualidad en el territorio colombiano aún existen muchas deficiencias en la prestación del servicio. En el caso particular de la ciudad de Manizales esto ha sido una de las causas de los continuos daños que presentan las tuberías, contando 10129 daños reportados sobre las redes de distribución y redes domiciliarias desde el 2002 hasta la actualidad (Aguas de Manizales, 2016).

Estas afectaciones sobre las redes han sido causadas por los siguientes factores:

- Antigüedad de las redes del sistema de distribución, puesto que todavía en operación existen tuberías en asbesto cemento e hierro galvanizado para las cuales ya no se fabrican accesorios, que permitan su adecuado mantenimiento y funcionamiento. Adicionalmente, estas tuberías después de los años reducen su capacidad hidráulica y generan unas mayores pérdidas en el sistema (Aguas de Manizales, 2016).

- Altas presiones en las redes: considerando que la topografía de la ciudad de Manizales es montañosa, el flujo adquiere mucha energía en trayectos relativamente cortos en el sistema de distribución de agua, lo que a su vez se convierte en sobrepresiones que generan fácilmente afectaciones sobre las tuberías. En la Figura 3 se observa un ejemplo de este tipo de afectaciones.



Figura 3. Daño de tubería de acueducto (LA PATRIA, 2014)

- Problemas geotécnicos: considerando que en el municipio de Manizales ha sufrido aproximadamente seis sismos, por la existencia de fallas geológicas o fuentes sismogénicas como son las cordilleras de los andes y la confluencia de las placas continentales Nazca, Caribe y Sur América. Estos fenómenos sísmicos pueden llegar a generar el desplazamiento de la superficie terrestre y algunos de estos movimientos ocasionar las fisuras de las redes del sistema de distribución de agua.

Un factor importante que incide en las deficiencias de la prestación del servicio es el deficiente catastro de redes, es decir la cartografía que se tiene de las redes instaladas ubicadas espacialmente sobre los planos del municipio. Dentro del catastro se debe encontrar la información de las válvulas, hidrantes, tanques, plantas de tratamiento, accesorios, medidores, daños, entre otros elementos necesarios para contener la mayor información disponible del sistema. Según lo expresado por el Acueducto de Bogotá (2002) los objetivos de los catastros de redes son:

- Conocer la ubicación de cada uno de los elementos que conforman el sistema de acueducto.
- Aportar información para evaluar el funcionamiento de las redes y demás componentes que integran los sistemas de acueducto y alcantarillado existente de la ciudad.
- Conocer las necesidades de orden técnico del sistema de acueducto y alcantarillado.
- Validar operacionalmente la información existente de redes.

A su vez, la actualización de los catastros se debe realizar cada vez que se agregue un elemento nuevo y se requiere el conocimiento de la ubicación de las redes por el personal operativo de la empresa prestadora del servicio para tener una información veraz de la actualización de los mismos. En los catastros de redes de Manizales se encuentra información importante relacionada con los elementos del sistema de distribución de agua (Aguas de Manizales, 2016), dentro de los cuales se presentan deficiencias en la información de límites geográficos de cada sector hidráulico que conllevan a generar asignación inadecuada de nuevas conexiones, por lo anterior, la empresa Aguas de Manizales se encuentra en un proceso de actualización de los catastros de las redes para obtener un mayor grado de certeza de esta base de datos.

Estos problemas generados llevan a lo siguiente:

- Disminución en la continuidad del servicio
- Mayor uso de agua
- Pérdidas económicas
- Altos costos de operación

Los efectos descritos anteriormente pueden llevar a generar una percepción en la comunidad de un servicio con falencias de la empresa prestadora del servicio, como se puede constatar con los últimos resultados de la encuesta de percepción ciudadana que se muestran en la Figura 4. Proporción de ciudadanos satisfechos con los servicios públicos (Encuesta de Percepción Ciudadana. Manizales Como Vamos, 2015). En la prestación del servicio de acueducto se observa que para el año 2015 la percepción de los

ciudadanos satisfechos es un poco inferior a su año antecesor. Esto permite determinar que el acueducto de Manizales tiene una imagen favorable alta, pero, las interrupciones en el servicio pueden generar que la comunidad se sienta inconforme en algunas ocasiones puesto que, en esta ciudad los ciudadanos están acostumbrados a un servicio de alta calidad y continuo.

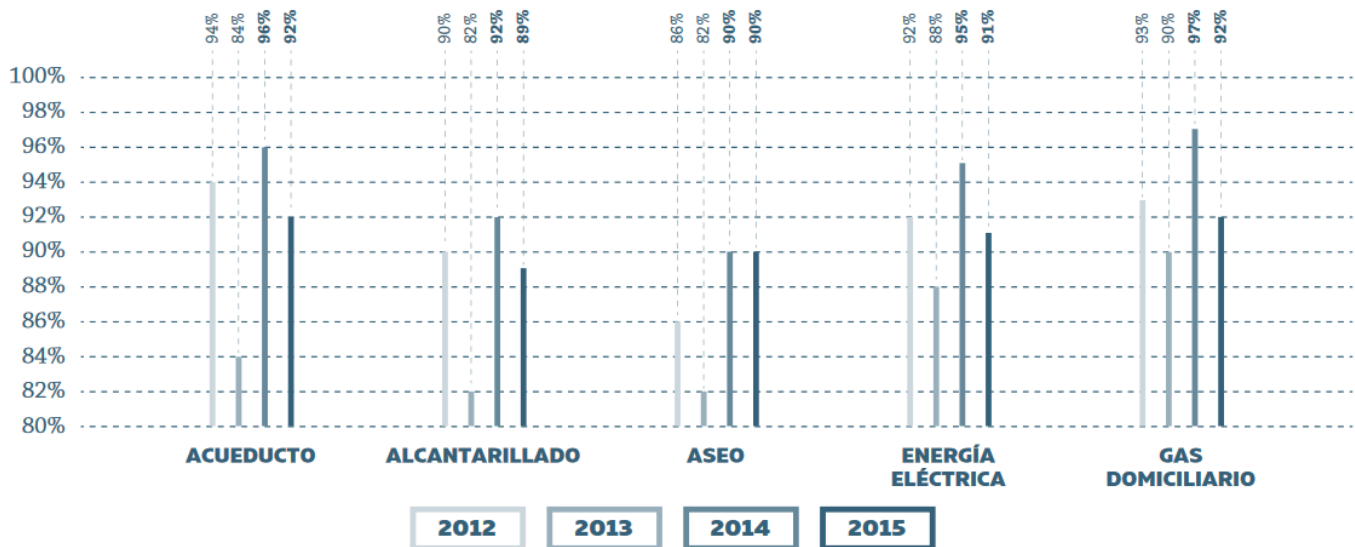


Figura 4. Proporción de ciudadanos satisfechos con los servicios públicos (Encuesta de Percepción Ciudadana. Manizales Como Vamos, 2015)

Los problemas de este trabajo se resumen en la Figura 5 elaborada por la metodología de marco lógico, permitiendo la construcción del árbol de problemas.

Árbol de Problemas

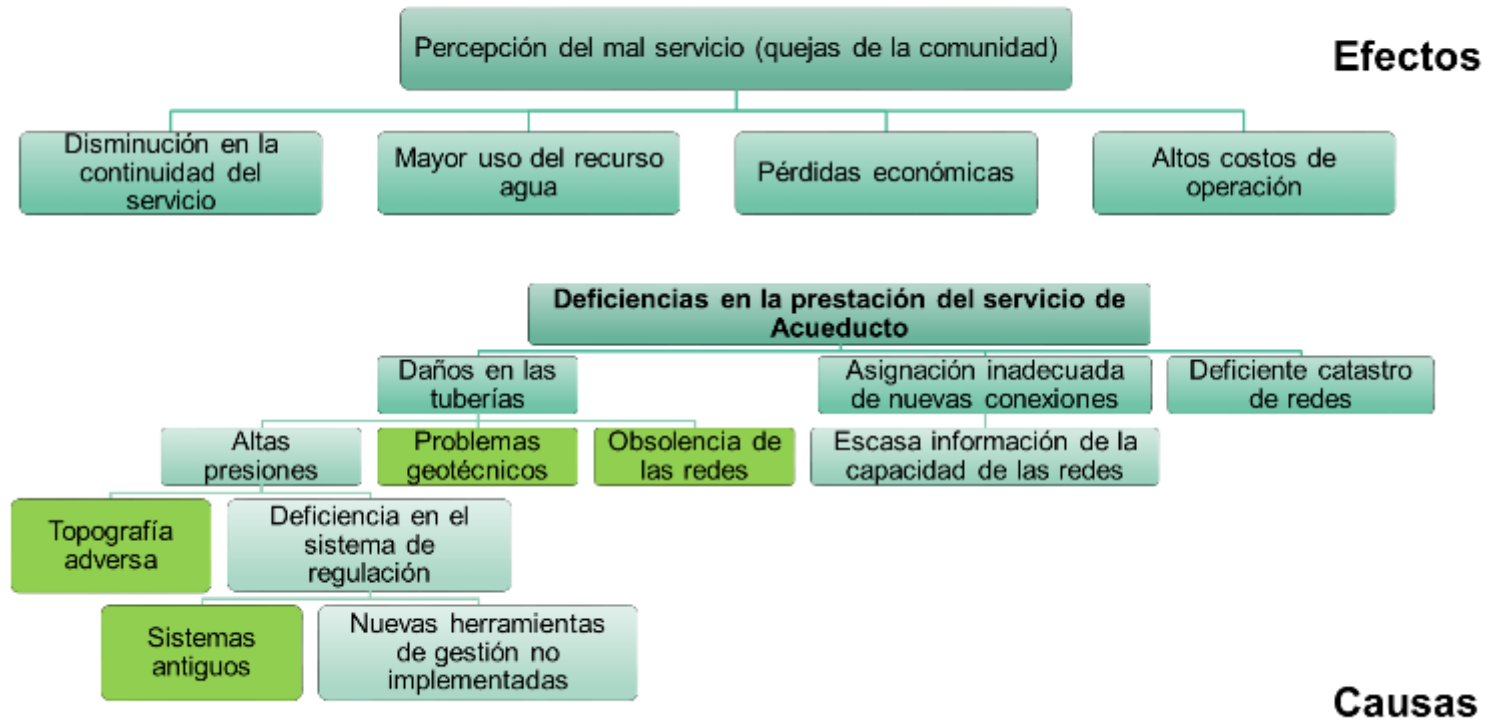


Figura 5. Árbol de problemas (Elaboración propia, 2016)

2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo se construyeron con la metodología de marco lógico, por medio de la cual se construyó el árbol de objetivos que se muestra en la Figura 6 y que se resume en el objetivo general y específicos que se presentan a continuación.

2.1 Objetivo general

Modelar y optimizar hidráulicamente las redes de acueducto que permita gestionar la operación del sistema con condiciones de cambios bruscos de pendientes en el área de estudio seleccionada.

2.2 Objetivos específicos

- Mejorar el catastro de redes y usuarios de la zona de estudio.
- Modelar hidráulicamente las posibles zonas de estudio, calibrando y validando el modelo.
- Optimizar hidráulicamente la red analizada con el fin de mejorar los planos de presiones.
- Analizar los resultados obtenidos en las metodologías de optimización que apunte al funcionamiento óptimo del sistema de distribución de agua.

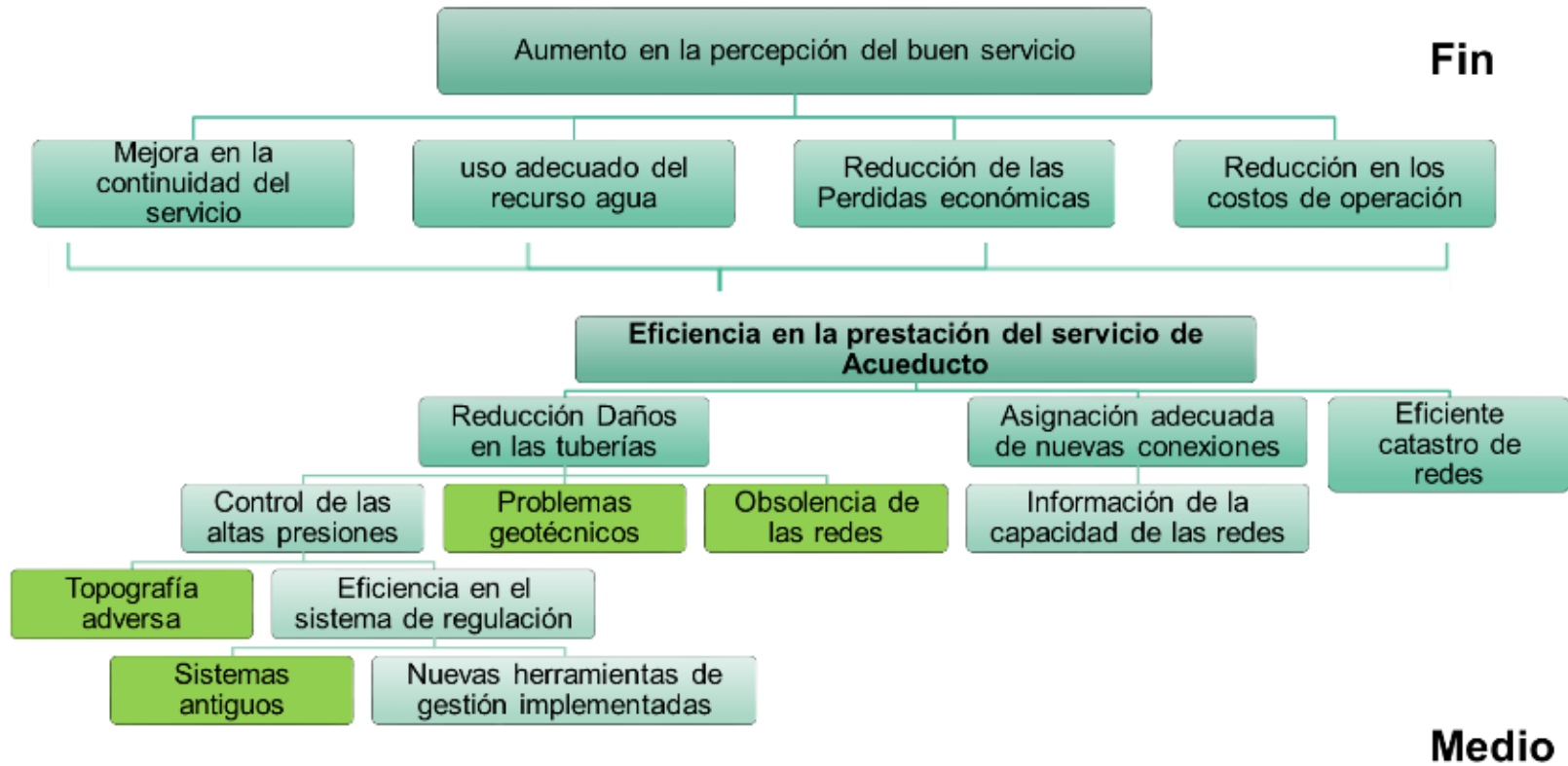


Figura 6. Árbol de objetivos (Elaboración propia, 2016)

3. Marco teórico

La gestión de los sistemas de acueducto se basa en identificar las principales falencias en la operación de las redes y en buscar reducir los costos de operación, por medio del control y seguimiento de las diferentes pérdidas comerciales o técnicas que se presentan y que conforman el índice de agua no contabilizada de las empresas que operan el servicio de acueducto.

3.1 Pérdidas comerciales

Las pérdidas comerciales se refieren al volumen de agua que se deja de medir por los errores existentes en los medidores de cada usuario generados por la sensibilidad del equipo para medir bajas demandas y el deterioro por su tiempo de vida útil, también se consideran pérdidas comerciales los volúmenes de agua no facturados por existencia de conexiones directas, fraudes de usuarios legales con redes paralelas y presencia de usuarios no constituidos en el reporte de facturación de la empresa.

3.2 Pérdidas técnicas

Las pérdidas técnicas se refieren al volumen de agua que se pierde por la ocurrencia de daños en las redes o escapes en los accesorios que constituyen el sistema como pueden ser los reboses de los tanques de almacenamiento y las fugas visibles e imperceptibles dadas por el envejecimiento y posibles conexiones erradas de las redes, un factor importante para la ocurrencia de daños son las altas presiones que manejan las redes y que desgastan más rápido las tuberías y accesorios (Figura 7).



Figura 7. Pérdidas técnicas generadas por fugas en las redes (Saldarriaga, 2016)

3.3 Índice de agua no contabilizada (IANC)

Para la empresa prestadora del servicio de acueducto el índice de agua no contabilizada (IANC), es una metodología que permite conocer el volumen de agua que se pierde por medio de cuantificar la cantidad de agua suministrada y la cantidad de agua facturada porcentualmente, la diferencia entre estos dos valores equivale a las pérdidas comerciales y técnicas que se tienen en el sistema. Este indicador permite calificar la eficiencia de las empresas considerando que a menor sea el IANC mayor es la eficiencia es la operación.

La determinación del IANC se debe desagregar según sea su componente o causa que genera las pérdidas de agua (comercial o técnica), los componentes que lo conforman deben ser medidos mensualmente para tener información que genere una tendencia del comportamiento real, por lo tanto, para la valoración del IANC se debe tener la medición de las variables durante un periodo de mínimo doce meses de acuerdo con lo estipulado en la comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico (CRA).

La fórmula para el cálculo del índice de agua no contabilizada (IANC) dada por la CRA, está constituida por la diferencia entre el volumen suministrado durante doce meses y el volumen facturado durante el mismo periodo, y normalizada por medio de la división del resultado por el volumen de agua suministrada en el periodo correspondiente; la fórmula es la siguiente.

Ecuación 1. Cálculo del Índice de agua no contabilizada (IANC)

$$IANC = \frac{\text{Volumen suministrado} - \text{Volumen facturado}}{\text{Volumen suministrado}}$$

En la Figura 8 se observa de manera esquemática el proceso de distribución del agua y las pérdidas que se pueden presentar en el recorrido en las redes hasta llegar a cada usuario. Dichas pérdidas se convierten en una reducción de ingresos y desaprovechamiento de un recurso agotable.

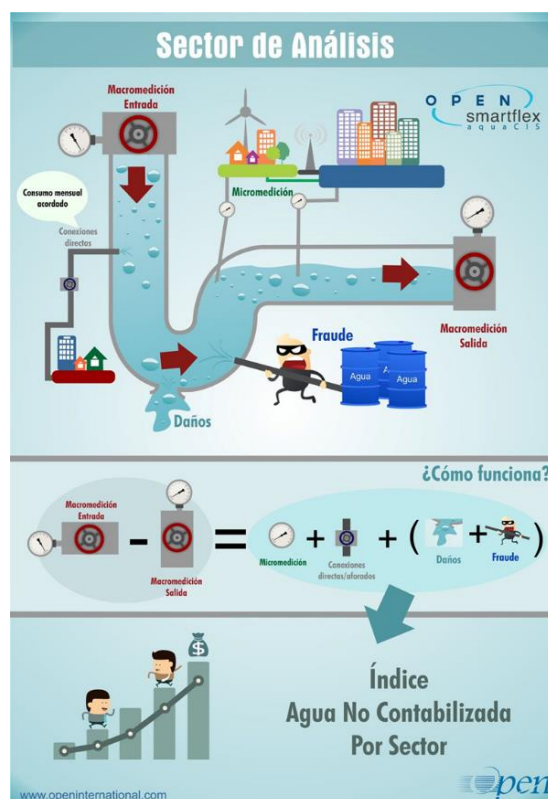


Figura 8. Análisis de fugas IANC (Open International Systems, 2014)

3.4 Programas de control de pérdidas

En la actualidad se desarrollan planes para lograr una reducción del IANC en búsqueda de reducir los costos de operación, ampliaciones de las redes a bajo costo, mejorar los ingresos por facturación legalizando usuarios fraudulentos y aumentando los consumos medidos por micro medición, mejorar el uso del recurso agua y disponibilidad para

proyectos de expansión, realizados por medio de orientar la inversión de los recursos de la empresa de servicios públicos a minimizar las pérdidas y el suministro de agua.

Los planes para el control de pérdidas pueden variar de acuerdo con las necesidades que existan en el sector, por tal motivo, los principales proyectos para controlar las pérdidas se basan en actualizar constantemente la información de las redes y el sistema comercial, la reducción de daños y mejorar los tiempos de respuesta para las reparaciones. Adicionalmente, es importante conocer el agua suministrada a zonas con usos irregulares por medio de la instalación de medidores como se muestra en la Figura 9 y conocer la cantidad de agua suministrada en cada sector independientemente por medio de macro medidores (Figura 10) para los sectores hidráulicos presentes y así, direccionar los controles sobre las zonas con mayores pérdidas y conexiones fraudulentas.



Figura 9. Instalación de medidor para zonas de usos irregulares en el sector del Águila en el barrio El Nevado de la ciudad de Manizales (Elaboración propia, 2016)



Figura 10. Instalación de medidores para sectores hidráulicos en el barrio La Montana de la ciudad de Manizales (Elaboración propia ,2016)

En la actualidad, el esfuerzo por el control del agua perdida es mayor considerando los requerimientos establecidos por los entes gubernamentales en el uso eficiente del agua,

por tal motivo, se generan metodologías que agrupan los elementos que componen los sistemas de distribución como son estaciones para la regulación de presión y la modelación hidráulica realizada por medio de algoritmos matemáticos que permiten analizar el comportamiento real del acueducto.

3.5 Estaciones reguladoras de presión

Radica en establecer el control de presiones por medio de la instalación de válvulas reguladoras sobre una red principal y una adicional en paralelo, en la red principal se instala una válvula de igual tamaño al conducto y en el red adicional se instala una válvula de menor tamaño definida según las condiciones de operación del sector hidráulico y según las demandas generadas en la zona. Posteriormente, por medio del análisis del comportamiento del distrito se determina la presión aguas abajo de las reductoras, necesaria para mantener un buen servicio, lo que además, permite la facilidad de realizar el mantenimiento de los elementos instalados por la posibilidad de tener dos puntos de abastecimiento. Las estaciones reguladoras permiten, además de controlar presiones, el reemplazo de tanques, por su posibilidad de quebrar presiones hasta rangos muy bajos. Para la disposición de estos cambios entre un tanque por una estación se requieren válvulas que tengan un respaldo en caso de falla de la reductora, por lo anterior, se utilizan válvulas con dos pilotos controlados.

La válvula reductora de presión con dos pilotos controlados de acuerdo con (CLA-VAL, 2017) funciona de la siguiente forma: *“un piloto reduce a una presión alta y el otro a una presión baja, el cambio de tiempo previamente programado selecciona el piloto activo que comanda a la válvula principal. La válvula mantiene su presión de salida a pesar de las fluctuaciones de presión a la entrada y los cambios de demanda aguas abajo. El cambio entre ambos pilotos se realiza mediante un solenoide contenido en el cambio de tiempo, para que de acuerdo con horario preestablecido se tenga la presión requerida de acuerdo con demanda de flujo. Las dos presiones de ajuste pueden ser fácilmente cambiadas en campo”* (Figura 11).

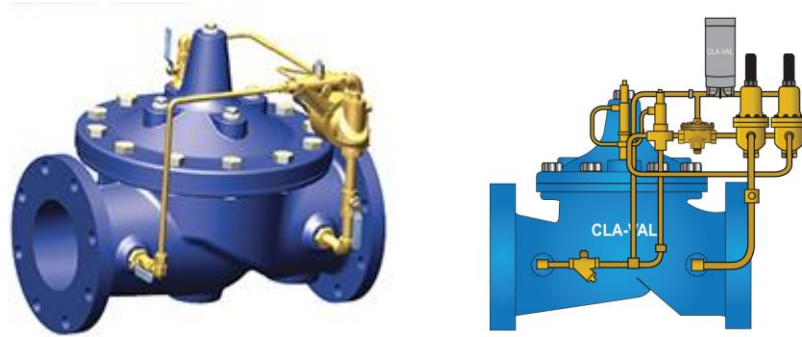


Figura 11. Válvula reductora de presión con dos pilotos reductores controlados (CLA-VAL, 2017)

En la Figura 12 se presenta una estación reguladora con válvula reductora con piloto de respaldo, utilizada para dejar fuera de servicio el tanque Bellas Artes ubicado en el barrio Chipre. Considerando las altas presiones que llegan al sector y las presión mínima que debe salir se recurrió a una válvula que tenga la posibilidad de respaldar el quiebre de presiones y así, evitar la ocurrencia de daños en las partes bajas del circuito.



Figura 12. Estación reguladora ubicada en el tanque bellas artes (Elaboración propia, 2016)

3.6 Equipos de medición de caudal y presión

Los equipos utilizados para realizar las mediciones son elementos que cumplen con los estándares para ejecutar estas funciones, los equipos para la toma de presión son los manómetros digitales de marca “Keller” y referencia “Leo Record (Ei)”, y para las mediciones de caudal es un medidor ultrasónico de marca “Fuji Electric” y referencia “Portaflow-C”, las especificaciones son las siguientes:

3.6.1 Manómetros digitales

Según las especificaciones del proveedor de los manómetros digitales LEO Record (Ei) (Figura 13), estos permiten de manera autónoma almacenar los datos de presión y temperatura durante lapsos muy largos de tiempo y ofrecen los siguientes aditamentos (KELLER AG, 2016):

- El rango de precisión es de $\pm 0,1$ % y con protección IP65.
- Muy alta precisión en la medida.
- Alta seguridad en los datos registrados gracias al uso de memorias no volátiles
- Indicación de la presión actual y del estado del registro.
- Registro de la presión y la temperatura.
- Configuración sencilla y bien estructurada (software logger 4.x) con PC o PDA
- Combinación del registro del control de eventos y del intervalo que nos permite registrar solo los datos necesarios (por ej. sólo registrar los cambios de presión, etc.)
- La presión y la temperatura son registrados una vez por segundo (mínimo intervalo posible). La pantalla superior nos indica la presión actual y el inferior el estado del registro. Todos los LEO Record tienen dos botones. El botón izquierdo se emplea para encender el manómetro, para seleccionar las diferentes funciones y para cambiar de unidades (bar, mbar, hPa, kPa, MPa, PSI, kp/cm², (m) H₂O). El botón derecho se utiliza para ejecutar la función o unidad seleccionada.
- La configuración del registro se realiza vía interfaz/software.



Figura 13. Manómetro digital para la medición de presiones (KELLER AG, 2016)

3.6.2 Medidor ultrasónico

De acuerdo con las especificaciones del proveedor de los medidores ultrasónicos Portaflow-C (Figura 14) permiten de manera autónoma y no invasiva almacenar los datos de caudal y totalizar el volumen de agua suministrada durante largos periodos de tiempo, y ofrecen los siguientes complementos (Generalidades Tecnológicas Ltd, 2016).

El rango de diámetros de tuberías para la instalación es desde 0,5 a 236 pulgadas con un rango de precisión es de $\pm 1\%$. Una tarjeta de memoria SD permite almacenar los datos totales de flujo y velocidad. Un puerto universal USB permite la comunicación entre el equipo y un PC facilita la configuración del Portaflow-C, y la lectura de los archivos de datos.

“Los medidores de flujo ultrasónicos de tiempo de tránsito están bien adaptados para fluidos relativamente limpios con baja a moderada aireación. Estos indicadores funcionan comparando el tiempo de una señal ultrasónica que viajar con el flujo (corriente abajo) contra el tiempo de otra señal ultrasónica que viaja contra el flujo (corriente arriba). La diferencia entre estos tiempos de tránsito es proporcional a la corriente, y el medidor de flujo convierte esta información en un flujo total. Con esta tecnología, los transductores se instalan en el exterior de la tubería evitando la contaminación de la línea, la caída de presión, y fugas, proporcionando una gran ventaja sobre los instrumentos de medición de flujo más tradicionales e invasivos como los medidores de flujo electromagnéticos, medidores de vórtice, y medidores de flujo de turbina. Este FUJI ELECTRIC PORTAFLOW-C es prácticamente libre de mantenimiento” (Generalidades Tecnológicas Ltd, 2016).

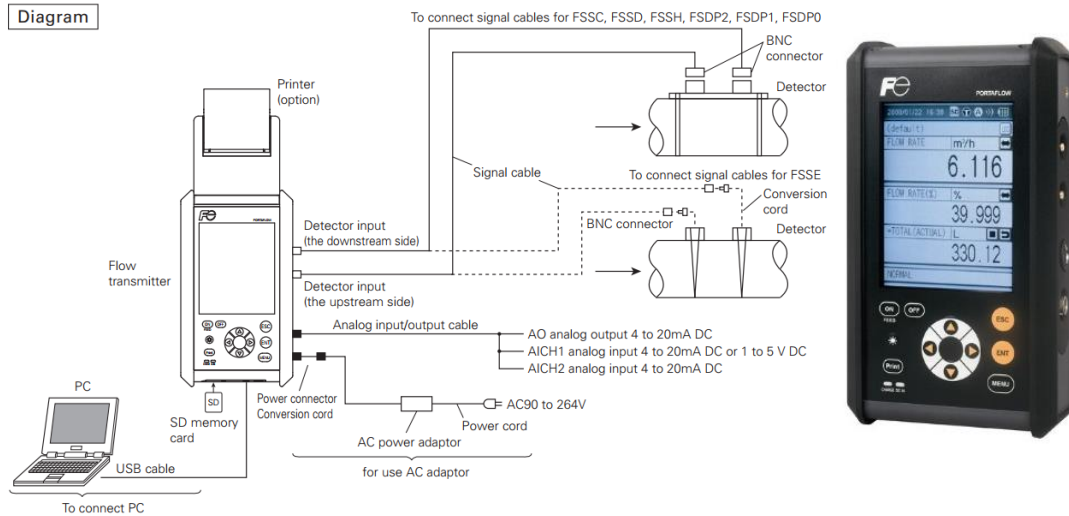


Figura 14. Medidor de caudal y procedimiento para la instalación del equipo (Generalidades Tecnológicas Ltd, 2016)

3.7 Modelación hidráulica

Un modelo hidráulico es una representación gráfica de un sistema de distribución de agua, que requiere ser validado con mediciones en campo. La modelación de las redes de distribución de agua potable es una parte importante en el diseño y gestión de las redes de acueducto, para lo que se requiere el conocimiento de las variables relevantes que afectan el comportamiento y las cuales dependen de su composición topológica e hidráulica.

Las variables necesarias para la construcción de un modelo de forma adecuada son las físicas que constituyen todo lo relacionado con las redes de distribución y sus elementos como son válvulas, uniones, accesorios, tanques, hidrantes, etc., y las variables hidráulicas que determinan la demanda generada en el sector y el comportamiento de las mismas a lo largo del tiempo, la agrupación de esta información logrará un mejor acercamiento a lo existente en campo.

En el proceso de modelación es necesario solucionar las ecuaciones hidráulicas para la determinación de las pérdidas por fricción y capacidad hidráulica del sistema. Las ecuaciones utilizadas son la de Darcy-Weisbach (Ecuación 2 en combinación con la ecuación de Colebrook-White (Ecuación 3) para la determinación del factor de fricción, y

Hazen & William (Ecuación 4) y la de Darcy-Weisbach (Ecuación 2) en combinación con la ecuación de Colebrook-White (Ecuación 3) para la determinación del factor de fricción.

Ecuación 2. Cálculos de pérdidas por fricción por Darcy-Weisbach

$$h_f = f x \frac{L}{D} x \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 3. Cálculo de factor de fricción por Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{K_s}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

D = Diámetro interno real de la tubería (m)

f = Coeficiente de fricción de Darcy (adimensional).

h_f = Pérdida de altura debida a la fricción (m).

K_s = Rugosidad absoluta de la tubería (m).

L = Longitud total de la tubería (m).

Re = Número de Reynolds (adimensional).

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

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

(MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO, 2010)

Ecuación 4. Cálculos de pérdidas por fricción por Hazen-William

$$h_L = L * \left(\frac{Q}{0,85 * A * C * R^{0,63}} \right)^{1,852}$$

h_L = Pérdida debida a la fricción (m).

L = Longitud (m).

Q = Caudal (m³/s).

A = Área (m²).

R = Radio hidráulico (m).

C = Coeficiente de Hazen-William (adimensional).

(MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO, 2010)

En el proceso de cálculo del funcionamiento de las redes es importante la determinación y cuantificación de las pérdidas menores, las cuales son consecuencia de los accesorios existentes en el sistema constituidos por codos, reducciones o cualquier elemento que genere un cambio en la dirección del flujo o variación en la sección de la red. Para el cálculo de estas pérdidas se utiliza la Ecuación 5.

Ecuación 5. Cálculo de pérdidas menores

$$h_m = K_m x \frac{v^2}{2g}$$

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).

h_m = Altura de pérdidas menores (m).

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

K_m = Coeficiente de pérdida menor (adimensional).

(MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO, 2010)

Para realizar el análisis de redes cerradas, se denominan conducciones como las redes encargadas de transportar el agua desde las plantas de tratamiento hasta los tanques de abastecimiento, las redes primarias como las tuberías que salen del tanque y se conectan a las redes secundarias o redes de distribución que son las encargadas de suministrar el agua al consumidor o usuario.

Según lo expuesto por (Saldarriaga, 2007), un sistema de distribución en red cerrada, es aquel que tiene la posibilidad de transportar el agua a un sitio por dos o más puntos, garantizando la confiabilidad del servicio y evitando fallas en la continuidad del mismo. Algunos de los métodos para el diseño y modelación de redes cerradas más reconocidos a lo largo de la historia de la hidráulica son el método de Hardy-Cross con corrección de caudales en los circuitos, método de Hardy-Cross con corrección de alturas piezométricas en los nodos, método de Newton-Rhapson, método de la teoría lineal y método del gradiente hidráulico.

En el análisis de redes cerradas se debe cumplir el principio de conservación de la masa que indica que el caudal que entra a la red es igual al caudal que es demandado por los

usuarios (nodos) expresado en la Ecuación 6, adicionalmente la conservación de la masa se debe presentar en cada nodo de acuerdo con la Ecuación 7. El otro principio es la conservación de la energía, indica que pérdida de altura piezométrica entre dos puntos de la red, incluyendo las pérdidas por fricción y las pérdidas menores puede ser expresada como en la Ecuación 8.

Ecuación 6. Conservación de la masa o continuidad en el circuito

$$\sum_{i=1}^m Q_e = \sum_{i=1}^{Nu} Q_D$$

Ecuación 7. Conservación de la masa en los nodos

$$\sum_{j=1}^{NT_i} Q_{ij} - Q_{Di} = 0$$

Donde, NT_i es el número de tubos que llegan al nodo i , Q_{ij} representa el caudal que pasa por la tubería ij hacia el nodo i desde el nodo j y Q_{Di} es el caudal demandado en el nodo i . La conservación de la masa puede ser positiva o negativa dependiendo si va desde i hacia j o viceversa (Saldarriaga, 2007).

Ecuación 8. Conservación de la energía entre dos nodos de la red

$$H_j - H_i = \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right)$$

Donde, H_i y H_j son las alturas piezométricas de los nodos i y j , g es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s), Q_{ij} representa el caudal que pasa por la tubería ij hacia el nodo i desde el nodo j , A_{ij} es el área del conducto que comunica el nodo i y j , k_{mij} es el coeficiente de pérdidas menores, l_{ij} es la longitud de la tubería, f_{ij} es el factor de fricción y d_{ij} es el diámetro de la tubería.

La metodología del gradiente hidráulico será la utilizada para desarrollar los análisis hidráulicos de las redes, considerando su precisión en los resultados debido a la robustez matemática, razón por la cual actualmente es la usada en los diferentes programas comerciales para la modelación de las redes de distribución de agua potable.

Durante el desarrollo del análisis de las redes cerradas se tendrá que resolver un conjunto de ecuaciones generadas a partir de la conservación de masa y energía en la red. Para este fin se cuenta con software hidráulico especializado tal como EPANET, WaterGems, WaterCAD y REDES, los cuales implementan el método del Gradiente Hidráulico, el cual será descrito a continuación.

Por medio de la Ecuación 9 y Ecuación 10, se puede realizar el cálculo matricial de las ecuaciones de la conservación de la energía y masa del método del gradiente, donde se garantiza la determinación de infinito número de nodos e iteraciones posibles que se tengan y la reducción del tiempo de cálculo.

Ecuación 9. Conservación de la energía por el método del gradiente hidráulico

$$[H_{i+1}] = \{[A21]([N][A11])^{-1}[A12]\}^{-1} \\ * \{[A21]([N][A11])^{-1}([A11][Q_i] + [A10][H_0]) - ([A21][Q_i] - [q])\}$$

Ecuación 10. Conservación de la masa por el método del gradiente hidráulico

$$[Q_{i+1}] = \{[I] - ([N^{-1}][A11]) - [A11]\} * [Q_i] - \{([N][A11])^{-1} * ([A12][H_{i+1}] - [A10][H_0])\}$$

Donde, NT es el número de tuberías de la red, NN es el número de nodos con altura piezométrica desconocida, NS es el número de nodos con altura piezométrica fija o conocida, [A12] es la matriz de conectividad asociada a cada uno de los nodos de la red, [Q] es el vector de caudales con dimensiones NTx1, [Ho] es el vector de alturas piezométricas desconocidas con dimensiones fijas con dimensiones NSx1, [A21] es la matriz transpuesta de [A12], [q] es el vector de consumo o demanda en cada nodo de la red, [N] es la matriz diagonal con dimensiones NTxNT, [A11] es la matriz con dimensiones NTxNT (Saldarriaga, Hidráulica de tuberías - Abastecimiento de agua, redes, riego, 2007).

Para lograr un acercamiento adecuado de un modelo a lo presente en el campo o al funcionamiento real de las redes, es necesario realizar un proceso de calibración por medio del análisis de la conservación de la masa dada por las demandas desconocidas y las fugas existentes en las redes y la conservación de la energía dada por las rugosidades, pérdidas menores y diámetros de las tuberías, por consiguiente, la masa y la energía

dependen de los caudales y presiones medidas en campo, en los cuales utilizando periodos de mínimo 24 horas de estudio se puede construir un comportamiento del cambio a lo largo del tiempo de la demanda y las presiones constituyendo unas series de tiempo del comportamiento de presiones y patrones de consumo.

Posteriormente, se debe comparar la información obtenida en campo con los resultados del modelo hidráulico en búsqueda de obtener un ajuste en cada punto de las curvas de presión y caudal durante el periodo de análisis, para lograr una representación acertada del comportamiento real del sistema de distribución de agua potable.

Los principales programas para la modelación hidráulica son los programas comerciales WaterGEMS, WaterCAD y HAMMER de la empresa Bentley Systems, Incorporated y el programa de dominio público y libre descarga EPANET desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Figura 15). Todos estos programas permiten un análisis en periodo estático determinando el comportamiento de las redes en un instante de tiempo, y un análisis en periodo extendido determinando el comportamiento de las redes a lo largo del tiempo y así evaluar la variación de las presiones y velocidades de acuerdo con el consumo demandado por los usuarios.



Figura 15. Logo comercial de los programas WaterGEMS y EPANET para la modelación hidráulica (WaterGEMS.ir, 2015)

De acuerdo con Haestad, y otros (2002), las aplicaciones de los modelos de distribución de agua son las siguientes:

- **Plan maestro de largo alcance, incluyendo el desarrollo y la optimización de las redes:** permite cuidar los recursos de los sistemas de distribución determinando los proyectos más necesarios para mejorar la calidad del servicio, y también permiten evaluar la afectación por crecimiento de usuarios en el tiempo de forma anticipada.
- **Rehabilitación:** Los sistemas de distribución necesitan la rehabilitación de algunos elementos como las tuberías viejas, sistemas de bombeo, válvulas, tanques, entre otros; Estas construcciones antiguas pueden resultar en pérdidas de capacidad de transporte, reducción de las presiones y pobre calidad del agua.
- **Estudios de protección contra incendios:** Los sistemas de distribución de agua abastecen a los bomberos o el grupo encargado de controlar incendios, puesto que los sistemas de distribución deben ser capaces de soportar el consumo requerido para la protección de incendios manteniendo una adecuada presión y determinando los tamaños de las redes, tuberías, etc., para el correcto funcionamiento.
- **Investigaciones en la calidad del agua:** Usando un modelo de distribución de agua se puede determinar el tiempo que lleva el agua circulando en las redes, exploración de la fuente y el análisis de concentración del Cloro residual. Estos modelos son usados para estudiar la modificación de la operación para mejorar la calidad del agua.
- **Administración de la energía:** Las simulaciones hidráulicas pueden ser usadas para estudiar las características de operación y la energía gastada en sistemas de bombeo a lo largo del tiempo, buscando estrategias para reducir el tiempo de uso y así ahorrar costos de energía.
- **Diseño de sistemas:** Optimización de los sistemas de distribución.
- **Operación diaria incluyendo la capacitación de los operadores, respuesta en emergencias y solución de problemas:** Los sistemas de distribución de agua son responsables de mantener controlados los niveles aceptables de presión, caudal y tanques, por medio de una simulación hidráulica se puede mejorar la operación determinando el impacto de posibles acciones a tomar y así seleccionando la opción más adecuada.

3.7.1 Antecedentes de la modelación hidráulica

La modelación computacional de sistemas de distribución de agua ha sido utilizada desde el siglo pasado en la búsqueda de la forma eficiente de representar el comportamiento de los mismos. En el mundo se han realizado diversos proyectos para gestionar o planificar las redes del acueducto como los siguientes:

- California (Estados Unidos) “Sabet, M., Coe, J., Ramirez, H., and Ford, D. (1985). "Optimal Operation of California Aqueduct." J. Water Resour. Plann. Manage”
- Atenas (Grecia) “Minimizing water cost in water resource management of Athens; Journal Urban Water Journal; Volume 1, 2004 - Issue 1”.
- Baja California (México) “Virtues of simple hydro-economic optimization: Baja California, México; Journal of Environmental Management; Volume 90, Issue 11, August 2009, Pages 3470–3478”.
- Agri-Sinni (Sur Italia) “Arena, Fortunato, & Mazzola. (2009). Simulation versus optimization in the assessment of the resource opportunity cost in complex water resources systems – the case of Agri-Sinni in southern Italy. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia”.
- Vilanculos (Mozambique) “Muraca, A., & Magalini, E. (2015). The case study of Vilanculos (Mozambique) water network: criticalities and solutions. Advances in Environmental and Geological Science and Engineering”.

En el territorio colombiano el Centro de Investigaciones en Acueductos y alcantarillados (CIACUA) de la universidad de los andes de Bogotá D.C. en el 2006, realizó los siguientes proyectos:

- Diseño e Implementación del Plan Estratégico de Manejo de las Redes de Distribución de Agua Potable de los Municipios de Andalucía, Ansermanuevo, Bolívar, Bugalagrande, Candelaria, Ginebra, Guacarí, La Cumbre y Toro.
- Metodología para la definición de planos óptimos de presiones y reducción de agua no contabilizada en el Sector Estadio perteneciente a la ciudad de Bucaramanga.

A su vez en un contexto local existen las tesis de grado realizadas por estudiantes de ingeniería civil de la Universidad de nacional sede Manizales, las cuales son:

- Aristizábal Valencia, J. A. (2000). Simulación hidráulica de los circuitos: Tanque las colinas, tanque Belén, Enea parte alta, Ondas del Otún, fundadores y salida tanque 1 del acueducto de la Ciudad de Manizales. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Arcila Bonilla, L. Y. (2000). Simulación hidráulica de las conducciones principales del acueducto de la ciudad de Manizales. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Sierra Largo, J. A. (2001). Simulación hidráulica de unos circuitos de acueducto de la ciudad de Manizales. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Giraldo Díaz, M. A. (2004). Diagnóstico de agua no contabilizada y simulación hidráulica del acueducto urbano del municipio de Neira Caldas. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Castro Castrillón, N. (2004). Diagnóstico de agua no contabilizada y simulación hidráulica del acueducto urbano del municipio de San José, el corregimiento de Arauca (Palestina) y la vereda Km 41 (Manizales)- Caldas. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

En esta reseña histórica y biográfica de los diversos proyectos que se han realizado en diferentes escenarios como son en el ámbito educativo, social y económico, en búsqueda de lograr una optimización eficiente de las redes para lograr un manejo adecuado de los sistemas de distribución de agua y la posibilidad de mejorar los ingresos.

3.7.2 Esqueletización

En el proceso de modelación hidráulica el paso de esqueletización es uno de los más importantes, ya que puede generar errores en la modelación siendo elaborado de manera inapropiada, por esta razón se describe con detalle. La esqueletización se realiza para generar una reducción en el número de tuberías y la cantidad de nodos controlando que el modelo pueda representar de manera adecuada el comportamiento real de las redes de distribución de agua potable. Por lo anterior, para realizar un proceso de esqueletización se debe validar que las redes a unir tengan las mismas características como diámetros y material, a su vez, se debe revisar que el balance de masas sea igual al que se tenía antes de realizar este proceso.

En la Figura 16 se presenta la metodología utilizada por el proceso de esqueletización para reducir la cantidad de elementos que conforman el modelo hidráulico y así, reducir el tiempo del procesamiento matemático y eliminar elementos sin valor agregado.

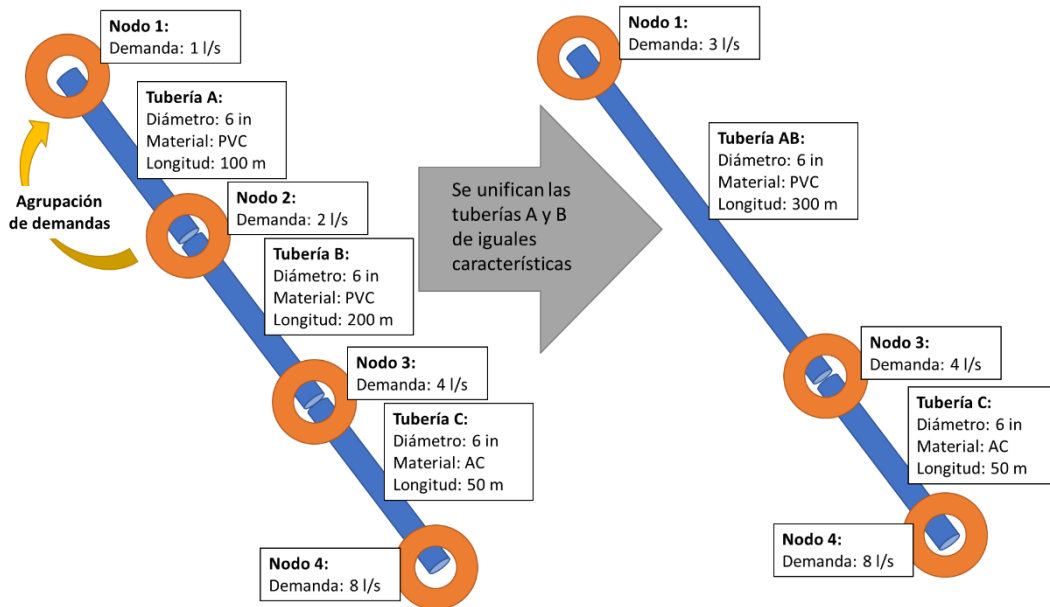


Figura 16. Proceso de esqueletización de redes de agua potable (Elaboración propia, 2017)

3.7.3 Análisis de sensibilidad de variables

La modelación hidráulica está constituida por los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad, este proceso permite determinar los cambios que soporta el sistema de distribución de agua potable a lo largo de tiempo, dado por el deterioro de las redes que generan pérdida de sección hidráulica de las tuberías, reducción de la fluidez del agua dentro del conducto, mayores pérdidas menores, posibles fugas y conexiones fraudulentas definidos por las variables calibrables (demandas desconocidas, emisores, diámetros, rugosidades y pérdidas menores), mediante el análisis es posible conocer las variables con mayor incidencia en el comportamiento de las redes, teniendo en cuenta que cada sistema es independiente y tiene sus propias características.

3.8 Optimización hidráulica

El proceso de optimización es buscar el funcionamiento más eficiente, cumpliendo con parámetros establecidos como son los rangos mínimos y máximos de presión, sin olvidar la satisfacción de los usuarios por medio del control de las presiones en horas de baja y alta demanda según condiciones óptimas para la zona de estudio y las costumbres de la comunidad.

Las principales obras que se plantean son la renovación y ampliación de las redes, control de presiones por medio de válvulas reguladoras o estaciones de regulación (Figura 17), nuevas conexiones entre sectores dados los límites topográficos, automatización de taques y el cambio de la alimentación de la zona por futuras expansiones del sector o deficiencias en las redes para nuevas demandas, posterior a la definición de las obras. Estas se ingresan a la modelación hidráulica del sector para comparar y validar el cumplimiento de los parámetros que permitan garantizar presiones homogéneas y adecuadas. En búsqueda de reducir la existencia de válvulas de cierre y apertura, garantizar un sector con estanqueidad y una única entrada de abastecimiento, estos procedimientos descritos constituyen un proceso llamado sectorización hidráulica.



Figura 17. Obras realizadas para mejorar la capacidad hidráulica y regulación de las redes en la ciudad de Manizales (Aguas de Manizales, 2016)

3.8.1 Formulación del diseño optimizado de las redes

En la actualidad se presentan diversas formas para el diseño optimizado de redes, en búsqueda de cumplir los requerimientos existentes, de acuerdo con la satisfacción de las demandas, restricciones con las presiones mínimas y máximas establecidas, capacidad hidráulica del sistema y la minimización de los costos de operación. Los métodos usados para la optimización son técnicas de programación lineal, programación dinámica, programación de integración mixta, algoritmos heurísticos, métodos de gradientes y algoritmos genéticos (Haestad, y otros, 2002).

Se pueden generar planes de rehabilitación que logren mejorar el funcionamiento del sistema según las necesidades que se tengan, los que pueden ser por medio del cambio de redes, reducción de presiones, construcción o eliminación de tanques, instalación o retiro de válvulas de cierre/apertura, entre otros. Con frecuencia se busca minimizar los costos de operación reduciendo los focos de fugas, por medio de cambios de redes y regulación de presiones, por lo que en el proceso de optimización, los conductos y nodos se consideran los factores más importantes.

3.8.2 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos, consisten en crear diversas soluciones para un problema analizado por medio de un proceso iterativo, donde la precisión de las soluciones obtenidas depende de la codificación del problema según los procesos de inicialización (determinación del espacio muestral), selección (las soluciones con mejores cualidades tienen mayor probabilidad de ser escogidos), recombinación o cruzamiento (variación de las variables por medio de la combinación de características), mutación (intercambio al azar de características para crear nuevas soluciones), reemplazo (determinar los mejores soluciones para realizar el proceso nuevamente) y evaluación (representación de la función objetivo del problema a optimizar) representados en la Figura 18.

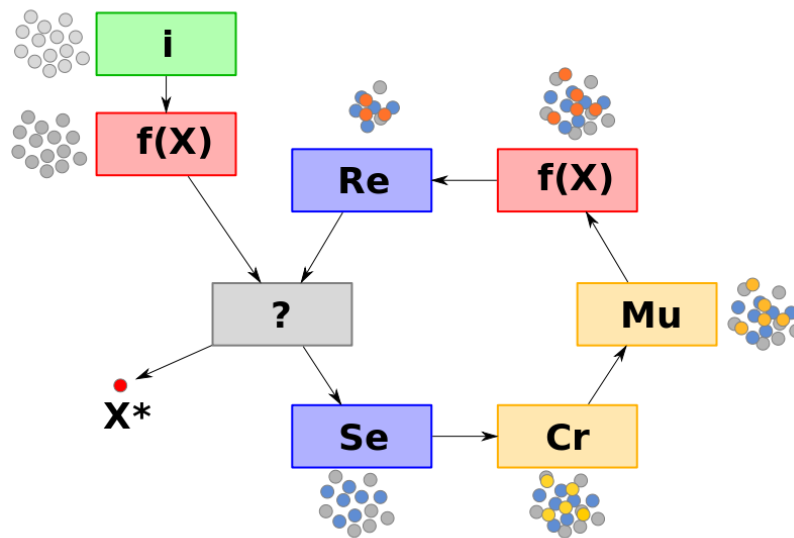


Figura 18. Fases del algoritmo genético: inicialización, evaluación, repetición, selección, cruce, mutación, reemplazo y solución definitiva (X^*). (Berzal, 2016)

El procedimiento se basa en definir una función objetivo o variables de decisión como puede ser los diámetros y materiales de las redes, de manera que el sistema de distribución de agua generado como solución debe cumplir con todas las funciones durante el análisis y términos para generar penalizaciones para las soluciones que cumplan con algunas funciones objetivo, pero, sin llegar a cumplir todos los requerimientos. Los algoritmos genéticos pueden tener varias soluciones y alternativas de forma eficiente, pero nunca cambiarán un buen análisis ingenieril realizado por un operador capacitado responsable del funcionamiento del acueducto.

En el proceso de optimización existen dos tipos de análisis: La optimización mono-objetivo, donde se determina la solución por medio de resolver la función objetivo que agrupa las variables de decisión, y la optimización multi-objetivo, donde se determina la solución por medio de resolver varias funciones objetivo donde se desagregan las variables de decisión mediante la maximización o minimización de estos parámetros.

- Funciones objetivo

Las funciones objetivos se centraran en buscar maximizar la confiabilidad del sistema de distribución de agua potable, considerando que la idea central es gestionar la operación

del sistema con condiciones de cambios bruscos de pendientes en el área de estudio seleccionada, por medio de maximizar los planos de presiones dentro de los rangos estipulados.

En búsqueda de la solución óptima será utilizado el análisis multi-objetivo, que permita definir claramente las variables necesarias para considerar que el sistema tiene un funcionamiento operativo adecuado y que logre controlar la energía excesiva en los sectores y así disminuir la ocurrencia de daños y la presencia de fugas imperceptibles.

De acuerdo con la finalidad del estudio, se presentan tres funciones objetivo, relacionadas con la optimización hidráulica de las redes de acueducto y el control de rangos de presiones.

- Optimización multi-objetivo

El diseño de las redes de agua potable se caracteriza por tener varios objetivos como son minimizar los riesgos y costos de operación, maximizar la confiabilidad del acueducto, maximizar la calidad del agua y la prestación del servicio y generar una única solución que cumpla de manera simultánea los objetivos establecidos. En la Ecuación 11 se presenta el objetivo de la optimización multi-objetivo con las variables y restricciones que la rigen.

Ecuación 11. Función objetivo de la optimización

$$\begin{aligned} \min - \max & (f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)) \\ g_j(x) & \leq 0 \quad j = 1, \dots, J \\ h_k(X) & = 0 \quad k = 1, \dots, K \\ X_i^L & \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, N \end{aligned}$$

M objetivos

N variables de decisión

J restricciones de desigualdad

K restricciones de igualdad

(Villarreal Marroquín, 2015)

La optimización multi-objetivo determina la mejor solución de acuerdo con el concepto de dominancia, este concepto se define como aquella solución que domina a la otra en un

proceso iterativo hasta encontrar las soluciones no dominadas. Existen dos tipos de soluciones: el conjunto de soluciones eficientes que se llama conjunto Pareto y se define por las soluciones que selecciona resaltan en por lo menos un objetivo determinado, y el conjunto de soluciones no dominadas que se llama frontera Pareto y se define como las soluciones ideales que cumplen a cabalidad con los objetivos propuestos representados en la Figura 19 (Villarreal Marroquín, 2015).

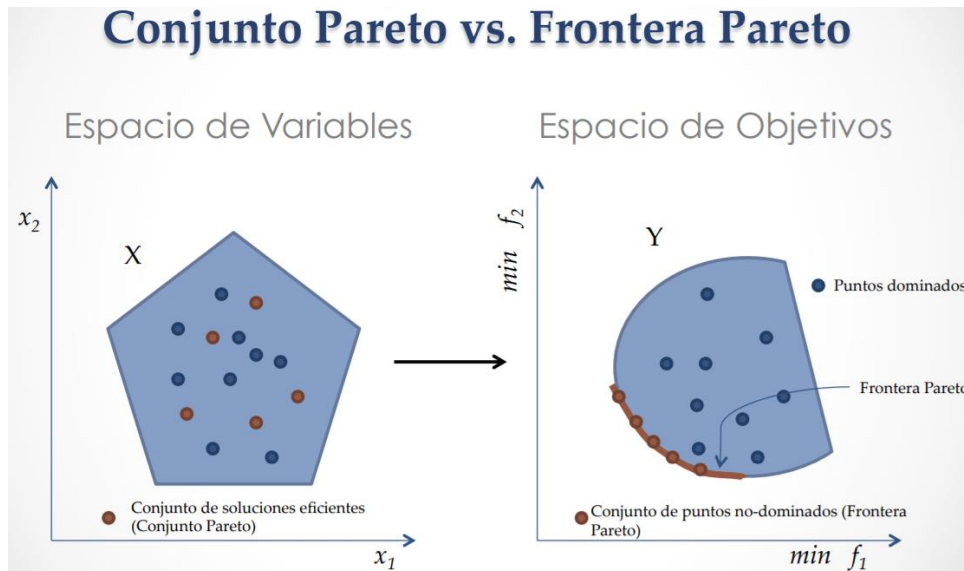


Figura 19. Comparación entre el conjunto Pareto y la frontera Pareto (Villarreal Marroquín, 2015)

Por tal motivo, para realizar un proceso eficiente en la optimización es necesario analizar la posibilidad de aplicar métodos para la reducción del espacio muestral que permitan agilizar la estructuración de la solución óptima.

3.8.3 Técnicas de reducción del espacio muestral

La reducción del espacio de las posibles soluciones favorece en disminuir el tamaño de la muestra, es decir, el tamaño del problema existente. De acuerdo con (Saldarriaga & Salcedo, 2015) mediante esta metodología es posible reducir a la mitad las potenciales soluciones, en mejora de la agilidad del proceso. Los criterios más utilizados en la optimización de redes a presión son el Pipe Index (PI), de (Vairavamoorthy & Ali, 2005) y la Potencia Unitaria (PU) (Saldarriaga, Ochoa, Moreno, Romero, & Cortés, 2010).

- Pipe Index (PI)

“Es un método que pretende clasificar las tuberías por orden de importancia según el rendimiento hidráulico de la red, los cambios en los tamaños de las tuberías con mayor rango resultarán en un mayor impacto en la distribución global de la presión en la red” (Vairavamoorthy & Ali, 2005).

En 1995, Arulraj & Rao propusieron un indicador llamado Índice de significancia (SI) de contextura similar al PI, el cual tiene la facilidad de ser calculado de manera explícita sin recurrir a un sistema de ecuaciones. Este índice (SI), se desarrolló para optimizar el proceso de la rehabilitación de redes. Con este índice encontraron que las tuberías que deben ser reemplazadas o eliminadas para tener una presión adecuada en la zona son las que tienen un índice de significancia alto. Por lo tanto, (Vairavamoorthy & Ali, 2005) determinaron que el SI puede actuar como una buena medida sustitutiva del PI. La Ecuación 12 muestra el cálculo del PI.

Ecuación 12. Cálculo del pipe index

$$PI_j = \frac{Q_j L_j}{C_j D_j}$$

La determinación del *pipe index* (PI) para una tubería j , es dado por, el coeficiente de rugosidad de la tubería de Hazen-Williams (C_j), el diámetro de la tubería (D_j), el caudal que transporta la tubería (Q_j) y la longitud (L_j).

- Potencia Unitaria (PU)

La potencia unitaria de una tubería i se define como la descarga que fluye a través de la tubería i multiplicada por la diferencia entre la cabeza piezométrica en los nudos inicial y final de la tubería. La designación de los nudos se realiza con base a la dirección del flujo (Saldarriaga, Ochoa, Moreno, Romero, & Cortés, 2010). La Ecuación 13 que se define la potencia unitaria.

Ecuación 13. Cálculo de la potencia unitaria

$$P_{UTi} = q_i (h_{i,ini}^* - h_{i,end}^*)$$

Donde, (q_i) es el caudal que fluye por la tubería (lps) y $(h_{i,ini}^* - h_{i,end}^*)$ es la pérdida de altura piezométrica en la tubería (psi), según la diferencia de presión entre el nodo inicial y final, respectivamente.

Es indispensable el control por medio de variables de decisión y restricciones que permitan evitar la ocurrencia de resultados sin lógica o con poca coherencia ante el problema planteado.

3.8.4 Variables de decisión y restricciones

La variable de decisión es el elemento desconocido que busca el proceso de optimización definir, de acuerdo con parámetros conocidos dentro del modelo. La finalidad de un problema de optimización, es buscar los valores adecuados para las variables de decisión que satisfagan todas las restricciones y optimicen una o varias funciones objetivo, especificados por las condiciones ideales de operación (IBM, 2016).

Las restricciones son relaciones entre las variables de decisión y valores lógicos del modelo que limitan la solución del problema de optimización (Figura 20).

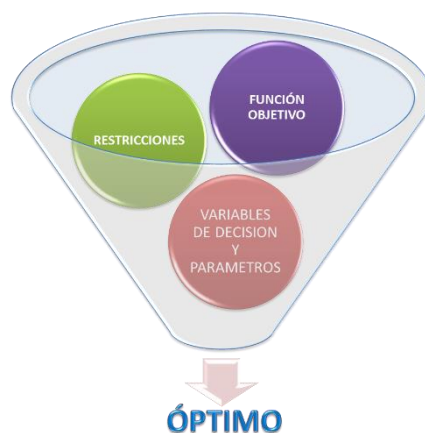


Figura 20. Proceso de optimización (Management Science Consulting, 2012)

3.9 Sectorización hidráulica

Según lo expresado por el acueducto de Bogotá (2002), la sectorización es una “*estrategia de control y reducción de pérdidas técnicas y comerciales, que consiste en la delimitación de la red de acueducto en sectores de servicio homogéneos, aislados e independientes, en los cuales es posible macromedir los volúmenes suministrados, consolidar los volúmenes facturados, optimizar las condiciones de servicio, calcular el índice de agua no contabilizada, establecer las causas de las pérdidas y sus acciones de control, formular proyectos estructurados de control de pérdidas, priorizarlos y hacer seguimiento al comportamiento y a las inversiones de reducción*”.

Un sistema de distribución de agua potable sectorizado tiene mayor facilidad para determinar el agua suministrada en comparación con el agua facturada, importante para la reducción del índice de agua no contabilizada (IANC). Por tal motivo, permite conocer la afectación operativa relacionada con cierres en el sistema, monitoreo y control de los elementos que lo componen (Figura 21).

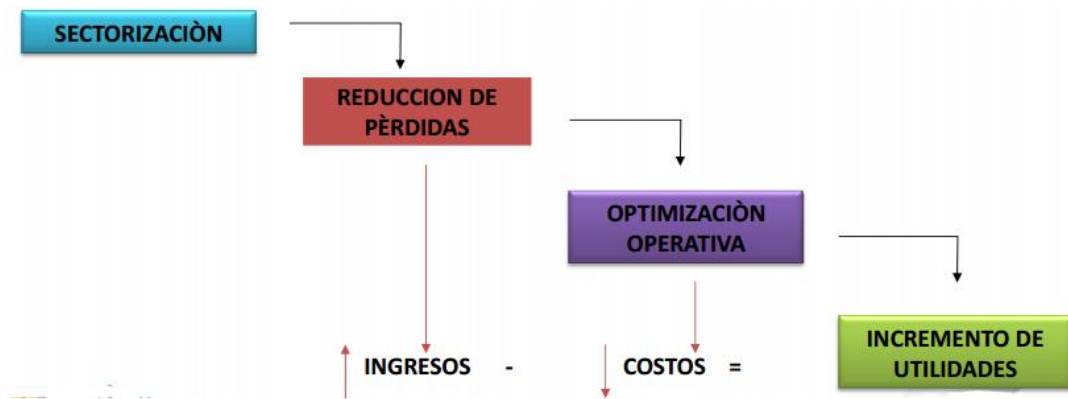


Figura 21. Justificación económica y operativa de la implementación de la sectorización (Saldarriaga, 2016)

De acuerdo, con la definición de sectorización, un sector hidráulico que cumpla con las condiciones expresadas tendrá un comportamiento ideal, permitiendo generar un control eficiente y operativo de las redes por medio de estar regulado, medido en sus componentes de macro medición, micro medición y medición de presiones y modelado hidráulicamente.

En la Figura 22 se presenta la redes que fueron optimizadas hidráulicamente en la ciudad de Manizales en el barrio Adoratrices, Pio XII y Colinas donde se obtuvieron resultados en reducción de presiones superiores al 75%, que se encontraban fuera de los parámetros establecidos por el reglamento de agua potable y saneamiento básico.



Figura 22. Optimización del circuito hidráulico Adoratrices – Pio XII – Colinas por medio de la sectorización hidráulica (Aguas de Manizales, 2013)

4. Metodología

La metodología seguida en el desarrollo del presente trabajo es la siguiente:

4.1 Recopilación de información topológica

En el proceso de la consecución de la información se requiere obtener los datos relacionados con las redes de distribución, tanques de almacenamiento, accesorios, válvulas de cierre y apertura, válvulas de control de presión y caudal, hidrantes, redes domiciliarias y suscriptores, que permitan realizar la modelación y optimización planteadas.

4.1.1 Análisis de información existente

Este proceso consiste en el análisis de la información existente que se encuentra en el aspecto técnico y comercial relacionado al sector de estudio. En el proceso de depuración de las fuentes de información se requiere considerar las entidades externas que posean planos históricos y obras realizadas dentro de la ciudad y los procesos internos de la empresa prestadora del servicio.

La información recopilada puede ser validada de acuerdo con el sistema de información geográfico donde se encuentran los diagramas de las redes e históricos de daños y mantenimientos, y demás elementos pertenecientes al sistema, así como el sistema comercial “Amerika” donde se localiza la tabulación de usuarios conectados al sistema y sus respectivos consumos, estratos y tarifas. A su vez el análisis de grandes clientes o de un consumo mayor y usuarios con conexiones directas o irregulares. En la Figura 23 se presenta el componente visual del programa “Amerika”.

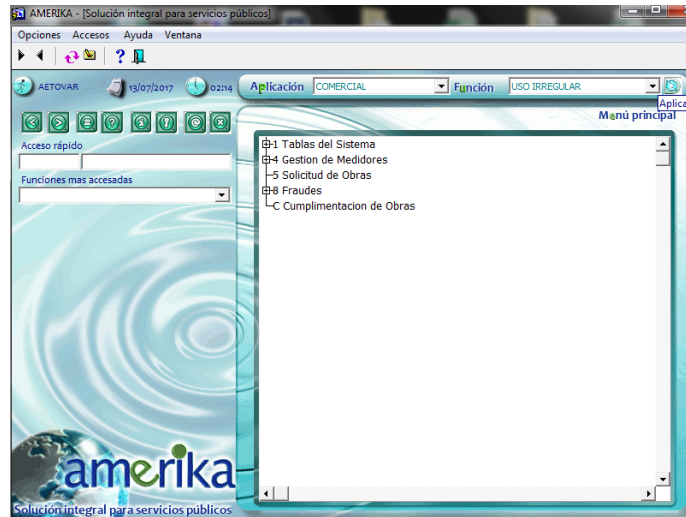


Figura 23. Sistema de información comercial “AMERIKA” (Aguas de Manizales, 2016)

4.1.2 Recopilación de información faltante

Se realizará un catastro de usuarios por circuito hidráulico mediante cierres programados para definir los límites entre circuitos, los inventarios de daños de acuerdo con el registro de órdenes de trabajo realizadas por la empresa prestadora del servicio, el inventario de reposiciones de redes considerando las obras realizadas por contratistas externos y la instalación de nuevas redes y usuarios y el estado de las válvulas de cierre y apertura según la información existente de los programas preventivos que maneja la entidad que opera el acueducto. Esta información se requiere para definir claramente el modelo.

- Programas para búsqueda de fugas

Es la detección de fugas visibles presentes en la superficie, es decir, sobre las vías, andenes y viviendas. También se pueden presentar fugas no visibles o imperceptibles detectadas por pérdidas de presión no recurrentes o por medio de un programa de detección de las mismas con el uso de geofonía (Figura 24).



Figura 24. Uso del geófono para localización de fugas (Elaboración propia, 2017)

- Análisis de los daños

Se requiere un análisis de los daños teniendo la posibilidad de identificar las zonas con mayor frecuencia de estas, los que se pueden realizar por medio de la revisión de la información concerniente con las redes principales, redes domiciliarias y accesorios, para así conocer la importancia del diámetro, material y antigüedad de los elementos en la presencia de los daños en la red. El registro de la información se encuentra dentro del programa “SEGOVIA” (Figura 25).

No OT	Servicio	Solicitud	Motivo	Finalidad	Estado	Fecha OT	Inmueble	Dirección	Zona	Cido	Contrat
2017,OT,22810	ACUEDUCTO	MEDIDORES	CAMBIAR LLAVE	(1) - Solicitado(4) - PreC	14-07-201	84648	CL 52 3G 52 LT 11	ZONA 1 UR Cido 06	AGUAS		
2017,OT,22809	ACUEDUCTO	REDES	TAPONAR ACOMETI	(1) - Solicitado(4) - PreC	14-07-201	31111	CL 50A 9D 3	ZONA 1 UR Cido 06	ACOME		
2017,OT,22808	ACUEDUCTO	REDES	TAPONAR ACOMETI	(1) - Solicitado(4) - PreC	14-07-201	31098	CR 9C 50A 78	ZONA 1 UR Cido 06	ACOME		
2017,OT,22807	ACUEDUCTO	REDES	TAPONAR ACOMETI	(1) - Solicitado(4) - PreC	14-07-201	31079	CR 9D 50A 29	ZONA 1 UR Cido 06	ACOME		
2017,OT,22806	ACUEDUCTO	REDES	TAPONAR ACOMETI	(1) - Solicitado(4) - PreC	14-07-201	30775	CL 51A 8B 23	ZONA 1 UR Cido 06	ACOME		
2017,OT,22805	ACUEDUCTO	REDES	TAPONAR ACOMETI	(1) - Solicitado(4) - PreC	14-07-201	30730	CL 51F 8B 25	ZONA 1 UR Cido 06	ACOME		
2017,OT,22804	RESIDUAL	REDES	REVISAR RED PRIM	(0) - Prestacion(0) - PorA	14-07-201		VEREDA ALTO TABLAZ	ZONA RUR	AGUAS		
2017,OT,22803	ACUEDUCTO	REDES	REPARAR FILTRACI	(0) - Prestacion(3) - EnEj	14-07-201		VEREDA BAJO TABLAZ	ZONA RUR	AGUAS		
2017,OT,22802	RESIDUAL	REDES	REPARAR TUBO RO	(0) - Prestacion(3) - EnEj	14-07-201		CR 37 65A 94	ZONA 2 UR	RH2017		
2017,OT,22801	RESIDUAL	REDES	REPARAR TUBO RO	(0) - Prestacion(0) - PorA	14-07-201	39444	CR 40 48C 22	ZONA 2 UR Cido 07	AGUAS		

Figura 25. Sistema de información de actividades realizadas en campo “SEGOVIA” (Aguas de Manizales, 2016)

4.2 Selección de puntos de medición de presión y caudal

Las mediciones en campo son primordiales para la validación de la información obtenida en el proceso de modelación hidráulica. En terreno se deben realizar mediciones que

permitan conocer las características relacionadas con los parámetros de conservación de masa dada por las mediciones de caudal, y la conservación de energía dada por mediciones de presiones.

En la selección de los puntos de medición se consideró la facilidad para la obtención de la información y la importancia de la misma, puesto que estas mediciones permiten conocer la cantidad de agua suministrada en la zona y el IANC. Genera un acercamiento a la magnitud real de la submedición y permite la determinación de fugas por los comportamientos inusuales de las presiones.

Las mediciones de presión se realizan por medio de los manómetros digitales que almacenan la información de forma continua, estos equipos son ubicados en las boquillas de los hidrantes. Para su ubicación, es necesario identificar los hidrantes que se encuentran en buen estado para ser seleccionados como puntos para tomas de muestras y así lograr crear las curvas de presión de cada sector. Las mediciones de presión se realizaron durante los meses de junio, julio y agosto de 2016 durante un lapso de 24 horas, de acuerdo con la posibilidad de comparar con varias series y validar la veracidad de los resultados.

Por otra parte, las mediciones de caudal se realizan por medio del medidor ultrasónico que registra información continua. Es necesario garantizar la estanqueidad del sector y localizar la entrada de abastecimiento, para así, tener una medición completa y poder construir la curva o patrón de consumo del sector.

Para las mediciones de caudal se requirió la construcción de cámaras donde fuera posible liberar la tubería en toda su circunferencia, dado que, es necesario para la correcta funcionalidad del medidor ultrasónico. El medidor se ubicaba en la red desde donde se abastece el circuito, para garantizar la lectura de la demanda de todos los usuarios, adicionalmente, dependiendo de la zona y su complejidad, se realizaron varias mediciones para cada sector hidráulico. Las mediciones de caudal se realizaron durante los meses de junio, julio y agosto de 2016 durante ocho días calendario, puesto que, se requiere la información dentro de los mismos periodos de medición de presión.

Los manómetros digitales se instalaron en las salidas laterales de los hidrantes, a continuación, se presenta un registro fotográfico del proceso de instalación de los manómetros digitales en la Figura 26.



Figura 26. Instalación de los manómetros digitales en la Enea (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Los medidores de caudal se instalaban por medio de ubicar dos sensores sobre la tubería, los cuales transmiten la información al equipo. A continuación, se presenta un registro fotográfico del proceso de instalación de los medidores de caudal en la Figura 27.



Figura 27. Instalación del medidor de caudal portátil en la Enea (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Según los requerimientos de adecuación de las redes para realizar la medición de caudal, se presenta el registro fotográfico del proceso constructivo de las cámaras y variación de tuberías para la correcta lectura en la Figura 28.



Figura 28. Proceso constructivo de los diferentes puntos de medición (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

4.2.1 Validación, control y seguimiento de los datos

Una vez recopilada la información de presiones y caudales, se realiza revisión de dicha información para verificar que sí correspondan a la realidad del comportamiento de la zona. En el proceso de revisión de la información obtenida en campo, cuando en las mediciones de presión se encuentran que algunos datos no coincidían con el comportamiento de la zona y se repitió el procedimiento.

En las mediciones de caudal se redujeron los posibles errores, por medio de controles como el cambio de los materiales en las redes de abastecimiento a PVC, considerado ideal para la lectura mediante ultrasonido y un periodo de lectura largo donde sea factible validar un comportamiento para la demanda de la zona.

4.2.2 Construcción de las curvas de presión y patrones de consumo

Para la construcción de curvas y patrones se analizó la información recolectada en campo y su posterior validada. En el caso de la construcción de los patrones de consumo, es necesario la elaboración de una curva entre caudal demandado y tiempo, donde sea posible conocer la demanda generada en un lapso de tiempo, y mediante la definición del caudal medio del sistema de distribución es posible tener factores que multiplican el caudal estático ingresado al modelo, para así determinar el comportamiento del consumo de acuerdo con patrones según la máxima y mínima demanda.

Las curvas de presión son enfocadas en definir los cambios en el comportamiento de la energía en el sistema de distribución a lo largo del tiempo. Estas curvas permiten conocer como la presión cambia entre horas de máxima y mínima demanda, adicional, tienen el valor agregado de tener la información necesaria para determinar la existencia de fugas en la red, pérdida de sección hidráulica y la variación de las rugosidades en los conductos.

4.2.3 Estimación del índice de agua no contabilizada (IANC) para cada zona

Por medio de la información existente del consumo facturado en la empresa prestadora del servicio y la curva de consumo creada por la información obtenida en campo es posible determinar las pérdidas que se tienen.

Para la determinación del IANC fue necesario la consecución y agrupación de la información del volumen de agua facturada o el consumo registrado en el informe comercial y el volumen de agua suministrada o el consumo registrado por los medidores portátiles en campo. Estos datos a su vez contienen información imprescindible como son las posibles fugas en las redes, los usuarios directos, fraudes en el sistema y los errores en los medidores de cada predio que permiten enfocar las labores de control de pérdidas en sectores zonificados por un valor alto o consumos dispersos.

4.3 Modelo computacional, calibración y validación hidráulica

En la construcción del modelo hidráulico se debe tener claro que la metodología de resolución de las redes es el gradiente hidráulico, *“en el cual las ecuaciones de energía individuales para cada tubo se combinan con las ecuaciones de masa individuales en cada unión con el fin de obtener una solución simultánea tanto de los caudales en las tuberías como de las alturas piezométricas en los nodos, por medio de cumplir las condiciones de continuidad en cada nodo, relación no lineal entre las pérdidas por fricción y el caudal en cada tubo y la energía total disponible se gasta en pérdidas por fricción y menores”* (Saldarriaga, 2007).

La modelación se realizó en el programa comercial WaterGEMS de la empresa de ingeniería Bentley, considerando que es el software utilizado en la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P., y de acuerdo a los resultados obtenidos por (Solano López, 2012) en el trabajo de Maestría “Recopilación, Análisis y Evaluación de las metodologías de calibración de modelos de RDAP empleadas en algunas ciudades de Colombia”, determinando que la implementación del programa facilita el proceso de elaboración del modelo hidráulico y el ingreso de las mediciones de campo. A continuación, en la Tabla 1 se presenta Los resultados de (Solano López, 2012) resumiendo las ventajas, desventajas, fortalezas y limitaciones que puede presentar la utilización del programa comercial WaterGEMS.

Tabla 1. Cuadro Comparativo Ventajas, Desventajas, Fortalezas y Limitaciones para la Metodología de WaterGEMS (Solano López, 2012).

ITEM	VENTAJAS	DESVENTAJAS	FORTALEZAS	LIMITACIONES
A) Elaboración del modelo hidráulico.				
Topografía	El manejo de información se hace mediante archivos SIG que se convierten en SHAPE lo cual facilita su reconocimiento por el WATERGEMS. Este proceso no implica mayor complejidad y permite el manejo de un gran volumen de datos		El software WATERGEMS posee una interfaz gráfica amigable que facilita la elaboración de los modelos. Para el cálculo hidráulico emplea el método del gradiente y para la calibración Algoritmos Genéticos.	El manejo de la información en el momento de convertir archivos SIG en archivos SHAPE debe hacerse de forma eficiente para evitar el traslapo de la información.
Topología	Los archivos SHAPE contienen: coordenadas X,Y,Z de nudos, diámetros, longitudes y material de tuberías, además coordenadas X, Y, Z de tanques y válvulas, por último el "SETTING" de las VRP's lo que permite entender su funcionamiento, y en general verificar el comportamiento de las mediciones de presiones en esos puntos.	Los archivos SIG manejan información de diámetro, material, y longitud de las tuberías. No es posible identificar los nodos iniciales y finales de las tuberías, lo cual requiere que esto se haga de forma manual para la elaboración del archivo SHAPE ya que los cálculos hidráulicos requieren de esta información	El manejo de altos volúmenes de información se facilita mediante la conversión de archivos SIG en archivos SHAPE, ya que se requiere de una revisión para la creación de los últimos. Además, WATERGEMS mediante el comando VALIDACION permite una revisión topológica del modelo que se está creando	
Revisión y corrección de datos e información topológica y topográfica del modelo	La revisión de tuberías y nodos repetidos y faltantes permite la depuración del modelo y una efectiva simulación. En el caso Tunja, la revisión de la topología de las válvulas y accesorios, se hace mediante la elaboración en campo de "HOJAS DE VIDA".	Con respecto a la generación de curvas de nivel como chequeo de las cotas de los nudos, este método es aproximado ya que la cota topográfica ni siempre es la misma cota de nudos, sobre todo si estos indican estaciones donde estén instaladas válvulas u otros accesorios.		
	Se crean archivos SHAPE que contienen las curvas de nivel existentes en el sector, esto permite corroborar los datos de cotas topográficas de los nudos y tanques.			

	VENTAJAS	DESVENTAJAS	FORTALEZAS	LIMITACIONES
Elaboración de Patrones de consumo		En el caso Bogotá, las demandas se asignaron con factores iguales para todos los nudos. Lo cual no es cierto debido a que existen usuarios con patrones de consumo variables (grandes consumidores).	WATERGEMS permite elaborar patrones de consumo horario, diario y mensual	
Elaboración de curvas de modulación	Las curvas de modulación calculadas para los tanques son una excelente alternativa para modelar en periodo extendido la red. Establecer un tanque en representación de la conexión de entrada es una buena opción para la simulación del gradiente de entrada al sector.			
Geo-referenciación de usuarios y sus consumos		Se tiene información de las coordenadas X,Y de los usuarios, pero no es claro si esa coordenada corresponde al centro del lote o donde está instalado el medidor de consumo.	Es posible identificar mediante la elaboración de un archivo SHAPE, las zonas con estratos socioeconómicos.	Los archivos SIG no permiten el almacenamiento de datos de consumos y facturación para los usuarios. Es necesario crear un archivo SHAPE para incorporar esta información, lo cual implica que puedan existir errores en el momento de concatenar información.
Cálculo y Asignación de demandas en los nudos	En el caso de Bogotá, se analizaron los consumos de un (1) año, lo que genera mayor confiabilidad en el momento de calcular las demandas	La asignación se hace buscando la tubería más cercana al usuario, luego el total de la demanda se distribuye por mitad entre los nudos inicial y final. Existen usuarios con lotes grandes, entonces si no se conoce bien la coordenada no se sabría a qué tubería asignar la demanda.	Las demandas se asignan al elemento más cercano (en la mayoría de casos) al usuario, es decir a la tubería. Existen muchas otras formas de realizar la asignación de demandas (cercanía a nudos, rutas de facturación, etc.)	La verificación de cercanía de los usuarios a los nudos debe hacerse manualmente.
Cálculo y Asignación de demandas en los nudos		En la ciudad de Tunja los datos de consumos facturados corresponden solamente a los últimos 6 meses, lo cual no permite un análisis crítico y una identificación de los comportamientos de las curvas de consumos.		Los datos de consumos que se obtienen generalmente son mensuales y no diarios, además son en volumen no en unidades de caudal, lo que implica una conversión en la que hay que suponer un número de habitantes por usuario.

ITEM	VENTAJAS	DESVENTAJAS	FORTALEZAS	LIMITACIONES
Cálculo de Pérdidas técnicas y comerciales	La distribución de las pérdidas totales (IANC) se hace mediante la identificación de zonas donde las conexiones clandestinas son altas y donde se tenga referencias de consumos sin facturación. (Asentamientos humanos)	Las pérdidas técnicas se analizan solamente mediante el cálculo de las pérdidas por fricción. Las pérdidas menores solo se tienen en cuenta cuando corresponden a grandes accesorios (macromedidores y válvulas)		
Balance de masa (IANC)		Las pérdidas totales no se diferencian y se distribuyen ponderadamente. Pero debe tenerse en cuenta que existen zonas con pérdidas técnicas mayores que las comerciales y viceversa		
B) Mediciones en campo				
Localización de puntos de medición de caudales y presiones	Se analizan de manera específica las estaciones reguladoras de presión: aguas arriba y aguas abajo, lo que permite revisar aspectos de funcionamiento y control en la red.		Si se tienen datos en todas las VRP's. Esto es un buen referente para la confiabilidad de información de medición en campo	
Periodicidad y frecuencia en la toma de datos	Se toman datos cada 15 minutos, durante 24 y 48 horas seguidas. Durante 7 días. Además, se tienen en cuenta los meses en los que históricamente se tienen registros de altos y bajos consumos. Lo cual es una ventaja porque permite una descripción amplia del comportamiento del consumo, además de la identificación de días atípicos.			
Filtrado para series de medición		Solo se revisa que la tendencia de las series sea parecida. En el caso de Medellín, en muchas mediciones realizadas a la salida de los tanques no se evaluaron valores negativos de caudales, suponiendo de forma errónea que correspondía a errores en los equipos, cuando en realidad correspondía a una alimentación inversa, es decir estaba entrando agua al tanque en lugar de salir.		

ITEM	VENTAJAS	DESVENTAJAS	FORTALEZAS	LIMITACIONES
C) Proceso de Calibración				
Función Objetivo	En el caso acueducto de Bogotá, las exigencias son de presiones, caudales y niveles de tanques lo cual implica una mayor exactitud del modelo calibrado ya que requiere del análisis de tuberías, nudos y tanques de alimentación como un todo.	Para los casos Medellín y Tunja las exigencias son solamente con respecto a las presiones en los nudos.	Para el caso Medellín, se establecieron valores topes para las presiones, lo que implicaba que TODOS los puntos debían ser revisados y cumplir con lo establecido	Depende de los valores establecidos como límites. Se trata solamente de cumplir con unas exigencias.
Variables de calibración y relevancia		Se calibran solo dos variables: Rugosidades en las tuberías y demandas bases en los nudos. No se tienen en cuenta diámetros (en el caso de macro rugosidades que generan variación significativa de los diámetros), ni pérdidas menores, ni análisis por fugas, ni evaluación de operación (apertura de válvulas). Además, no se le asigna un "peso" a cada variable. Si el modelo no calibra con una variable se procede a variar la otra.		
Metodologías de optimización	El software WATERGEMS trabaja con Algoritmos Genéticos, lo cual es una buena opción para encontrar de forma optimizada las soluciones			
Escenarios de calibración	WATERGEMS permite establecer muchos escenarios y rangos amplios de valores que tomaran los factores multiplicadores	Se generan grupos de análisis teniendo en cuenta solamente el material de las tuberías. Y para los nodos se crean grupos donde la demanda sea representativamente elevada. Podrían crearse otros grupos dependiendo por ejemplo de la edad de la tubería, de las presiones que se manejen en alguna zona, etc.	DARWIN CALIBRATOR permite la generación de muchos escenarios de calibración, y los almacena en el mismo archivo, es decir, no se requiere crear nuevos archivos independientes.	DARWIN CALIBRATOR no permite realizar una comparación entre escenarios; esto debe hacerse de forma independiente y exportando los archivos resultantes.

ITEM	VENTAJAS	DESVENTAJAS	FORTALEZAS	LIMITACIONES
Análisis de sensibilidad: Patrones de Variación	Los rangos de variación de rugosidades y demandas se establecen mediante factores multiplicadores. Estableciendo previamente, por ejemplo, que el factor multiplicador del PVC no puede ser menor a 1 porque no se instalan materiales más lisos que éste.	En sí, no se elabora un análisis de sensibilidad, solo se suponen rangos lógicos de valores que pueden adoptar las variables	Permite una variación de valores de los parámetros, estableciendo un rango lógico. Esto permite eficiencia en los procesos de cálculo.	
Ajuste de Variables	Se establece el FITNESS para el proceso de calibración, el cual indica que tan cercanos dan los valores con respecto a los medidos. Esto mediante el cálculo de uno de los tres tipos de errores. Entre más bajo sea este valor se supone que mejor es el resultado del proceso de calibración.			Aun cuando se obtenga un FITNESS bajo, este se establece para cada variable por separado. No existe algún parámetro que permita determinar la relevancia de una u otra variable calibrables.
Variables Medidas vs. Calculadas	Se elaboran gráficos de correlación (45°) para verificar el comportamiento de las variables. Además de los gráficos típicos de Q vs. Tiempo y Presión vs. Tiempo para el modelo calibrado y Datos medidos.	Para el caso de Bogotá, se calculó solamente la diferencia entre datos medidos y calculados. Como se pedía un valor máximo X, no se especificaba si era en cada punto o si era un promedio. Y se verificó que éste no fuese mayor al establecido.		

En el proceso para la construcción del modelo se requiere realizar el siguiente procedimiento:

La información de entrada al modelo se realiza mediante el Sistema de Información Geográfico (SIG) que tiene la empresa Aguas de Manizales S.A. E.SP., en el cual se tiene los datos de los conductos con su diámetro, material y longitud, los accesorios que serán principalmente: tipo unión con su información de elevación, las válvulas de cierre/apertura del sistema con su información de elevación, estado de operación y diámetro, las válvulas reguladoras de presión (VRP) con su información de elevación, diámetro y presión aguas abajo. Adicional, se considera necesaria la información de las curvas de nivel del terreno para completar los datos topológicos del modelo.

Por medio del uso de la herramienta “*ModelBuilder*” que tiene el programa se ingresan los archivos que poseen los datos de la red de acueducto a modelar, en la Figura 29 se observa el procedimiento para la construcción de los elementos en el modelo computacional y en la Tabla 2 se relaciona la información requerida de cada elemento hidráulico y el campo con el cual se enlaza al programa de modelación.

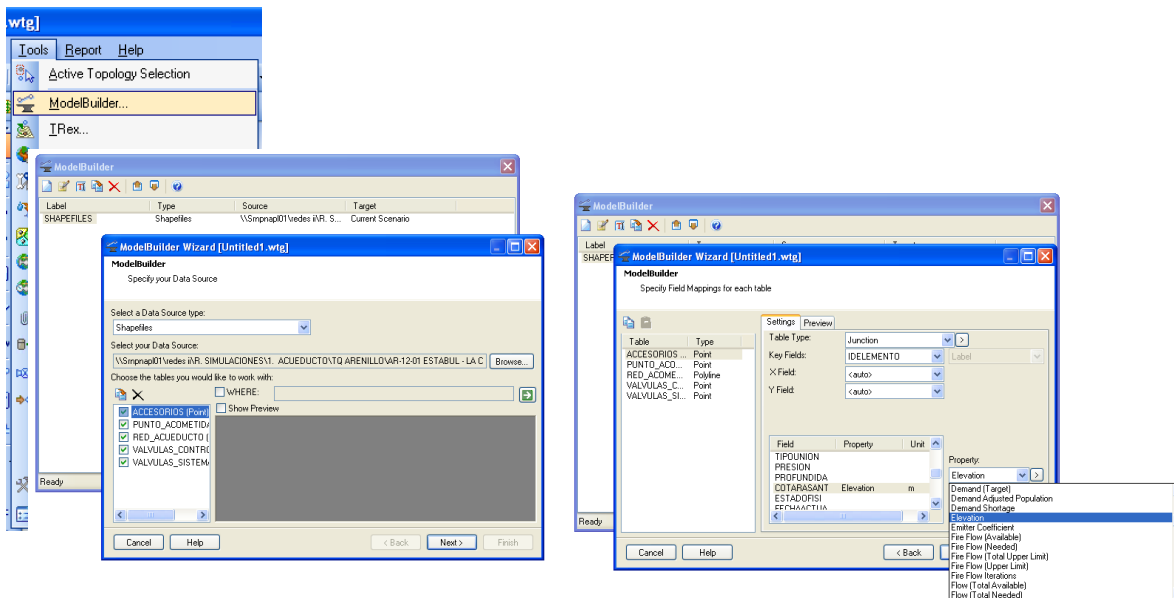


Figura 29. Procedimiento para la utilización de la herramienta “*ModelBuilder*”, (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Tabla 2. Información requerida de cada elemento hidráulico para la modelación hidráulica (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

ELEMENTO	TIPO DE ELEMENTO	CAMPO CLAVE	CAMPO	PROPIEDAD
ACCESORIOS	Junction (Unión)	IDELEMENTO	COTARASANT	Elevation
TANQUE/RESERVORIO	Reservoir (Reservorio)	IDELEMENTO	COTARASANT	Elevation
RED_ ACUEDUCTO	Pipe (Tubería)	IDELEMENTO	DIAMETRO	Diameter
			SHAPE_leng	Length
			MATERIAL	Material
VALVULAS_ CONTR	PRV (Valvula Reguladora de Presión)	IDELEMENTO	COTARASANT	Elevation
			DIAMETRO	Diameter (Valve)
			PAB	PRESSURE SETTINGS (Initial)
VALVULAS_ SISTEM	Isolation Valves (Válvula de cierre/apertura)	IDELEMENTO	COTARASANT	Elevation
			DIAMETRO	Diameter (valve)
			ESTADOOOPER	Notes

Por medio de la herramienta “*Assign Isolation Valves to pipes*”, se asignan las válvulas de cierre/apertura a las redes para que se conecten al sistema, en la Figura 30 se presenta el procedimiento para realizar la asignación de las válvulas.

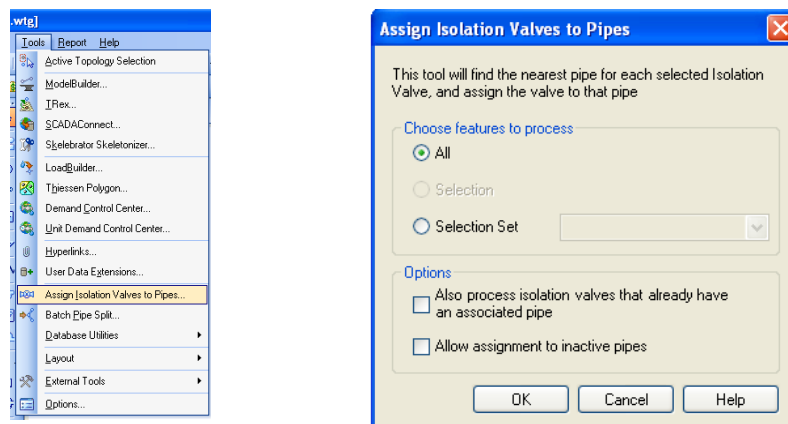


Figura 30. Procedimiento para la utilización de la herramienta “*Assign Isolation Valves to pipes*”, (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Después de tener la información dentro del modelo hidráulico, se requiere el ajuste de la misma, ya que existe información de redes en diferentes errores y puntos inconclusos como: unidades métricas incorrectas, elevaciones de los elementos en ceros, rugosidades que se deben validar, de acuerdo al método de fricción y material de la red, las pérdidas menores se deben ajustar, cambiar el estado de operación de las válvulas de sistema y revisar las presiones aguas abajo de las válvulas reguladoras de presión.

En el proceso de ajuste de la información se empieza con la revisión de las elevaciones que se encuentran en cero, las cuales por medio de los datos topológicos que se encuentran en el archivo de curvas de nivel, permiten completar las cotas de los elementos por medio de la herramienta “TRex”. A continuación, se presenta la Figura 31 con el procedimiento para completar las cotas de los elementos sin valor.

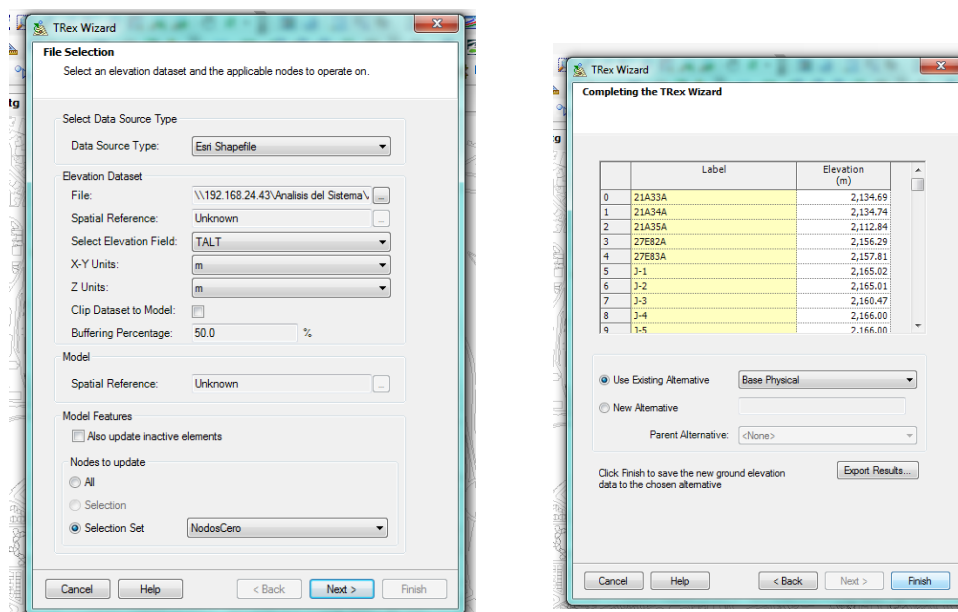


Figura 31. Procedimiento para la utilización de la herramienta “TRex”, (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Para la validación de los diámetros se revisa los tipos de materiales, en esencia, los diámetros de los materiales están dados a excepción del Polietileno (PE), que está en “mm”. Por lo anterior en la Tabla 3 se presenta la conversión de unidades del sistema internacional al sistema inglés utilizada de acuerdo con los manuales técnicos y comerciales de las tuberías de PE.

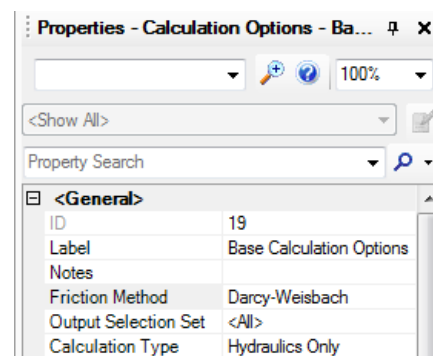
Tabla 3. Conversión de unidades utilizada en las tuberías de PE (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Diámetro (SI)	Diámetro Interno (in)
160	0,45
200	0,45
250	0,77
320	0,98
500	1,61
630	2,02
900	2,90
1100	3,54
1600	5,15
2000	6,44
2500	8,08
3150	10,15
3550	11,44

En el ingreso de los coeficientes de rugosidades de las tuberías se requiere cambiar el método de fricción al de Darcy-Weisbach, considerando que de acuerdo con (Flechas, 2012) *“la formulación es de base física y se puede utilizar para cualquier fluido, rango de velocidades, diámetros y longitudes de tubería”*. Adicionalmente, de acuerdo con el material se debe ingresar el valor más acorde, por lo anterior, en la Tabla 4 se presentan los coeficientes de rugosidad definidos para cada material.

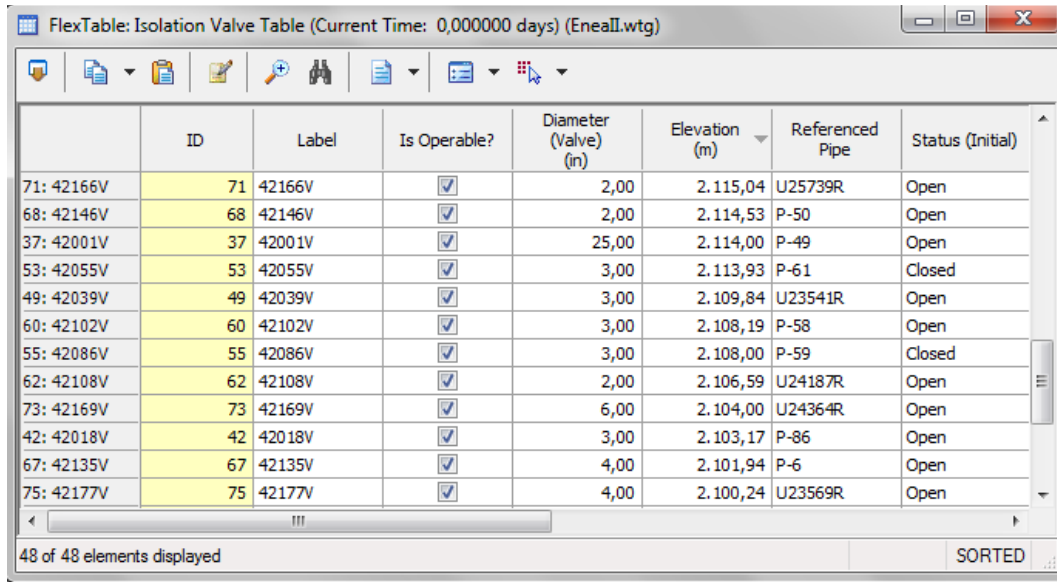
Tabla 4. Coeficientes de rugosidad definidos para cada material (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Material	Rugosidad (mm)
PE	0.0015
PVC	0.0015
AC	0.025
HD	0.25
HF	0.25
HG	0.24



En los demás procesos se requiere realizar lo siguiente:

- A. Validar el estado de operación de válvulas del sistema:** Por medio de la herramienta Flex Tables y de sus filtros, se debe modificar el campo “status” de estas válvulas para ponerlo en abierto (open) o cerrado (closed) según sea el caso (Figura 32).



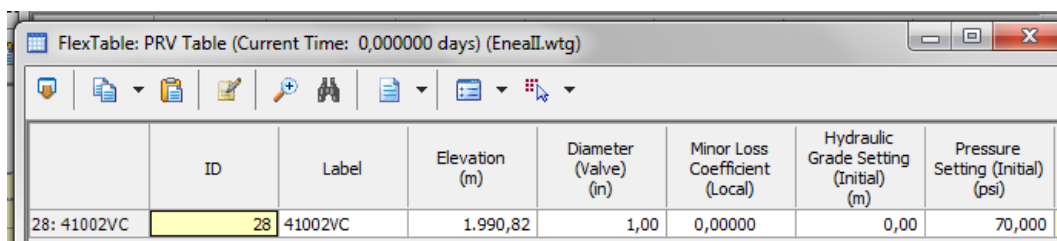
FlexTable: Isolation Valve Table (Current Time: 0,000000 days) (EneaII.wtg)

ID	Label	Is Operable?	Diameter (Valve) (in)	Elevation (m)	Referenced Pipe	Status (Initial)
71: 42166V	71 42166V	<input checked="" type="checkbox"/>	2,00	2.115,04	U25739R	Open
68: 42146V	68 42146V	<input checked="" type="checkbox"/>	2,00	2.114,53	P-50	Open
37: 42001V	37 42001V	<input checked="" type="checkbox"/>	25,00	2.114,00	P-49	Open
53: 42055V	53 42055V	<input checked="" type="checkbox"/>	3,00	2.113,93	P-61	Closed
49: 42039V	49 42039V	<input checked="" type="checkbox"/>	3,00	2.109,84	U23541R	Open
60: 42102V	60 42102V	<input checked="" type="checkbox"/>	3,00	2.108,19	P-58	Open
55: 42086V	55 42086V	<input checked="" type="checkbox"/>	3,00	2.108,00	P-59	Closed
62: 42108V	62 42108V	<input checked="" type="checkbox"/>	2,00	2.106,59	U24187R	Open
73: 42169V	73 42169V	<input checked="" type="checkbox"/>	6,00	2.104,00	U24364R	Open
42: 42018V	42 42018V	<input checked="" type="checkbox"/>	3,00	2.103,17	P-86	Open
67: 42135V	67 42135V	<input checked="" type="checkbox"/>	4,00	2.101,94	P-6	Open
75: 42177V	75 42177V	<input checked="" type="checkbox"/>	4,00	2.100,24	U23569R	Open

48 of 48 elements displayed SORTED

Figura 32. Procedimiento para Validar el estado de operación de válvulas del sistema (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

- B. Ingresar presiones aguas abajo de válvulas reguladoras:** Es necesario corroborar la presión aguas abajo “Pressure settings” de las válvulas reguladoras que se determina de la información que se ingresó del SIG después de ser validada en campo (Figura 33).

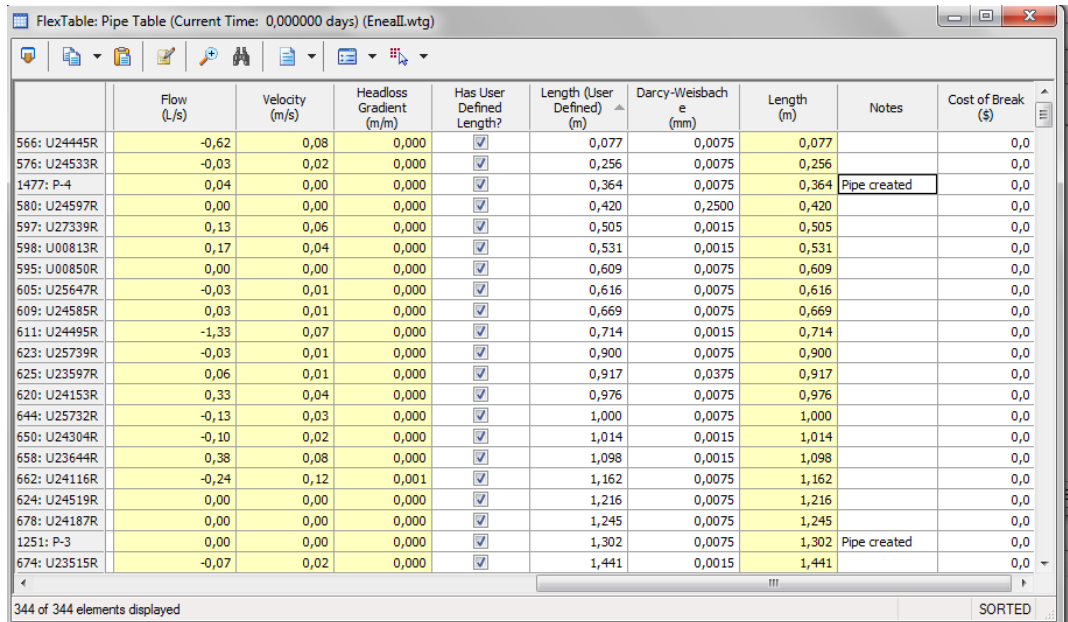


FlexTable: PRV Table (Current Time: 0,000000 days) (EneaII.wtg)

ID	Label	Elevation (m)	Diameter (Valve) (in)	Minor Loss Coefficient (Local)	Hydraulic Grade Setting (Initial) (m)	Pressure Setting (Initial) (psi)
28: 41002VC	28 41002VC	1.990,82	1,00	0,00000	0,00	70,000

Figura 33. Procedimiento para Ingresar presiones aguas abajo de válvulas reguladoras (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

- C. Ajuste de las longitudes de las tuberías:** Se deben utilizar las longitudes tomadas del SIG que se encuentran en la “Length (scaled)” e ingresarlas en la columna de “Length (User defined)”, antes de realizar variaciones en las tuberías para así conservar las distancias reales de las redes (Figura 34).



	Flow (L/s)	Velocity (m/s)	Headloss Gradient (m/m)	Has User Defined Length?	Length (User Defined) (m)	Darcy-Weisbach e (mm)	Length (m)	Notes	Cost of Break (\$)
566: U24445R	-0,62	0,08	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,077	0,0075	0,077		0,0
576: U24533R	-0,03	0,02	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,256	0,0075	0,256		0,0
1477: P-4	0,04	0,00	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,364	0,0075	0,364	Pipe created	0,0
580: U24597R	0,00	0,00	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,420	0,2500	0,420		0,0
597: U27339R	0,13	0,06	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,505	0,0015	0,505		0,0
598: U00813R	0,17	0,04	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,531	0,0015	0,531		0,0
595: U00850R	0,00	0,00	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,609	0,0075	0,609		0,0
605: U25647R	-0,03	0,01	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,616	0,0075	0,616		0,0
609: U24585R	0,03	0,01	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,669	0,0075	0,669		0,0
611: U24495R	-1,33	0,07	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,714	0,0015	0,714		0,0
623: U25739R	-0,03	0,01	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,900	0,0075	0,900		0,0
625: U23597R	0,06	0,01	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,917	0,0375	0,917		0,0
620: U24153R	0,33	0,04	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	0,976	0,0075	0,976		0,0
644: U25732R	-0,13	0,03	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	1,000	0,0075	1,000		0,0
650: U24304R	-0,10	0,02	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	1,014	0,0015	1,014		0,0
658: U23644R	0,38	0,08	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	1,098	0,0015	1,098		0,0
662: U24116R	-0,24	0,12	0,001	<input checked="" type="checkbox"/>	1,162	0,0075	1,162		0,0
624: U24519R	0,00	0,00	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	1,216	0,0075	1,216		0,0
678: U24187R	0,00	0,00	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	1,245	0,0075	1,245		0,0
1251: P-3	0,00	0,00	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	1,302	0,0075	1,302	Pipe created	0,0
674: U23515R	-0,07	0,02	0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	1,441	0,0015	1,441		0,0

Figura 34. Procedimiento para Ajuste de las longitudes de las tuberías (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

- D. Ingresar coeficientes de pérdidas menores en las tuberías:** Es necesario ingresar un valor inicial de pérdidas menores que se generan en las tuberías, las cuales se ingresan por la “flex table” y “pipe”, después en la columna “Minor loss coefficient (local)”, se debe multiplicar la longitud de la tubería por (0.02/m) como valor de referencia para posteriormente ser validadas en el proceso de calibración (Figura 35).

	Label	Length (Scaled) (m)	Start Node	Stop Node	Diameter (in)	Material	Hazen-Williams C	Has Check Valve?	Minor Loss Coefficient (Local)
566: U24445R	U24445R	0,077	42009A	J-1	4,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,01540
576: U24533R	U24533R	0,256	J-6	J-7	2,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,05120
1477: P-4	P-4	0,364	42165A	42586A	5,15	PE	130,0	<input type="checkbox"/>	0,07280
580: U24597R	U24597R	0,420	42727A	42046A	3,00	AC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,03360
597: U27339R	U27339R	0,505	40032A	40034A	2,02	PE	130,0	<input type="checkbox"/>	0,00010
598: U00813R	U00813R	0,531	41517A	41410A	3,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,00011
595: U00850R	U00850R	0,609	J-12	41410A	3,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,02436
605: U25647R	U25647R	0,616	42758A	42092A	3,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,12320
609: U24585R	U24585R	0,669	42779A	42728A	3,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,13380
611: U24495R	U24495R	0,714	J-16	42249A	6,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,00014
623: U25739R	U25739R	0,900	J-7	42160A	3,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,18000
625: U23597R	U23597R	0,917	42425A	J-19	3,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	1,83400
620: U24153R	U24153R	0,976	42165A	42118A	4,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,19520
644: U25732R	U25732R	1,000	42761A	42760A	3,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,20000
650: U24304R	U24304R	1,014	42273A	42272A	3,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,00020
658: U23644R	U23644R	1,098	42133A	J-26	3,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,00022
662: U24116R	U24116R	1,162	42161A	42065A	2,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,23240
624: U24519R	U24519R	1,216	42038A	42039A	3,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,04864
678: U24187R	U24187R	1,245	42641A	J-31	2,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,04980
1251: P-3	P-3	1,302	J-15	41555A	4,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,05208
674: U23515R	U23515R	1,441	42305A	42285A	3,00	PVC	130,0	<input type="checkbox"/>	0,00029

Figura 35. Procedimiento para Ingresar pérdidas menores en las tuberías (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Teniendo en cuenta la versatilidad que genera la herramienta “*Skelebrator Skeletonizer*”, la cual permite mayor facilidad en el manejo de la información por medio de reducir la cantidad de tuberías de acuerdo con la agrupación y respetando restricciones de tipo diámetro y material, para conservar las características originales sin alterar los resultados finales. A continuación, en la Figura 36 se presenta el procedimiento para la agrupación de las tuberías.

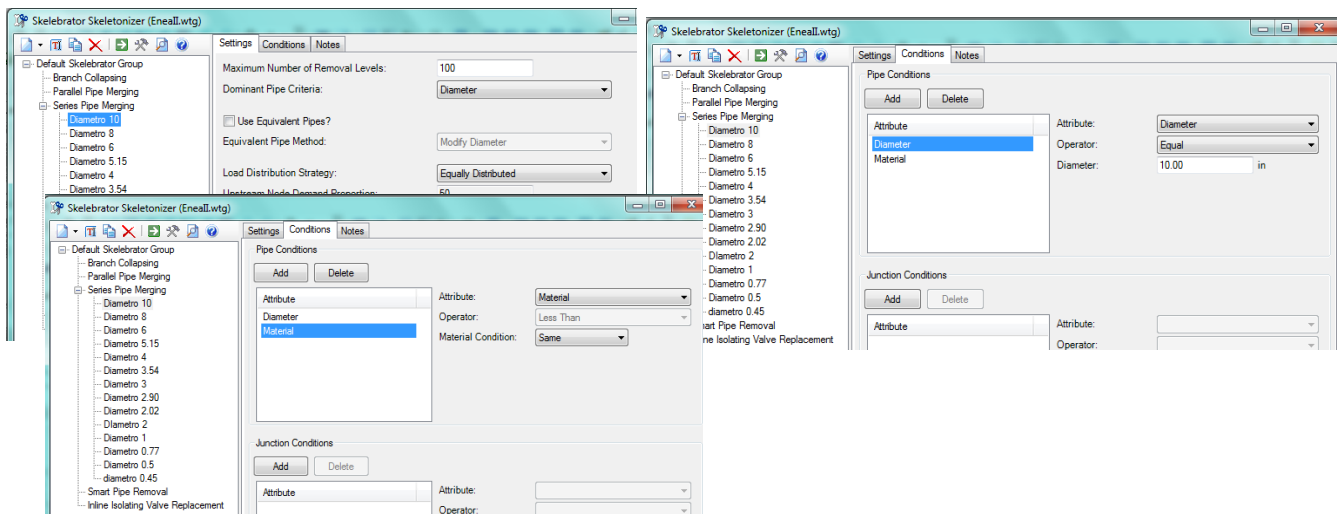


Figura 36. Procedimiento para la agrupación de tuberías por medio de “*Skelebrator Skeletonizer*” (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Después de terminar el proceso de ajuste de información, se requiere revisar el modelo completo por medio de la herramienta “QUERIES”, la cual permite localizar diferentes errores como nodos desconectados, tuberías duplicadas, conectividades del sistema, etc.

Esta herramienta como se muestra en la Figura 37 puede eliminar todos los “orphaned nodes” o nodos huérfanos que se encuentran desconectados de las tuberías o revisar las “crossing pipes” o tuberías cruzadas para establecer si debe haber nodos que las unan entre sí.

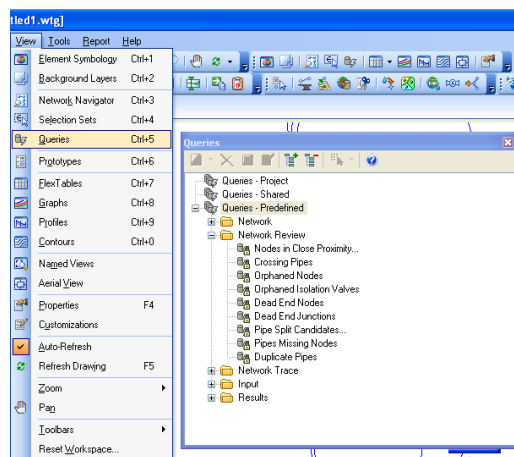


Figura 37. Procedimiento para la detección de errores por medio de “Queries” (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

El modelo se debe cambiar a estado dinámico de análisis, puesto que la información recopilada en campo permite determinar el comportamiento del sistema en un periodo extendido de mínimo 24 horas, el procedimiento para el cambio del estado de análisis se presenta en la Figura 38, a continuación.

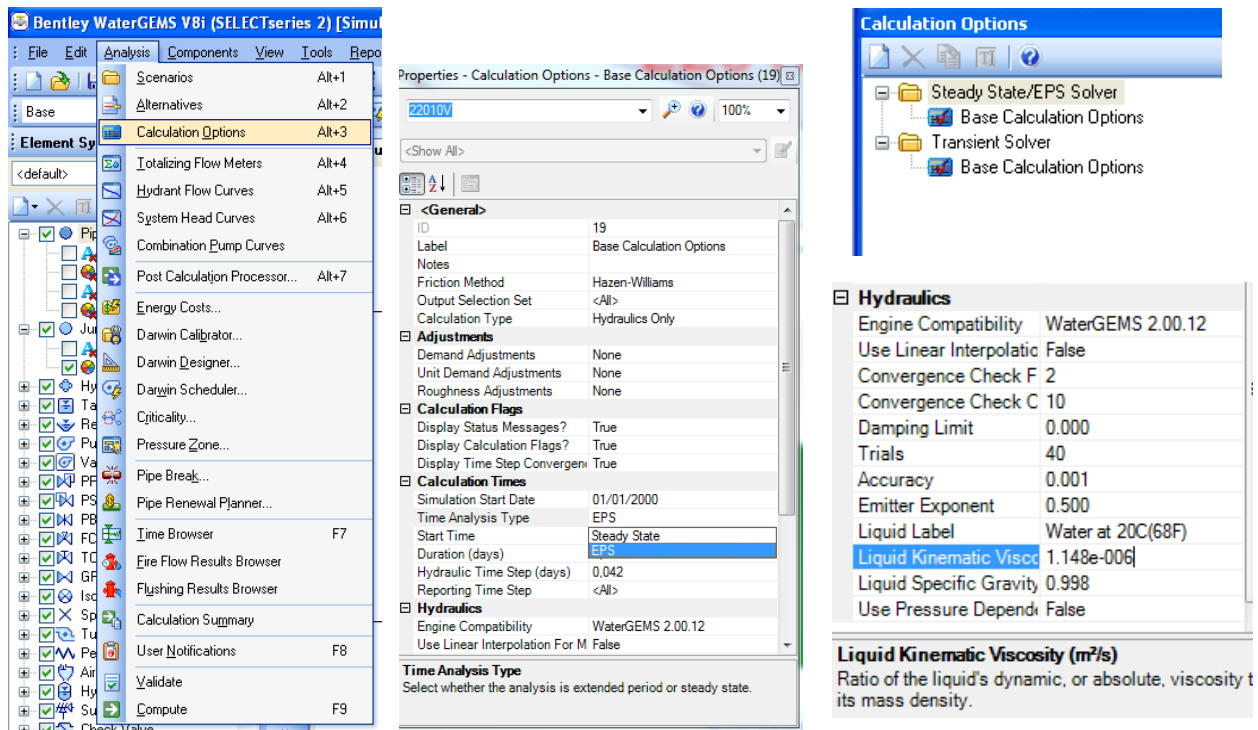


Figura 38. Procedimiento para el cambio del estado de análisis del modelo (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Finalmente, en la elaboración del modelo se requiere el ingreso de la curva o patrón de consumo como se muestra en la Figura 39, motivado por la evaluación del modelo en estado de periodo extendido y debe tener un patrón de consumo de mínimo las 24 horas, ya que fue el intervalo de tiempo determinado para realizar la toma de datos en campo.

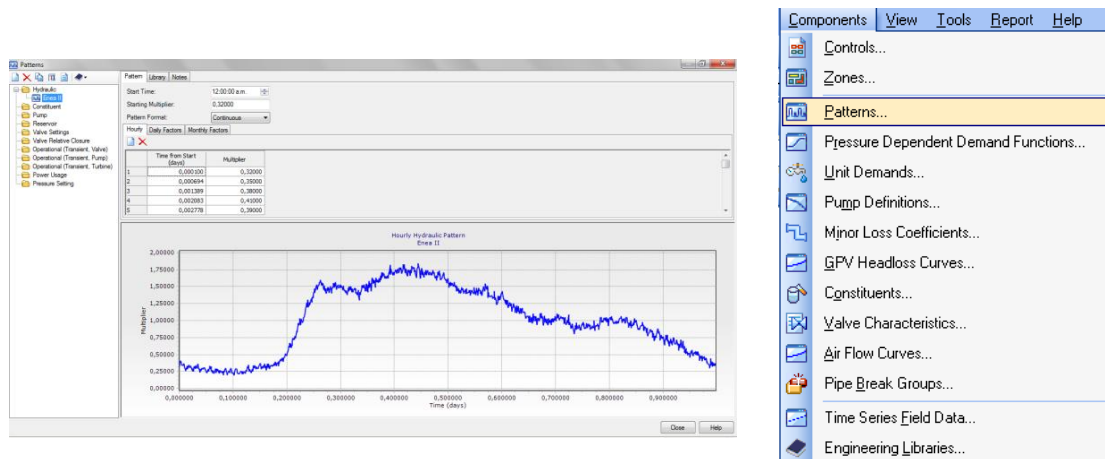


Figura 39. Procedimiento para el ingreso de la curva o patrón de consumo (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

A continuación, se requiere el ingreso de las demandas generadas por cada suscriptor espacialmente. Utilizando un programa de estructura GIS como ArcGIS se logra la unión de la información en un solo archivo, teniendo la ubicación espacial de los usuarios y sus correspondientes consumos unificados, para su posterior ingreso de esta información al modelo, por medio de la herramienta “*LoadBuilder*”, la cual permite la asignación de las demandas por diferentes metodologías (Puntos, áreas o poblaciones).

Las demandas se tienen de forma puntual generadas por usuario, por lo que se asignan por la metodología de puntos, que a su vez se subdivide en agregación por metros de facturación, nodo más cercano y la tubería más cercana. Por consiguiente, se determina realizar la asignación de las demandas por el nodo más cercano, de acuerdo con la existencia y cantidad de estos elementos y así, evitar los posibles errores de asignación. A continuación, en la Figura 40 se presenta el procedimiento para la asignación de las demandas.

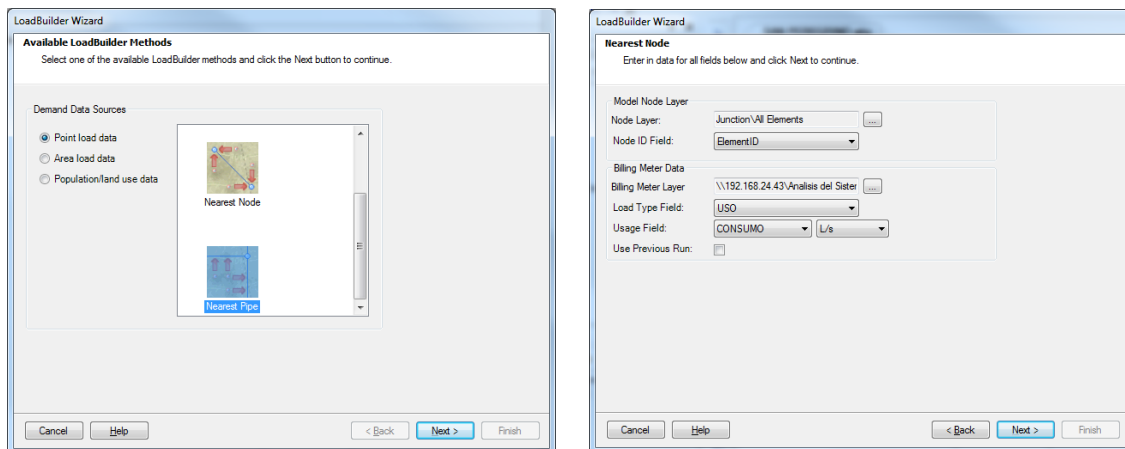




Figura 40. Procedimiento para la utilización de la herramienta “*LoadBuilder*” (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Por último, se debe validar el modelo por medio de la herramienta de validación “*Validate*” o directamente en el icono , después de confirmar que la modelación hidráulica no presenta errores o inconsistencias, se procede a ejecutar el modelo con la herramienta “*compute*” o con el icono . Después de ejecutar el modelo y validada la información inicial se concluye el proceso de construcción del modelo hidráulico, y así, entrar al proceso de calibración.

4.3.1 Análisis de sensibilidad de las variables

El análisis de las redes de distribución se realiza teniendo en cuenta los principios de conservación de la masa y la energía. De manera, que los parámetros que no se conocen de manera adecuada y pueden afectar el cumplimiento de dichos principios son las demandas desconocidas, las pérdidas por fugas o emisores, diámetros, rugosidades y pérdidas menores, variables que solo pueden ser conocidas en la instalación y puesta en funcionamiento de la red. Por lo anterior estos parámetros requieren un ajuste que determine su valor real dado el desgaste de la red a lo largo del tiempo, para así, representar el estado adecuado del sistema de distribución de agua. De acuerdo con (Saldarriaga, Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable, 2008), los parámetros se dividen en variables hidráulicas (demandas desconocidas y emisores), considerando que permiten determinar la cantidad de agua que se encuentra dentro del sistema y variables topológicas (rugosidades, diámetros y pérdidas menores) que permiten conocer la distribución de la energía en el sistema.

Demandas desconocidas: Consideran las diferentes pérdidas de agua existentes en el sistema asociadas a fraudes o conexiones directas, errores en la medición de zonas o de viviendas y medición inadecuada de los contadores.

Emisores: representan las fugas existentes en la red, desde analizar el agua perdida por los daños en las tuberías y el inadecuado control y supervisión de los diferentes elementos que componen el sistema para evitar la salida del agua a la superficie.

Diámetros: El diámetro de las tuberías varía de acuerdo con el tiempo de instalación, puesto que, entre más lejos sea la fecha de instalación el diámetro efectivo o interno de la tubería se reducirá, afectada por la presencia de incrustaciones y biopelícula formadas por la composición química del agua potable.

Rugosidades: Dependen directamente del material de la tubería, puesto que, los materiales plásticos son más lisos que los materiales de hormigón y del estado de la misma que cambia en el tiempo y genera la presencia de obstrucciones que aumentan las pérdidas por fricción en la red.

Pérdidas menores: Se determinan según la cantidad de accesorios y los cambios fuertes de dirección del conducto que generan la reducción de la velocidad del flujo y se traducen en pérdidas de energía

En la búsqueda de aumentar las presiones es importante mejorar la capacidad hidráulica de las redes, esto se puede lograr aumentando el espacio para el transporte de agua, ya que variaciones en los diámetros generan variaciones de gran magnitud en los rangos de presiones, dado que la reducción de la sección aumenta las velocidades en las redes y el esfuerzo cortante producido por la fricción genera un descenso en las presiones. Mientras que el aumento de las secciones causa el efecto contrario en el sistema estabilizando en mayor medida las presiones. A su vez se considera que estos elementos pueden afectar las demandas generadas por fugas en la red puesto que son directamente proporcionales a la presión del sistema.

4.3.2 Calibración del modelo

El proceso de calibración permite representar adecuadamente el funcionamiento de las redes, por consiguiente este es un proceso importante en la posibilidad de generar una herramienta que permita la gestión eficiente del recurso hídrico y el control operativo del sistema de acueducto. A su vez requiere la disposición del personal técnico de las empresas de servicios públicos para complementar la información correspondiente al funcionamiento del sistema y variaciones carentes en los catastros de las redes.

La calibración del modelo depende de la cantidad de información que se tiene, para así, realizar el ajuste entre los resultados del modelo hidráulico y la información que se obtiene de realizar las mediciones en campo. Por lo anterior es difícil que un modelo construido de la información de redes que se encuentran actualmente en funcionamiento y con una fecha de instalación lejana logre representar de forma totalmente precisa el comportamiento del sistema.

Según lo expresado por (Walski, 2000) en la revista American Water Works Association se presentan diversos factores que generan errores entre el comportamiento del sistema de distribución y el modelo hidráulico, como puede ser la inadecuada construcción de los planos cartográficos de las redes que pueden llevar a generar conectividad de las redes

diferente a la real, por la posible conexión de tuberías que no lo están, estado operativo de válvulas, cambio de las consignas de la presión en válvulas reguladoras, cotas de los accesorios, entre otros; a su vez se pueden presentar problemas con los factores determinados por medio de apócrifos para las rugosidades, pérdidas menores, fugas en la red y demandas, finalmente, las mediciones en campo de caudal y presión pueden presentar variaciones según la calibración de los equipos. Por lo anterior se considera indispensable que habitualmente se repita el proceso de calibración del modelo, ya que actualmente las ciudades se encuentran en expansión aumentando las demandas y a su vez el requerimiento de nuevas redes con mayor capacidad.

A continuación, se observan diferentes criterios usados para definir si los modelos se encuentran correctamente calibrados según su funcionalidad y necesidad. En la Figura 41 están los estándares dados por (The Engineering Computer Applications Committee, 1999) y en la Figura 42 los criterios usados por (BENTLEY SYSTEMS INC, 2006).

No.	Intended WDS Model Use	Level of Detail ¹⁾	WDS Model Type ²⁾	Pressure Agreements ³⁾	Flow Agreements ³⁾
1.	Long-range Planning	Low	SS or EPS	± 5 psi for 100 % readings	± 10 %
2.	Design	Moderate to High	SS or EPS	± 2 psi for 90 % readings	± 5 %
3.	Operations	Low To High	SS or EPS	± 2 psi for 90 % readings	± 5 %
4.	Water Quality	High	EPS	± 3 psi for 70 % readings	± 2 %

Notes:

¹⁾ Refers to number of pressure readings as follows: Low: 10%, Moderate: 5% and High: 2% of total number of nodes in the WDS model

²⁾ SS-Steady-State, EPS-Extended Period Simulation

³⁾ Term agreement refers to difference between measured and predicted by calibrated WDS model (psi \approx 0.7m)

Figura 41. Criterios de Calibración ECAC (The Engineering Computer Applications Committee, 1999)

Niveles aceptables de Calibración

Criterios de Caudal

- Para Líneas Primarias (Caudal >10% de la Demanda Total del Sistema o Sector) el valor simulado debe tener una diferencia de \pm **5%** con los valores de caudal medidos
- Para Líneas Secundarias (Caudal \leq 10% de la Demanda Total del Sistema o Sector) el valor simulado debe tener una diferencia de \pm **10%** con los valores de caudal medidos

Criterios de Presión

- **85%** de las medidas de campo deben estar entre \pm **0.5m** o \pm **5%** de la máxima pérdida de carga a través del sistema (el criterio que sea mas grande).
- **95%** de las medidas de campo deben estar entre \pm **0.75m** o \pm **7.5%** de la máxima pérdida de carga a través del sistema (el criterio que sea mas grande).
- **100%** de las medidas de campo deben estar entre \pm **2.0m** o \pm **15.0%** de la máxima pérdida de carga a través del sistema (la que sea mas grande).



Figura 42. Criterios de calibración Bentley (BENTLEY SYSTEMS INC, 2006)

De acuerdo a los criterios de calibración expuestos se considera necesario el cumplir unos rangos en diferencias entre las mediciones de caudal y presión con los valores obtenidos en la modelación dado por el ajuste de los parámetros calibrables, es decir que un modelo hidráulico debe ser analizado desde el punto de vista de su posibilidad de generar confianza en la toma de decisiones y gestión de operación de la redes, lo cual es dado por el conocimiento del sistema y la experticia de los operadores para determinar con mayor claridad los elementos que requieren un ajuste, por lo anterior, el modelo debe ser validado constantemente para que permita una adecuada gestión del sistema de distribución.

En el proceso de calibración se utiliza la metodología desarrollada en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) por el ingeniero Juan Saldarriaga presentada en la Figura 43.

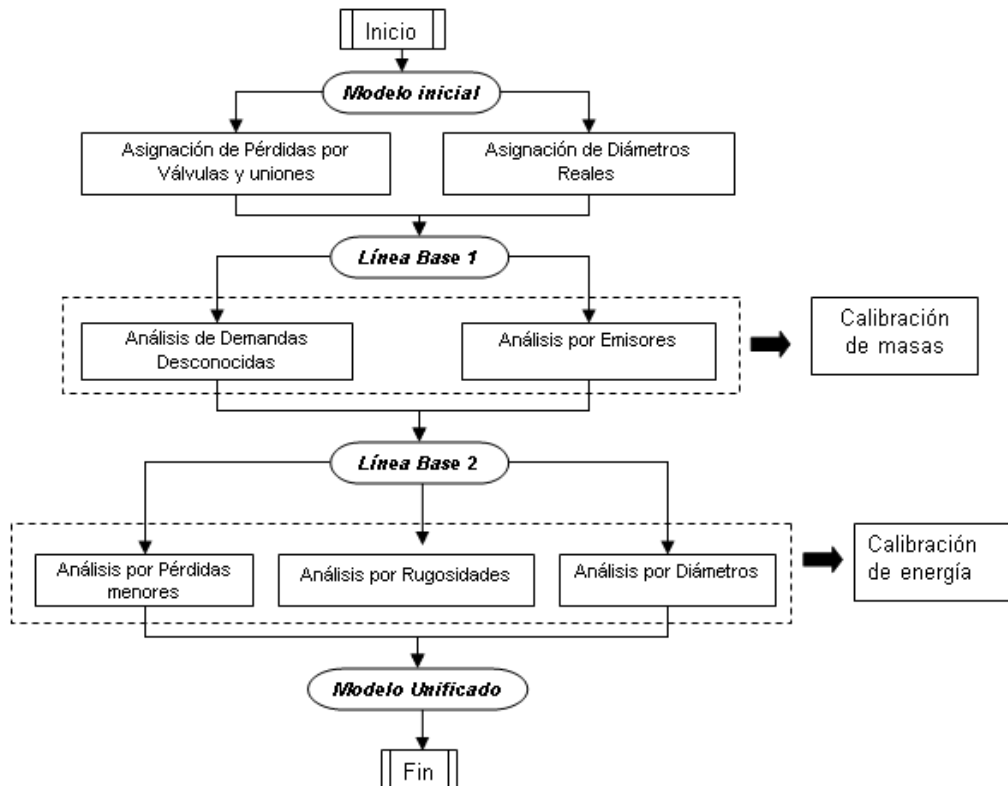


Figura 43. Metodología desarrollada en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA (Saldarriaga, 2008)

De acuerdo con lo redactado por (Saldarriaga & Jurado, Metodología de calibración de las redes de distribución de agua potable, 2008) se presentan los significados de los elementos participantes en el proceso.

Modelo inicial: Consiste en la reproducción espacial del sistema de redes de acuerdo con la información existente y los consumos ingresados por medio de los valores medios facturados, sin llegar a realizar ningún análisis previo de depuración de información, por lo tanto, si tener una representación adecuada del comportamiento de la red.

Línea Base 1: Se considera la etapa para completar la información base de la modelación por medio de la asignación de las pérdidas menores en las redes y el ajuste de los diámetros de las tuberías de acuerdo con su material.

Análisis de demandas desconocidas: Proceso en el cual se crean diversos escenarios para analizar los cambios presentes en las demandas del modelo en comparación con los

datos medidos en campo, de acuerdo con el conocimiento que se tiene en el agua pérdida por conexiones directas o errores en la facturación.

Análisis por emisores: Etapa donde se requiere el conocimiento de presencia de fugas en la red, reboses de tanques, entre otros elementos considerados pérdidas técnicas del sistema, por medio del ajuste de un coeficiente emisor que se ingresa a cada nodo y distribuye el valor de los mismos en las redes.

Calibración de masas: Consiste en análisis de sensibilidad detallado de aquellas variables que determinan el balance de masas, en los diferentes sectores de la red. Dentro de esta etapa de la calibración se prueba de forma independiente escenarios por Demandas Desconocidas y Emisores.

Línea Base 2: Después de realizado el proceso de la calibración de la masa o una aceptable aproximación por medio del ajuste de las demandas desconocidas y emisores se procede a la calibración de la energía por medio del análisis de las presiones en el sistema.

Análisis de pérdidas Menores: Consideración de la variación de las presiones producida por los cambios de dirección o variaciones puntuales en la red, por existencia de elementos o accesorios como pueden ser las uniones, reducciones, codos verticales u horizontales, válvulas, medidores, etc.

Análisis por rugosidad: Se evalúa el efecto del cambio de la rugosidad de las tuberías, puesto que está estrechamente ligado a su material, fecha de instalación, velocidades en el sistema, es difícil estimar un valor preciso por su cambio de estado en cada elemento que compone la red.

Análisis por diámetros: De acuerdo con los catastros de las redes se determinan los diámetros, los que pueden presentar información errónea en el proceso de la digitalización de los mismos, a su vez es un variable dependiente del material y durabilidad, teniendo precaución en la afectación de esta variable, puesto que de acuerdo con el análisis de sensibilidad se observa que el cambio de diámetros provoca un fuerte movimiento en la curva de energía y masa del sector puntual.

Análisis de energía: Una vez se tienen ajustados los caudales que entran y salen de la red, el siguiente paso es calibrar las variables topológicas, relacionadas principalmente con el comportamiento de las presiones en los distintos sectores del sistema.

Modelo Unificado: Es el modelo en el cual se dispone de toda la información adecuada para la correcta representación del funcionamiento del sistema de distribución, por medio del análisis y comparación de las curvas de energía y de masas, considerado un modelo calibrado.

Finalmente, en la Figura 44 elaborada por el ingeniero Juan Saldarriaga, se puede observar el ajuste logrado por medio de la implementación de la metodología desarrollada por esta entidad.

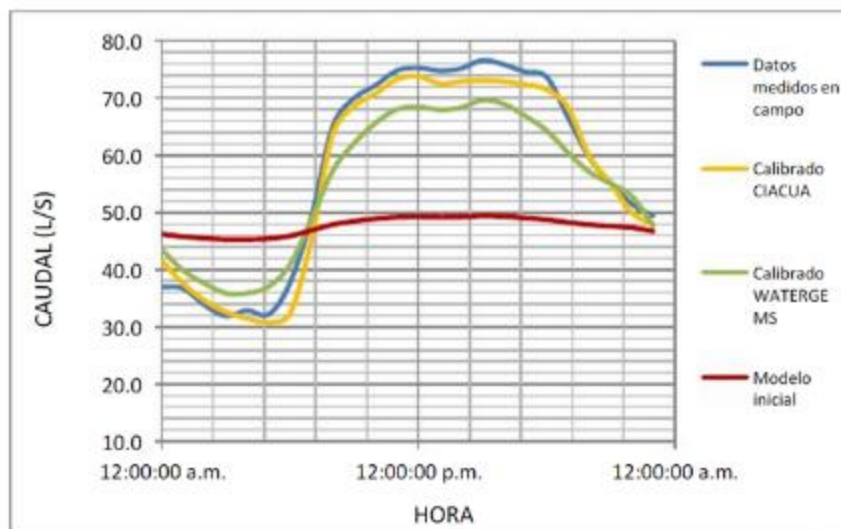


Figura 44. Resultados de la metodología desarrollada en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA (Saldarriaga, 2008)

4.4 Optimización de las redes hidráulicas

La metodología se basa en encontrar la solución más óptima que cumpla con las funciones objetivos y las restricciones indicadas, y por medio de los resultados obtenidos por el ingeniero Camilo Andrés Salcedo Ballesteros en la tesis de maestría *“Localización y Ajustes Óptimos de Válvulas Reductoras de Presión en RDAP para Minimizar el Índice de*

Agua No Contabilizada (IANC)”, se utilizaran los procedimientos con mejores resultados para esta optimización.

4.4.1 Reducción del espacio muestral (Potencia Unitaria - PU)

Se utilizará el indicador de potencia unitaria definido como la cantidad de energía disipada por una tubería, ya que permite mostrar cuales son las tuberías con mayor impacto en el comportamiento del sistema de distribución de agua potable, por lo mismo, genera un valor agregado para el proceso de optimización y rehabilitación de las redes.

Este indicador es usado para determinar las ubicaciones ideales de las válvulas reguladoras de presión, considerando que cualquier tubería es potencial para la localización de las mismas y el cual definirá que se deben instalar sobre las tuberías de mayor potencia unitaria dentro de las redes del acueducto o circuito hidráulico, adicionalmente, es necesario evaluar las funciones objetivo basadas en criterios hidráulicos de la red antes de seleccionar las posibles ubicaciones, dado que, es factible descartar algunas soluciones optimas con solo revisar un criterio.

4.4.2 Variables de decisión

Las variables de decisión serán definidas de acuerdo con la ubicación óptima de la válvula, dado por la instalación de las válvulas reguladoras de presión sobre una tubería específica y la consigna de la misma, relacionada con la presión aguas abajo que debe salir para mantener una correcta prestación del servicio y lograr zonas dentro de los rangos establecidos por las entidades regulatorias, en búsqueda de controlar la energía existente y minimizar la ocurrencia de daños en el sistema.

En la Figura 45 se presenta el efecto generado por la válvula reguladora al comportamiento de las presiones a lo largo del tiempo, donde se encuentra una curva de la consigna que tiene la reguladora y encima la energía que es disipada por medio de este elemento.

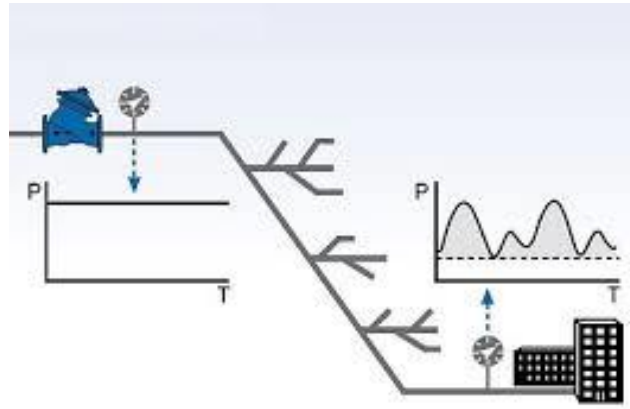


Figura 45. Administración de presión mediante válvula reductora de presión (INGENIERIA DE FLUIDOS, 2016)

4.4.3 Funciones objetivo

De acuerdo con el problema de optimización planteado, se presentaron tres posibles funciones objetivo que se pueden utilizar, considerando el exceso de energía y la poca importancia en las presiones mínimas en las redes se descarta la aplicación de la función de (Alhimiary & Alsuhaily, 2007) “Minimización de la desviación de la presión mínima”, adicionalmente la función de (Nicolini & Zovatto, 2009) “Minimización de válvulas instaladas”, es aplicable en los sectores, pero, se debe limitar a la posibilidad de garantizar la mayor área de la zona implicada dentro de los rangos de presiones admisibles.

Finalmente, la función objetivo que rige el comportamiento de los sectores analizados es la “Maximización de la Cobertura de Presiones Adecuadas” de (Mahdavi & Hosseini, 2010), puesto que, busca mejorar la cantidad de presiones dentro de los rangos establecidos en los reglamentos.

Minimización de la desviación de la presión mínima (Alhimiary & Alsuhaily, 2007)

Ecuación 14. Función de la desviación de la presión mínima

$$f(H) = \sum_{i=1}^{NPN} (H_i - H_{Li})^2 + CV$$

Ecuación 15. Promedio matemático de la presión nodal P_i

$$AV = \sum_{i=1}^{NPN} P_i / NPN$$

Ecuación 16. Desviación estándar de P_i

$$SD = \sqrt{\sum_{i=1}^{NPN} (P_i - AV)^2 / NPN}$$

En la Ecuación 14, se define como H_i y H_{Li} son las cabezas nodales disponibles y mínimas permitidas (donde; $H_{Li} = TPL + \text{elevación nodal}$) para un nodo de presión variable i . NPN es el número total de todos los nodos de presión variable implicados en el análisis. CV es el coeficiente de variación estadística, para las cabezas de presión nodal (H) de los nodos de presión variable que se puede expresar como ($CV = SD / AV$). Donde; AV es el promedio matemático (media) de la presión nodal (P_i) de una VRP i , Que puede expresarse como la Ecuación 15 y SD es la desviación estándar de (P_i) también que es expresada como la Ecuación 16.

Minimización de válvulas instaladas (Nicolini & Zovatto, 2009)

Ecuación 17. Función de válvulas instaladas

$$\begin{aligned} \min f_1 &= n_V \\ n_V &\leq N_V \end{aligned}$$

En la Ecuación 17, se define como n_V es el número de válvulas en la solución genérica y N_V es el número máximo de válvulas permitidas.

Maximización de la Cobertura de Presiones Adecuadas (Mahdavi & Hosseini, 2010)

Ecuación 18. Función de la cobertura de presiones adecuadas

$$\max f = \frac{APN}{TNN} \times 100$$

En la Ecuación 18, se define como TNN es el número total de nodos en una red de distribución de agua, APN es el nodo de presión apropiada o número de nodos teniendo la presión dentro de una presión apropiada que se define en la Ecuación 19.

Ecuación 19. Función del rango de presiones apropiadas

$$P_{min,app} \leq P_i \leq P_{max,app}$$

Donde, $P_{min,app}$ es la presión mínima apropiada y $P_{max,app}$ es la presión máxima apropiada.

4.4.4 Restricciones

De acuerdo con la finalidad del proyecto, se utilizan las restricciones de carácter hidráulico definidas por (Salcedo Ballesteros, 2014) y conceptos adicionales por las características topológicas de la zona de estudio, para definir la certeza de la solución obtenida en el proceso. Las restricciones son las siguientes.

- Conservación de la masa en cada nudo de la red.
- Conservación de energía en cada una de las tuberías de la red.
- Cumplimiento de presiones mínimas y máximas de operación.

Las restricciones están enfocadas en garantizar la veracidad de los resultados según la continuidad hidráulica de los fluidos que debe existir en las redes y el acatamiento de los rangos de presiones definidos por los entes regulatorios.

4.4.5 Definición proceso de optimización

En disposición de la topología de los sectores estudiados y la necesidad de lograr un control eficiente de la energía en exceso, se requiere la implementación de un procedimiento basado en el conocimiento técnico de las redes por el personal operativo del acueducto para definir la posibilidad de regular ubicaciones estratégicas y tener la factibilidad de unificar sectores hidráulicos en búsqueda de mejorar la prestación del servicio.

Este proceso de optimización se basa en controlar los rangos de presiones definidos por los límites naturales mediante el contorno del terreno o curvas de nivel, definiendo las posibles tuberías donde sería factible la instalación de válvulas reguladoras de presión, y por medio de la determinación de la potencia unitaria se concluye cual es el conducto más viable para la localización de la válvula.

5. Aplicaciones y resultados

5.1 Descripción área de estudio

El sector de estudio se encuentra ubicado en la zona oriente del municipio de Manizales, capital del departamento de Caldas, (Figura 46) que a su vez se encuentra en el centro occidente del territorio colombiano.

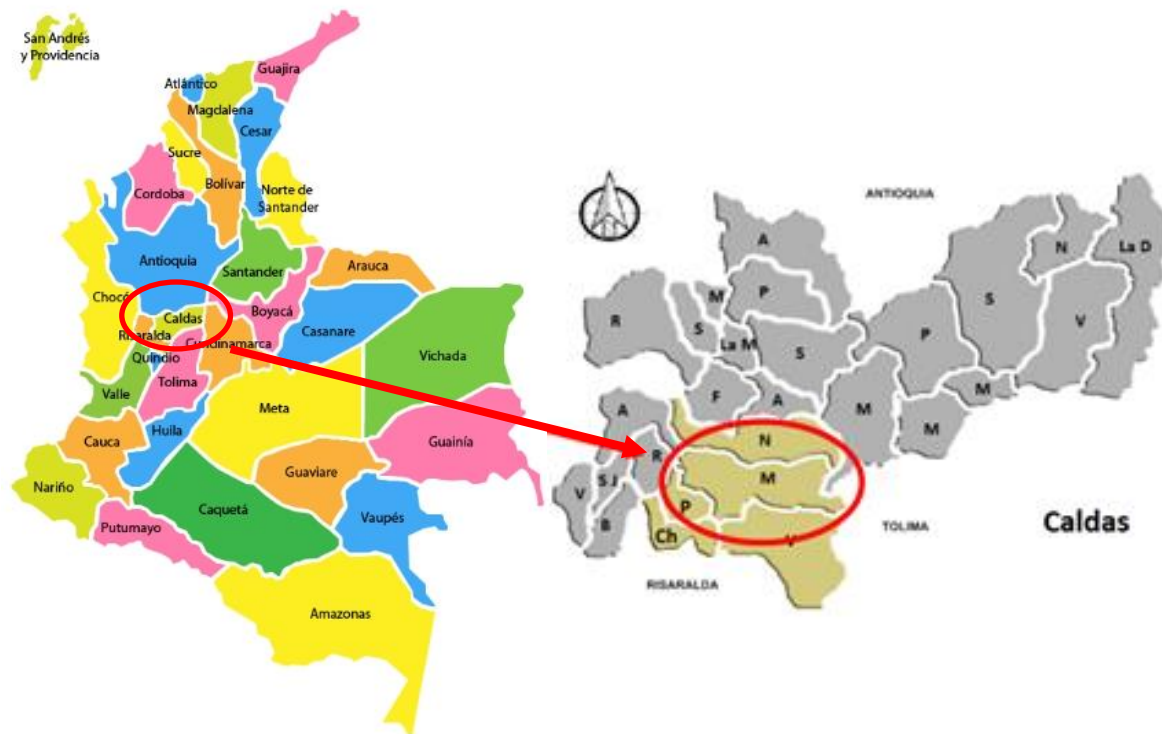


Figura 46. Mapa de Colombia con división política (Enciclopedia Colombiana, 2010; Duque, 2014)

Manizales tiene una población de 397.466 habitantes en su área urbana y rural (DANE, 2016) se localiza sobre la cordillera central (Cordillera de los andes), tiene una división territorial en 11 comunas subdividas en 114 barrios en el perímetro urbano, y 7 corregimientos en el rural (La patria, 2013). Los barrios se encuentran distribuidos en las comunas (Figura 47) de la siguiente forma:

- Comuna uno, Atardeceres: La Linda, Sacatín, Villa Pilar, Chipre, Campo Hermoso, Terrazas de Campo Hermoso, Morrogacho, La Francia, Alcázares.
- Comuna dos, San José: Asís, Jazmín, Avanzada, San Ignacio, Galán, Estrada, Delicias, San José, Colón.
- Comuna tres, Cumanday: Américas, Agustinos, Centro, San Joaquín, Campoamor, Fundadores.
- Comuna cuatro, La Estación: Santa Helena, San Jorge, El Sol, La Argentina, Asunción, Versalles, Lleras.
- Comuna cinco, Ciudadela del Norte: Bengala, Peralonso, San Cayetano, Solferino, Sinaí, La Carola, Villa Hermosa, Bosques del Norte.
- Comuna seis, Ecoturística Cerro de Oro: Viveros, La Cumbre, Minitas, La Sultana, Baja Suiza, Laureles, Alta Suiza, Colseguros.
- Comuna siete, Tesorito: San Marcel, La Alambra, Juanchito, La Enea, Lusitania.
- Comuna ocho, Palogrande: La Leonora, Los Rosales, La Rambla, Palogrande, La Estrella, Universidad, Belén, Arboleda, Palermo, Milán, Trébol, Tejares.
- Comuna nueve, Universitaria: Fátima, Betania, Pío XII, Bolivariana, San Fernando, San Luis, malabar, Camilo Torres, Aranjuez.
- Comuna diez, La Fuente: Uribe, Vélez, Colombia, Persia, Guamal, Arrayanes, Cervantes, Nevado, Villacarmenza.
- Comuna once, La Macarena: San Antonio, El Carmen, La Castellana, El Bosque, Centenario, Nogales, Estambul.

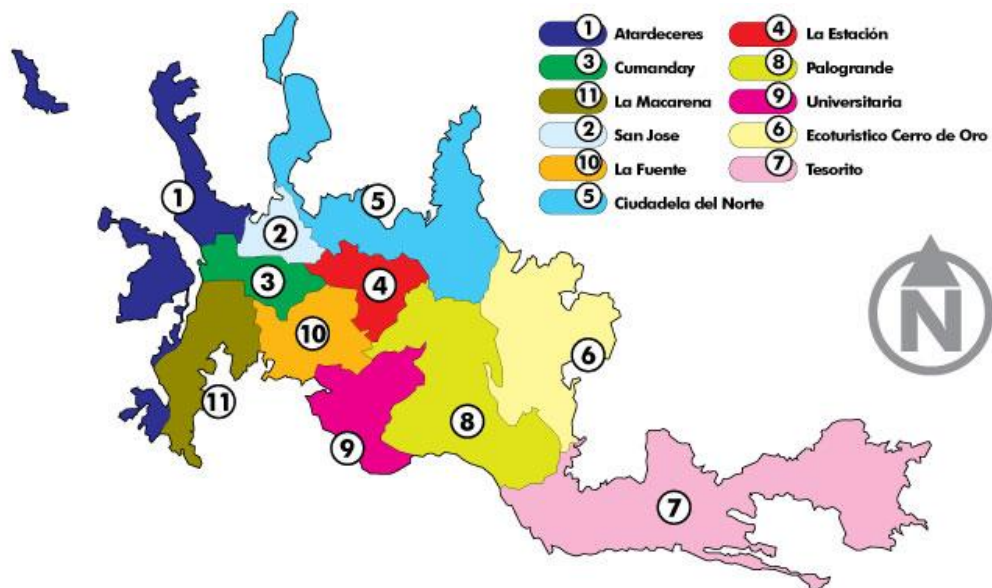


Figura 47. División territorial de Manizales, (Ortega Riaño, 2014)

En el estudio se examinará el comportamiento hidráulico de las redes de acueducto y sus elementos constitutivos de las comunas Tesorito, Palogrande, Ecoturístico Cerro de oro y la Florida (Villamaría), abarcando los barrios de Palermo, Guayacanes y Sancancio, Palogrande, La Camelia, Milán, El Trébol, San Marcel, Residencias Manizales, Alta Suiza, Colseguros, Cerros de la Alhambra, Juanchito, Maltería, La Enea, Lusitania y la Florida.

Las principales generalidades del sector de estudio son las siguientes:

- Población aproximada de 75.000 habitantes en el sector (Aguas de Manizales, 2016).
- Dentro de este sector se localiza la zona industrial (Maltería), una parte importante del comercio de la ciudad (Milán), lo cual difiere el comportamiento de consumo del industrial, comercial y residencial.
- Presenta cambios fuertes de pendiente por su topografía y tiene un Índice de Agua No Contabilizada (IANC) del 35% aproximadamente (Aguas de Manizales, 2016).
- Se han registrado 362 daños en las tuberías del sistema de distribución de agua en este sector desde el año 2002 hasta la actualidad. (Aguas de Manizales, 2016).

Las zonas de estudio se encuentran definidas y distribuidas de acuerdo al plan de sectorización de la ciudad de Manizales, expuesto a continuación.

Plan de sectorización de la ciudad de Manizales

Por medio del proyecto de sectorización se logrará una mejor gestión del sistema de distribución de agua de Manizales, permitiendo aumentar los ingresos generados por medio del valor facturado y la reducción en los costos operativos, a su vez se controla el suministro de agua potable y se evita el desperdicio de este recurso. Por lo tanto, en este proceso de optimización la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P. ha dividido la red en cuatro zonas (Centro, Sur, Norte y Oriente) y estas se subdividen en 51 sectores hidráulicos esquematizados en la Figura 49.

Adicionalmente, Aguas de Manizales a estado invirtiendo en la instalación de puntos para la medición de caudal sobre las redes y tiene la disponibilidad de equipos para la medición de presión y caudal, puesto que la inversión se está realizando en diversos puntos de la Zona Oriente, se selecciona este sector como el primordial para el estudio y realizar un plan piloto para replicar el conocimiento en el resto de las zonas. La zona Oriente abarca 14 sectores hidráulicos de alta complejidad y el presente estudio se enfocará en los siete sectores hidráulicos presentados en la Figura 48 y los restantes los analizará el Ingeniero Mateo Jaramillo Echeverri.

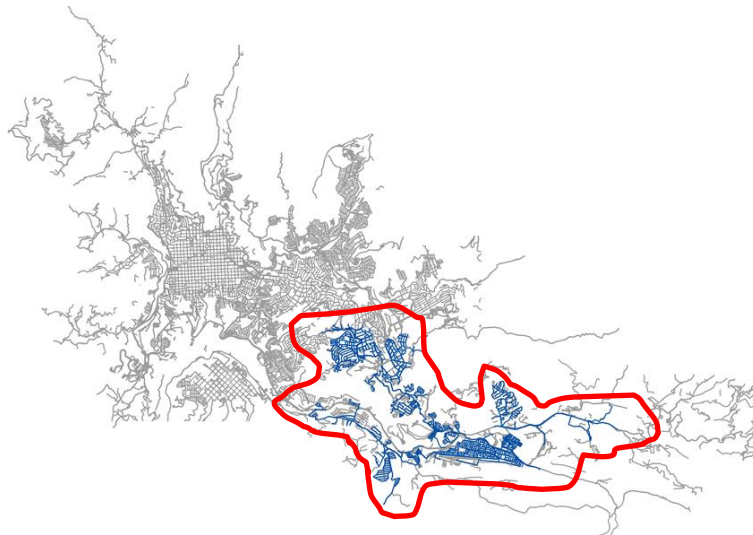


Figura 48. Localización redes de acueducto, enfoque del estudio (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2016)

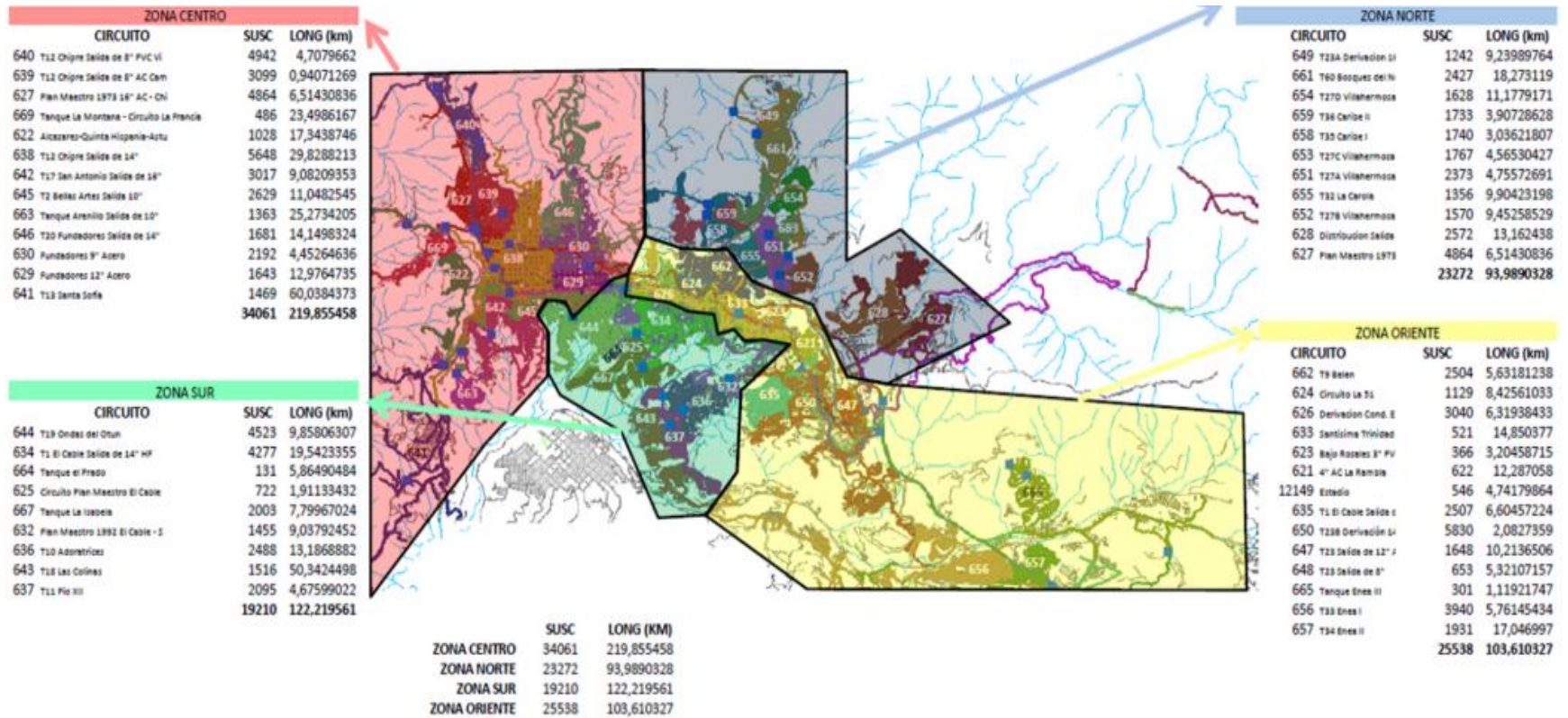


Figura 49. Mapa de circuitos hidráulicos (Aguas de Manizales, 2015)

A continuación, se presentan los siete sectores hidráulicos de estudio y sus respectivas generalidades:

T1 EL CABLE SALIDA DE 8 (ID: 635)

El circuito se encuentra ubicado en la comuna Palogrande, está constituido por sectores de los barrios Palermo, Guayacanes y Sancancio; en la Figura 50 se encuentra la ubicación espacial del sector y los daños presentados y en la Figura 51 se encuentran los hidrantes existentes pertenecientes a este circuito hidráulico, el cual se deriva del tanque el cable ubicado debajo del café Juan Valdez en la carrera 23 entre calles 64 y 65. Consta de 10.100 metros de redes de distribución, 22 hidrantes para medición de presiones y tiene un registro de 21 daños en las redes. En la Tabla 5 se presenta el resumen de la cantidad de daños por material y en la Tabla 6 se encuentran los metros de tubería por material pertenecientes al circuito de estudio (Aguas de Manizales, 2016).

T23B DERIVACIÓN DE 14 HF (ID: 650)

El circuito se encuentra ubicado entre las comunas Palogrande y Tesorito, está constituido por sectores de los barrios Palogrande, Palermo, Guayacanes, Sancancio, La Camelia, Milán, El Trébol y San Marcel; en la Figura 50 se encuentra la ubicación espacial del sector y los daños presentados y en la Figura 51 se encuentran los hidrantes existentes pertenecientes a este circuito hidráulico, el cual se deriva del tanque 23 ubicado en la planta de tratamiento Niza en la vía hacia el cerro de oro. Consta de 29.887 metros de redes de distribución, 41 hidrantes para medición de presiones y tiene un registro de 99 daños en las redes. En la Tabla 5 se presenta el resumen de la cantidad de daños por material y en la Tabla 6 se encuentran los metros de tubería por material pertenecientes al circuito de estudio (Aguas de Manizales, 2016).

T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA (ID: 647)

El circuito se encuentra ubicado en la comuna Ecoturístico cerro de oro, está constituido por sectores de los barrios Residencias Manizales y Alta Suiza; en la Figura 50 se encuentra la ubicación espacial del sector y los daños presentados y en la Figura 51 se encuentran los hidrantes existentes pertenecientes a este circuito hidráulico, el cual se deriva del tanque 23 ubicado en la planta de tratamiento Niza en la vía hacia el cerro de oro. Consta de 4.855 metros de redes de distribución, 10 hidrantes para medición de presiones y tiene un registro de 27 daños en las redes. En la Tabla 5 se presenta el resumen de la cantidad de daños por material y en la Tabla 6 se encuentran los metros de tubería por material pertenecientes al circuito de estudio (Aguas de Manizales, 2016).

T23 SALIDA DE 8 (ID: 648)

El circuito se encuentra ubicado en la comuna Ecoturístico cerro de oro, está constituido por el barrio Colseguros; en la Figura 50 se encuentra la ubicación espacial del sector y los daños presentados y en la Figura 51 se encuentran los hidrantes existentes pertenecientes a este circuito hidráulico, el cual se deriva del tanque 23 ubicado en la planta de tratamiento Niza en la vía hacia el cerro de oro. Consta de 2.970 metros de redes de distribución, 4 hidrantes para medición de presiones y tiene un registro de 5 daños en las redes. En la Tabla 5 se presenta el resumen de la cantidad de daños por material y en la Tabla 6 se encuentran los metros de tubería por material pertenecientes al circuito de estudio (Aguas de Manizales, 2016).

TANQUE ENEA III (ID: 665)

El circuito se encuentra ubicado en la comuna Tesorito, está constituido por sectores de los barrios Cerros de la Alhambra, Juanchito y Malteria; en la Figura 50 se encuentra la ubicación espacial del sector y los daños presentados y en la Figura 51 se encuentran los

hidrantes existentes pertenecientes a este circuito hidráulico, el cual se deriva del tanque Enea III ubicado en Juanchito hacienda Tesorito. Consta de 14.464 metros de redes de distribución, 14 hidrantes para medición de presiones y tiene un registro de 55 daños en las redes. En la

Tabla 5 se presenta el resumen de la cantidad de daños por material y en la Tabla 6 se encuentran los metros de tubería por material pertenecientes al circuito de estudio (Aguas de Manizales, 2016).

T33 ENEA I (ID: 656)

El circuito se encuentra ubicado entre las comunas Tesorito y el municipio de Villamaria, está constituido por sectores de los barrios La Enea, Juanchito, Lusitania y la Florida; en la Figura 50 se encuentra la ubicación espacial del sector y los daños presentados y en la Figura 51 se encuentran los hidrantes existentes pertenecientes a este circuito hidráulico, el cual se deriva del tanque Enea I ubicado en la calle 107 carrera 32A al lado del control de las busetas de la Enea. Consta de 39.947 metros de redes de distribución, 60 hidrantes para medición de presiones y tiene un registro de 100 daños en las redes. En la Tabla 5 se presenta el resumen de la cantidad de daños por material y en la Tabla 6 se encuentran los metros de tubería por material pertenecientes al circuito de estudio (Aguas de Manizales, 2016).

T34 ENEA II (ID: 657)

El circuito se encuentra ubicado entre las comunas Tesorito y el municipio de Villamaria, está constituido por sectores de los barrios La Enea, Juanchito, Lusitania y la Florida; en la Figura 50 se encuentra la ubicación espacial del sector y los daños presentados y en la Figura 51 se encuentran los hidrantes existentes pertenecientes a este circuito hidráulico, el cual se deriva del tanque Enea II ubicado en la vía hacia los termales del Otún al frente de la industria ACASA. Consta de 18.970 metros de redes de distribución, 21 hidrantes para medición de presiones y tiene un registro de 55 daños en las redes. En la

Tabla 5 se presenta el resumen de la cantidad de daños por material y en la Tabla 6 se encuentran los metros de tubería por material pertenecientes al circuito de estudio (Aguas de Manizales, 2016).

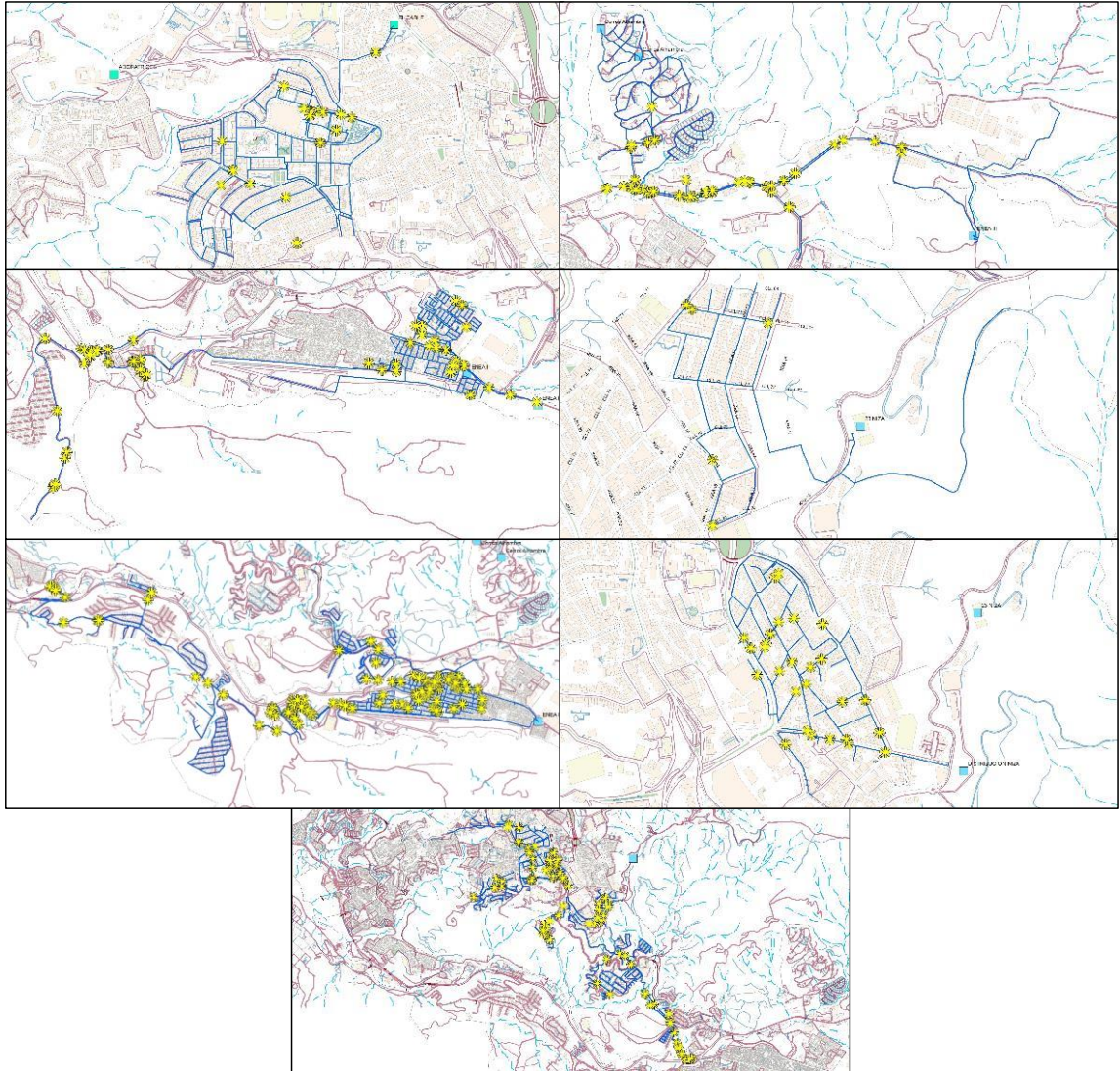


Figura 50. Ubicación espacial de daños en la zona de estudio por circuito hidráulico (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2016)

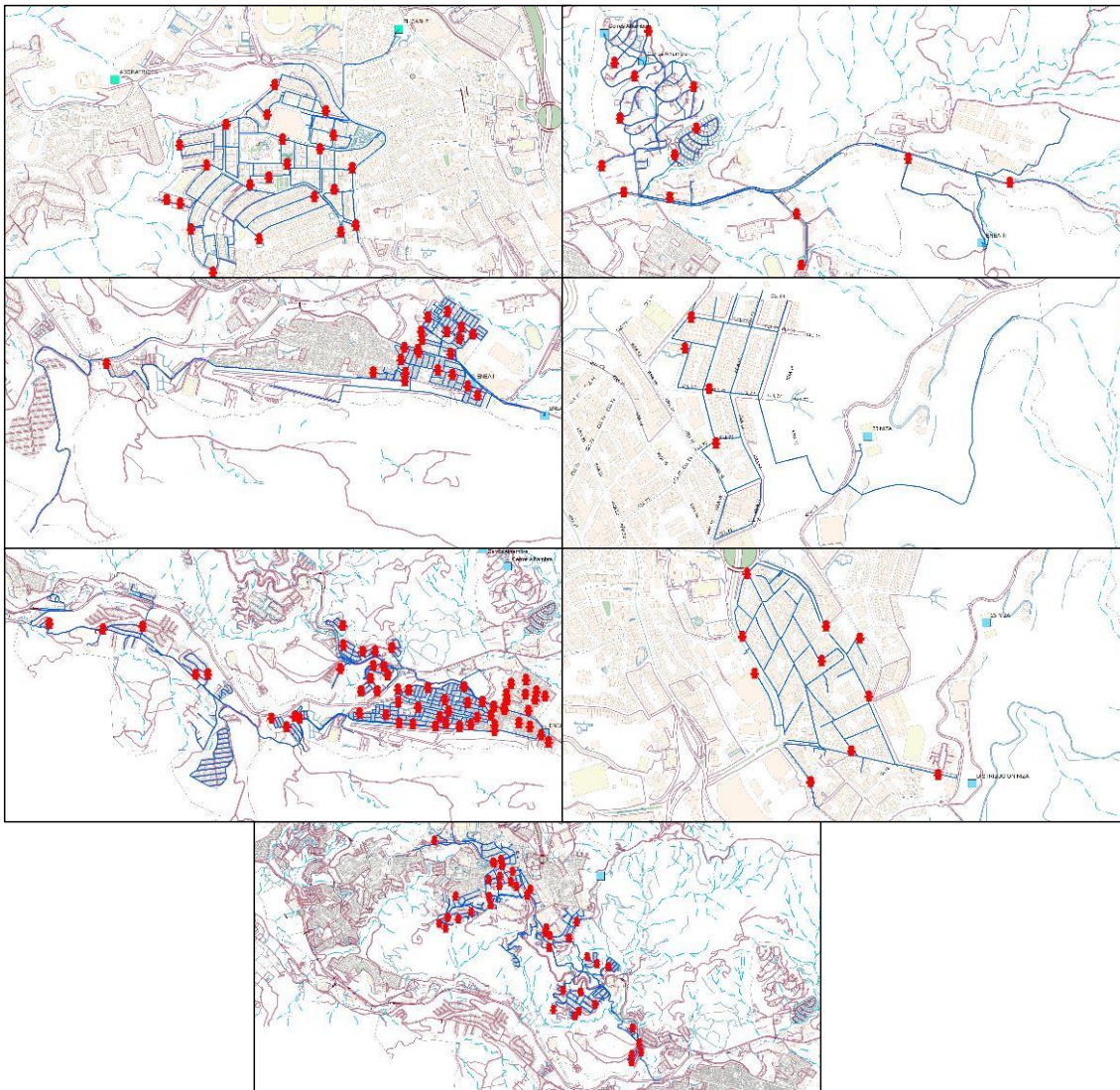


Figura 51. Ubicación espacial de hidrantes en la zona de estudio por circuito hidráulico (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2016)

Tabla 5. Cantidad de daños por material en la zona de estudio por circuito hidráulico (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2016)

Circuito / Material	AC	GRP	HD	HF	HG	PE	PVC	Total	Porcentaje del total acumulado
T1 EL CABLE SALIDA DE 8	10	X	X	X	X	1	10	21	5,80%
T23B DERIVACIÓN DE 14 HF	32	X	X	1	7	6	53	99	27,35%
T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA	18	X	X	X	X	1	8	27	7,46%
T23 SALIDA DE 8	1	X	X	X	X	X	4	5	1,38%
TANQUE ENEA III	4	X	X	X	X	12	39	55	15,19%
T33 ENEA I	1	X	X	X	1	5	92	100	27,62%
T34 ENEA II	3	X	1	1	1	12	37	55	15,19%

AC: Asbesto cemento

GRP: Plástico reforzado con vidrio

HD: Hierro dúctil

HF: Hierro fundido

HG: Hierro galvanizado

PE: Polietileno

PVC: Policloruro de vinilo

Tabla 6. Cantidad de metros de redes por material en la zona de estudio por circuito hidráulico (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2016)

Circuito / Material	AC	GRP	HD	HF	HG	PE	PVC	Total	Porcentaje del total acumulado
T1 EL CABLE SALIDA DE 8	912	X	X	X	X	61	9122	10095	8,19%
T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA	2134	X	X	X	52	214	2455	4855	3,94%
T23 SALIDA DE 8	943	71	X	10	X	11	1934	2969	2,41%
T23B DERIVACIÓN DE 14 HF	3965	X	27	396	868	2776	21854	29886	24,26%
T33 ENEA I	74	X	0	54	56	1784	37979	39946	32,43%
T34 ENEA II	1779	X	X	110	367	3055	13659	18970	15,40%
TANQUE ENEA III	1	X	X	X	106	3431	12925	16464	13,37%

De acuerdo con la información recopilada, se determina que la proporción de daños es equivalente a la cantidad de metros de tubería instalados, excepto en el sector hidráulico "T23 salida de 12 Alta Suiza", donde se observa una alta presencia de daños.

En los sectores hidráulicos se observa un comportamiento homogéneo en la distribución y presencia de daños, teniendo en cuenta, la antigüedad de las redes y las altas presiones que se manejan en las diversas zonas de la ciudad. En el análisis se puede resaltar que

zonas con redes reguladas por válvulas como el barrio El Trébol, Sancancio y Cerros de la Alhambra y que barrios con presiones moderadas como San Marcel, Chachafrutos y Colseguros tienen una baja ocurrencia de daños. El sector de La Florida es atípico en el registro considerando la modernidad de sus redes y el control de presiones por medio de válvulas reguladoras.

5.2 Recopilación de información

5.2.1 Análisis de Información existente

La información recopilada en la empresa fue la siguiente:

- Catastro detallado de las redes hidráulicas digitalizado en el sistema de información geográfico

En el análisis se encuentra que el catastro de redes actual tiene una información con relevancia que permite consolidar un levantamiento catastral del sistema como se muestra en la Figura 52, puesto que tiene datos de elevación de accesorios y tanques, materiales, diámetros, longitudes de las redes y georreferenciación de los usuarios, cobertura del perímetro urbano y rural de la ciudad y asentamientos de usos irregulares del servicio, por el contrario, en la revisión de las válvulas de cierre y apertura y límites espaciales es necesario la validación de la información contenida en el sistema de información geográfico dado que tiene falencias en la misma.

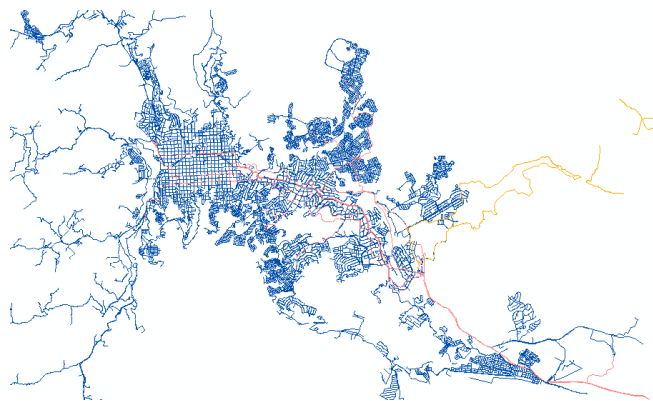


Figura 52. Catastro de Redes acueducto de Manizales (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

- Información comercial de usuarios

En la actualidad la empresa prestadora del servicio posee la información de los usuarios incluyendo sus direcciones, consumos promedio, tipo de uso del servicio y el estrato socioeconómico en el programa "AMERIKA". En dicho programa se cuenta con información de la ubicación de las conexiones irregulares del servicio (fraudes) y reconexiones sin previa autorización, adicionalmente se tiene el análisis de errores en la micromedición por el deterioro y marca del medidor del usuario.

La información con mayor importancia es la posibilidad de conocer los consumos promedio de los usuarios, el cual es un reporte que genera los consumos promedio en un periodo de seis meses por usuario y divididos por cada sector hidráulico. En la Tabla 7 se presentan los volúmenes promedio demandados por sector hidráulico.

Tabla 7. Consumos promedio de un periodo de seis meses por sector hidráulico en volumen (Elaboración propia, 2017)

T23 SALIDA DE 8		T1 EL CABLE SALIDA DE 8		ENE A I	Volumen Promedio Mensual Amerika (m ³)
Volumen Promedio Mensual "Amerika" (m3)	7.747,00	Volumen Promedio Mensual "Amerika" (m3)	29.231,00	Florida	29799,00
				San Marcel	33446,00
T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA		ENE A III		T23B DERIVACIÓN 14" HF	Volumen Promedio Mensual Amerika (m ³)
Volumen Promedio Mensual "Amerika" (m3)	15.122,00	Volumen Promedio Mensual "Amerika" (m3)	23.961,00	Conjuntos	11949,00
				Milán	29069,00
				Camelia	33970,00
ENE A II					
Volumen Promedio Mensual "Amerika" (m3)	29.357,00				

5.2.2 Recopilación de Información faltante

En la recopilación de información se utiliza lo documentado por Aguas de Manizales S.A. E.S.P. para la posterior validación de lo existente en esta búsqueda de información:

- Catastro de usuarios y válvulas por circuito hidráulico

Por medio de la realización de cierres programados en las zonas actualmente descritas como circuitos hidráulicos definidos por Aguas de Manizales, se logró determinar claramente los límites físicos y topográficos de cada sector mediante pruebas de cierre y apertura de las válvulas determinando la conectividad de tramos y usuarios pertenecientes a un sector u otro. Estas actividades se realizaron durante el primer semestre del año 2016 en horario diurno, teniendo en cuenta, generar la mínima afectación en la prestación del servicio hacia la comunidad se realizaba un censo semanalmente. En la Figura 53 se presenta una imagen donde se encuentra el plano usado para realizar el catastro de usuarios y límites.



Figura 53. Imagen de plano de catastro de usuarios y límites espaciales (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

- Programas para la búsqueda de pérdidas técnicas en el sistema

La búsqueda de pérdidas se realizó por medio del análisis en los reboses de los tanques, registro de órdenes de trabajo e inventarios de daños que permitan determinar el agua perdida en el tiempo de la ruptura y posterior rehabilitación de la red.

Adicional se analizan las fugas imperceptibles que se localizan por medio del programa de detección de las mismas, realizado por un equipo especializado de nombre geófono. Estas actividades se realizaron durante el transcurso del año

2016 en horario diurno y principalmente en horario nocturno, considerando la disminución del ruido que se presenta en el ambiente y el aumento de la presión, dado que facilita escuchar los posibles daños existentes en las redes. Los resultados de fugas localizadas de acuerdo con la cantidad de metros analizados y acometidas verificadas se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados del programa de búsqueda de fugas imperceptibles (Aguas de Manizales, 2017)

CIRCUITO	T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA	T23 SALIDA DE 8	T23B DERIVACIÓN 14" HF	ENEA II	ENEA III	ENEA I	T1 EL CABLE SALIDA DE 8
Longitud de red principal	4.807	2.962	29.603	18.922	14.324	39.822	9.964
N° acometidas	1369	660	5.151	1.921	298	3.910	2499
N° Fugas en red Principal	0	0	0	0	0	0	0
N° Fugas en Acometida	11	1	38	12	12	12	9
N° Fugas Red Interna	0	0	0	4	1	0	2
N° Incidencias Comerciales	1	1	5	0	0	0	0

- Análisis de los mantenimientos preventivos y rehabilitaciones de redes

Evaluación del inventario de reposiciones de redes considerando las obras realizadas por contratistas externos y la instalación de nuevas redes y empalme de usuarios, permitiendo tener mayor veracidad de la información (Figura 54).

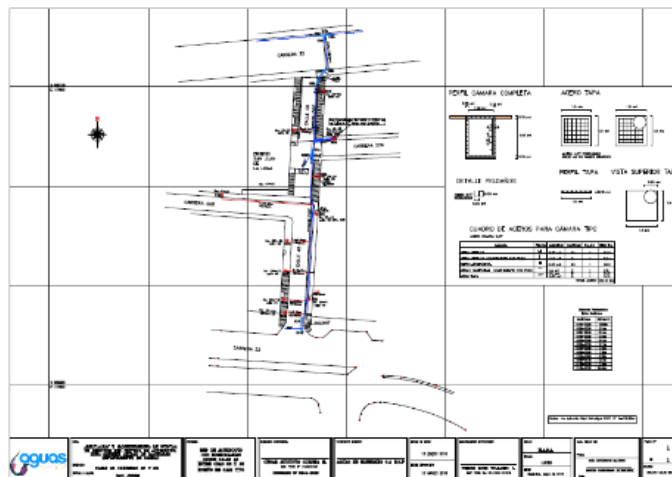


Figura 54. Plano con información de redes rehabilitadas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

5.2.3 Recolección de información de presión y caudal

En la recolección de la información se seleccionaron las ubicaciones idóneas para realizar las mediciones de caudal, por medio de determinar la red matriz de cada sector hidráulico, en la Figura 55 se presentan los mapas con la localización de los puntos de medición (indicados en forma de pentágono de color verde) por circuito hidráulico donde fue posible la instalación de los medidores portátiles.

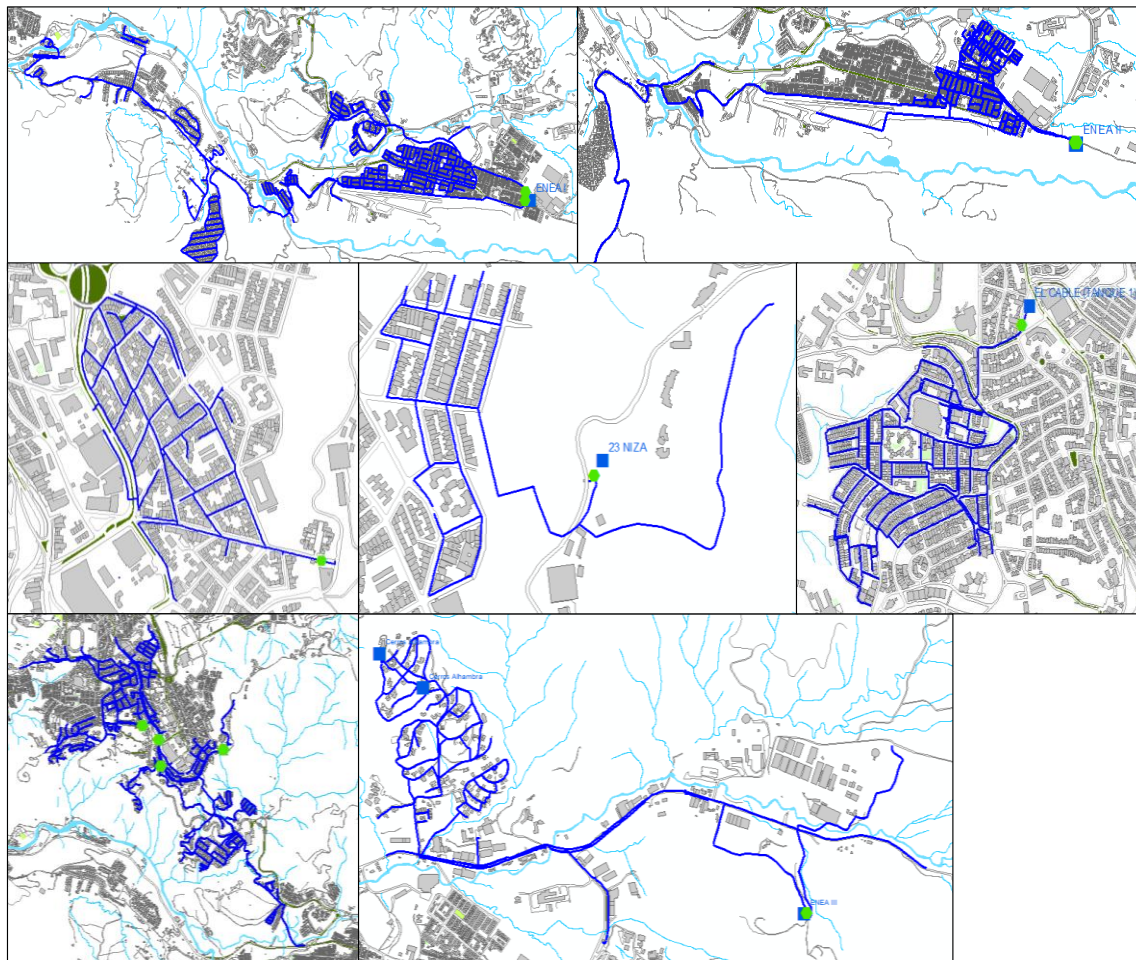


Figura 55. Localización punto para medición de caudal en la zona de estudio por cada circuito hidráulico (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

En la medición de presión se utilizaron los hidrantes dentro de cada sector, en el proceso se encontró la existencia de hidrantes en mal estado que no permitieron realizar la toma de datos, en la Tabla 9 se presenta una comparación entre la cantidad de hidrantes en buen estado y en mal estado, lo cual permite concluir que en la actualidad hay gran cantidad de hidrantes que requieren ser reparados o ingresar en un proceso de renovación,

considerando que en general el 50% de hidrantes en cada sector se encuentran en mal estado a excepción del circuito T23 salida de 8 por su mínima cantidad de estos elementos.

Tabla 9. Cantidad de hidrantes en buen y mal estado por sector hidráulico (Aguas de Manizales, 2017)

T23 SALIDA DE 8		Porcentaje (%)	T1 EL CABLE SALIDA DE 8		Porcentaje (%)	ENEA I		Porcentaje (%)
Hidrantes en buen estado	4,00	100%	Hidrantes en buen estado	8,00	36%	Hidrantes en buen estado	18,00	30%
Hidrantes en mal estado	0,00	0%	Hidrantes en mal estado	14,00	64%	Hidrantes en mal estado	42,00	70%
Total	4,00	100%	Total	22,00	100%	Total	60,00	100%

T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA		Porcentaje (%)	ENEA III		Porcentaje (%)	T23B DERIVACIÓN 14" HF		Porcentaje (%)
Hidrantes en buen estado	6,00	60%	Hidrantes en buen estado	6,00	43%	Hidrantes en buen estado	20,00	49%
Hidrantes en mal estado	4,00	40%	Hidrantes en mal estado	8,00	57%	Hidrantes en mal estado	21,00	51%
Total	10,00	100%	Total	14,00	100%	Total	41,00	100%

ENEA II		Porcentaje (%)
Hidrantes en buen estado	10,00	48%
Hidrantes en mal estado	11,00	52%
Total	21,00	100%

De acuerdo con lo anterior, se considera que la cantidad de muestras es representativa de las características de la zona, dado la ubicación de los puntos de medición y la posibilidad de conocer las cualidades en las diferentes condiciones presentes, en la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos en la medición en campo del caudal y presiones para cada sector hidráulico determinando los valores máximos, mínimos y el valor medio para el punto de medición de caudal y para cada hidrante utilizado para la medición de presión.

Tabla 10. Resultados obtenidos en la medición en campo del caudal y presiones por sector hidráulico determinando los máximos, mínimos y el medio por elemento (Elaboración propia, 2017)

PRESIONES Y CAUDALES MEDIDOS CIRCUITO EL CABLE SALIDA DE 8				
Elemento	Caudal (lps)	26008H (psi)	26037H (psi)	27002H (psi)
Máximo	20,2	131,9	133,1	79,3
Medio	10,1	126,8	129,6	76,1
Mínimo	1,6	116,1	122,5	71,1
27005H (psi)	27009H (psi)	27010H (psi)	27011H (psi)	27012H (psi)
74,8	91,7	66,5	86,6	99,6
72,7	84,3	64,3	83,8	97,5
68,4	73,3	61,1	80,0	94,2

PRESIONES Y CAUDALES MEDIDOS CIRCUITO T23B DERIVACIÓN 14HF							
Elemento	Caudal (lps)	26028H (psi)	26042H (psi)	27014H (psi)	27017H (psi)	27018H (psi)	27021H (psi)
Máximo	87,1	81,1	55,6	88,1	84,8	69,6	110,6
Medio	57,6	80,1	53,0	85,0	80,3	66,3	105,9
Mínimo	32,9	78,1	51,0	81,6	74,5	63,0	100,0
27024H (psi)	27025H (psi)	27048H (psi)	27050H (psi)	27051H (psi)	27055H (psi)	27056H (psi)	32001H (psi)
51,9	84,4	113,3	145,8	73,0	140,2	54,7	104,4
49,3	80,6	109,1	128,6	67,1	135,3	54,2	100,9
46,9	75,6	104,1	97,5	59,7	128,8	52,9	97,5
32005H (psi)	32006H (psi)	32009H (psi)	33001H (psi)	42026H (psi)	27043H (psi)		
111,9	46,1	68,9	75,0	62,2	150,8		
108,4	43,2	65,5	68,6	49,1	146,2		
104,9	40,9	61,5	63,0	20,6	140,1		

PRESIONES Y CAUDALES MEDIDOS CIRCUITO T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA							
Elemento	Caudal (lps)	27022H (psi)	27032H (psi)	27034H (psi)	27035H (psi)	27038H (psi)	27052H (psi)
Máximo	12,7	60,2	124,4	86,8	96,7	113,9	137,6
Medio	6,6	53,2	107,5	78,4	84,4	94,6	118,5
Mínimo	1,7	42,6	77,8	65,7	27,0	69,0	92,2

PRESIONES Y CAUDALES MEDIDOS CIRCUITO T23 SALIDA DE 8					
Elemento	Caudal	27026H (psi)	27039H (psi)	27040H (psi)	27041H (psi)
Máximo	5,2	122,8	96,8	90,2	109,3
Medio	2,7	114,0	88,5	82,4	101,9
Mínimo	0,4	96,8	76,2	64,0	88,4

PRESIONES Y CAUDALES MEDIDOS CIRCUITO ENEA III							
Elemento	Caudal (lps)	34003H (psi)	34004H (psi)	34008H (psi)	42031H (psi)	42032H (psi)	43001H (psi)
Máximo	16,2	53,6	84,5	88,8	129,7	180,3	90,3
Medio	12,3	52,3	83,2	80,2	128,4	178,0	89,8
Mínimo	8,0	50,4	81,4	73,9	126,9	176,0	89,2

PRESIONES Y CAUDALES MEDIDOS CIRCUITO ENEA I						
Elemento	Caudal San Marcel (lps)	Caudal La Florida (lps)	31015H (psi)	32010H (psi)	40002H (psi)	41004H (psi)
Máximo	27,5	30,2	46,7	106,3	102,6	87,8
Medio	17,3	18,4	43,3	92,8	94,2	84,7
Mínimo	7,1	7,4	41,2	73,4	78,8	82,3
41005H (psi)	41006H (psi)	41010H (psi)	41011H (psi)	41012H (psi)	41013H (psi)	41019H (psi)
85,8	107,4	83,7	101,7	79,5	91,6	72,7
80,9	103,3	68,7	86,3	76,5	91,0	69,1
77,1	94,3	46,8	63,3	69,9	90,4	64,1
41022H (psi)	41024H (psi)	41028H (psi)	41029H (psi)	41030H (psi)	42023H (psi)	42034H (psi)
62,0	113,8	80,6	107,2	76,4	54,2	51,6
59,0	110,6	71,9	92,4	71,5	50,3	49,3
55,1	103,7	58,3	70,1	67,5	44,9	46,3

PRESIONES Y CAUDALES MEDIDOS CIRCUITO TANQUE ENEA II					
Elemento	Caudal (lps)	42002H (psi)	42003H (psi)	42004H (psi)	42005H (psi)
Máximo	22,6	38,6	76,2	82,2	90,2
Medio	13,1	37,0	74,0	77,7	85,9
Mínimo	3,2	33,9	70,1	70,3	78,7
42008H (psi)	42010H (psi)	42014H (psi)	42016H (psi)	42025H (psi)	42029H (psi)
52,2	63,2	61,9	92,4	90,9	77,2
49,4	57,3	55,7	87,8	86,2	72,4
45,0	49,7	47,7	80,2	78,8	64,7

Los resultados de las mediciones en campo permiten denotar que entre más grande sea el sector mayor será su demanda, en cambio las demandas mínimas dependen del tipo de servicio que se localice, dado que los sectores con servicios comerciales e industriales tienen unas demandas mínimas altas en comparación con su población.

El análisis de presiones muestra cambios en la composición de las mismas, ya que se presentan rangos de presiones superiores a 150 psi y seguidas de presiones con un rango de 50 psi, lo cual permite mostrar las variaciones de energía que se generan en los sectores hidráulicos, de acuerdo con la topología del terreno.

5.2.4 Validación, control y seguimiento de los datos

En el proceso de revisar la información obtenida se debe validar el comportamiento de las series constituidas por las lecturas en campo, las cuales debe cumplir unas variaciones dadas por horas de máxima y mínima demanda. Considerando que un funcionamiento habitual de los sistemas de distribución se presenta con máximos consumos en las horas medias del día, aproximadamente entre las seis de la mañana y las cinco de la tarde y, por lo tanto, estas demandas generan pérdidas de presión. En el estado contrario, en las otras horas del día (cinco de la tarde hasta las seis de la mañana) se presenta un descenso importante en el volumen de agua demandado y esto se traduce en mayor presión.

Lo anterior no se observa en la Figura 56, dado que presenta presiones bajas en horas de mínima demanda y presiones altas en horas de máxima demanda, y adicional se presentan aumentos y descensos de presión en lapsos cortos de tiempo, por consiguiente, se determina que estas mediciones presentaron errores en su lectura, teniendo que recurrir a repetir el procedimiento de la toma de datos, las validaciones de la información obtenida se realizaba en la semana siguiente a la fecha de lectura para así tener la claridad en que no se presenten agentes externos que cambien las condiciones.

En el proceso fue necesario la validación y seguimiento de las nuevas tomas de datos, y la repetición de 19 mediciones consideradas con comportamientos atípicos a lo habitual y demasiado variables según los otros puntos de muestreo, en la Figura 57 se presentan las tomas de datos validadas para los mismos puntos expuestos como erróneos y donde es posible comparar los comportamientos.

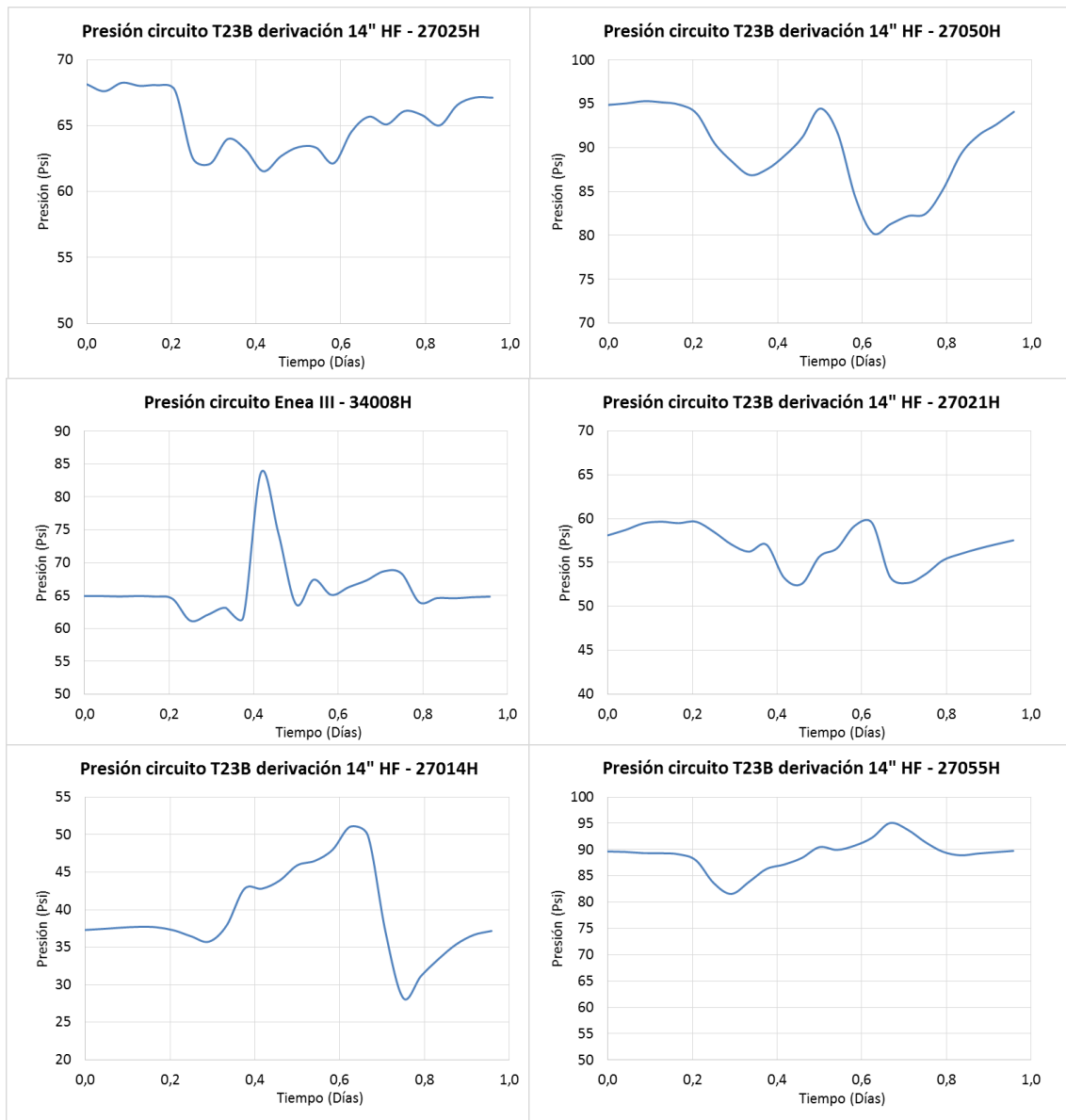


Figura 56. Tomas de presión con errores de medición en periodos de lectura de 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

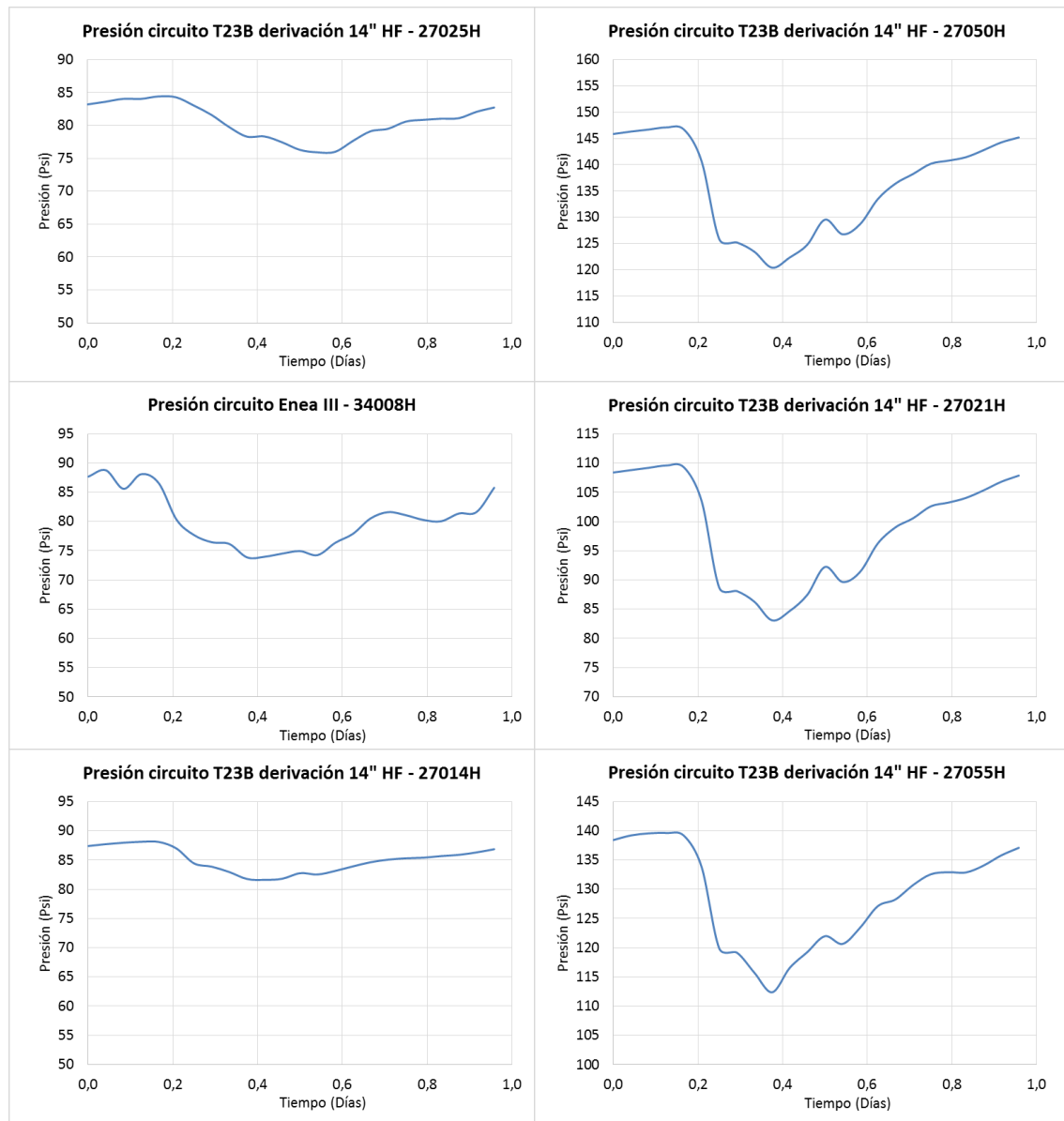


Figura 57. Tomas de presión validadas en periodos de lectura de 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

5.2.5 Construcción de las curvas de presión y patrones de consumo

Por medio de los datos validados de las presiones y caudales medidos en campo, es posible determinar los volúmenes de agua suministrada, caudales máximos, mínimos y medios por cada sector hidráulico, y finalmente el resultado son las curvas de presión por cada punto de lectura referenciado por hidrantes y patrones de consumo para cada sector

hidráulico, para así tener los datos necesarios para realizar un balance de masa y energía adecuado.

En la Figura 58 y Figura 59 se presentan las curvas de caudal y patrones de consumo obtenidos por cada sector hidráulico, donde se observa que el comportamiento de los circuitos es de uso residencial, a diferencia con el sector de Enea III, conocido por ser la zona industrial de la ciudad y de un consumo mayor en horas de la noche. Adicional se resalta el comportamiento del circuito T23B derivación 14HF, donde se observa que la curva tiene una conducta similar a zonas residenciales, pero, las demandas nocturnas son altas por la existencia de zonas comerciales como restaurantes, hoteles y bares.

Entre la Figura 60 hasta la Figura 66, se presentan las series de presión generadas con los datos de campo, donde se valida lo expuesto con el comportamiento de las zonas residenciales, las zonas comerciales y las zonas industriales, además, es fácil identificar las zonas reguladas dada las variaciones bajas que se presentan en sus presiones, pero, estas mediciones cerca de sistemas de regulación muestran que las presiones no son lineales sino que cambian de acuerdo con las demandas existentes en la zona como se identifica en los hidrantes 27056H, 32001H, 26042H del circuito T23B derivación 14HF, 34003H, 42031H, 43001H del circuito Enea III y el 41013H del circuito Enea I.

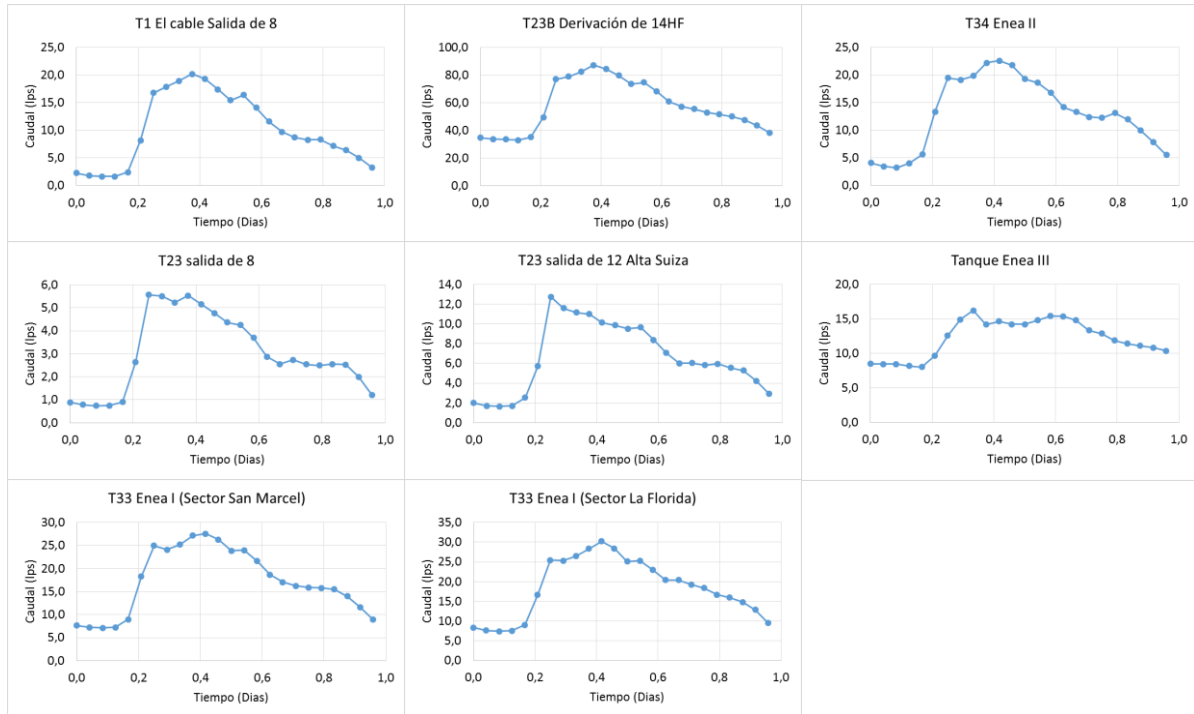


Figura 58. Curvas de caudal de la zona de estudio por sector hidráulico durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

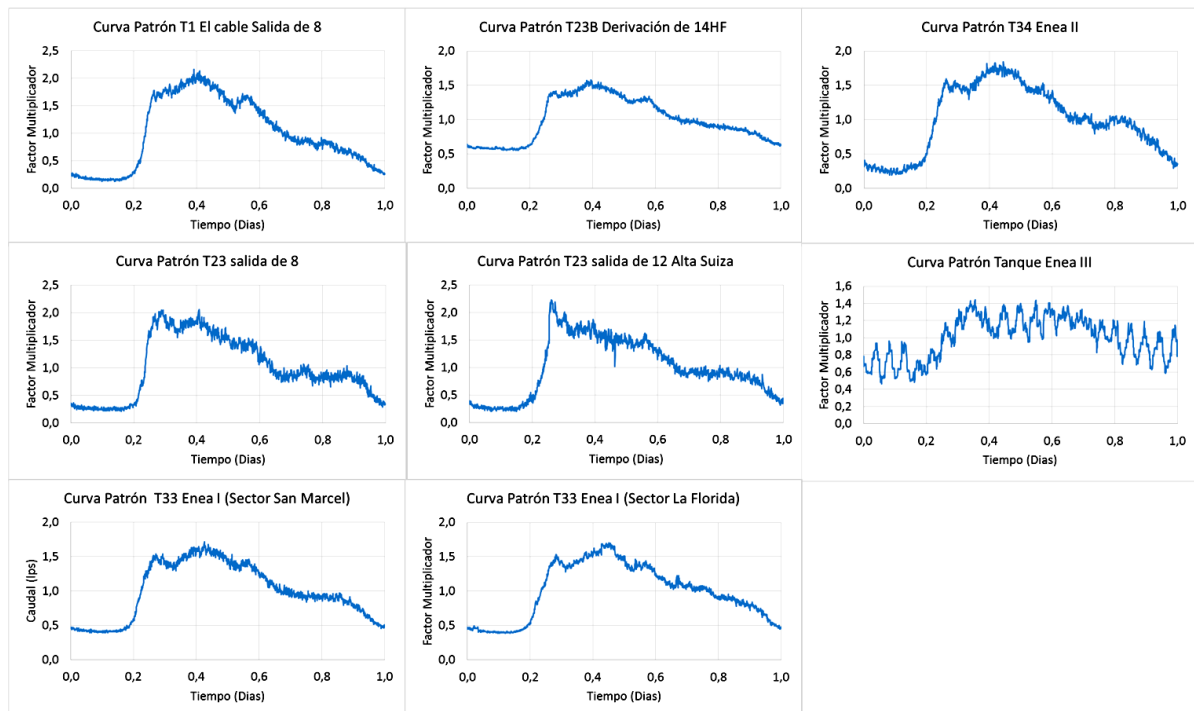


Figura 59. Patrones de consumo de la zona de estudio por sector hidráulico durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Tomas de presión T1 El Cable salida de 8

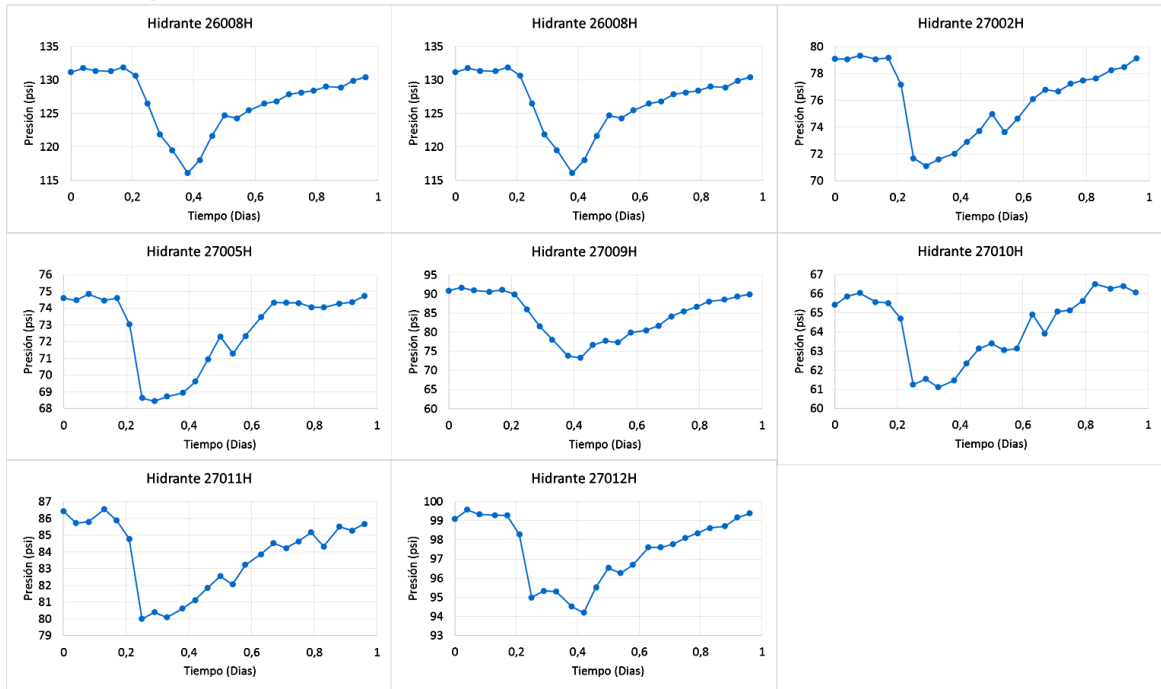


Figura 60. Curvas de presión circuito T1 El Cable salida de 8 durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Tomas de presión T23B derivación de 14 HF



Figura 61. Curvas de presión circuito T23B derivación de 14 HF durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Tomas de presión T23 salida de 12 Alta Suiza

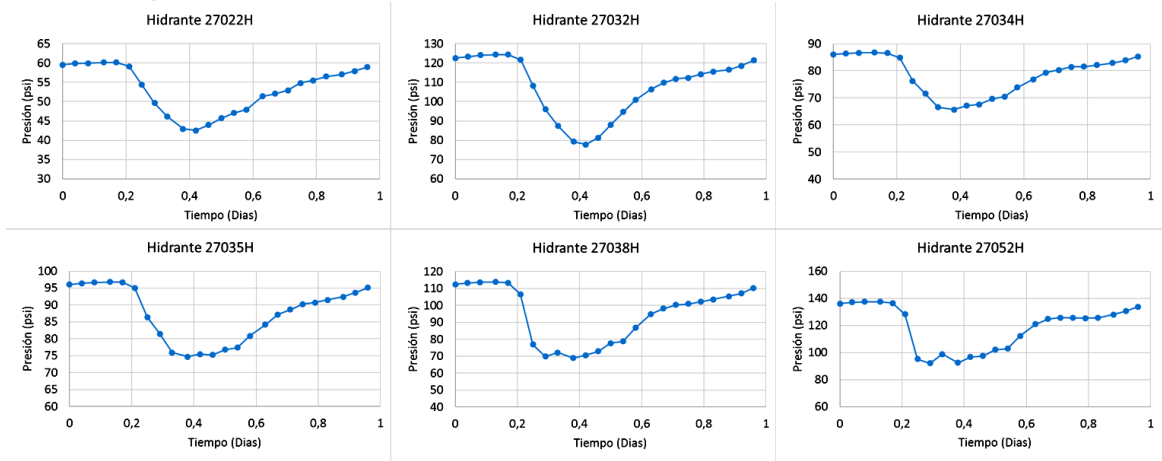


Figura 62. Curvas de presión circuito T23 salida de 12 Alta Suiza durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Tomas de presión T23 salida de 8

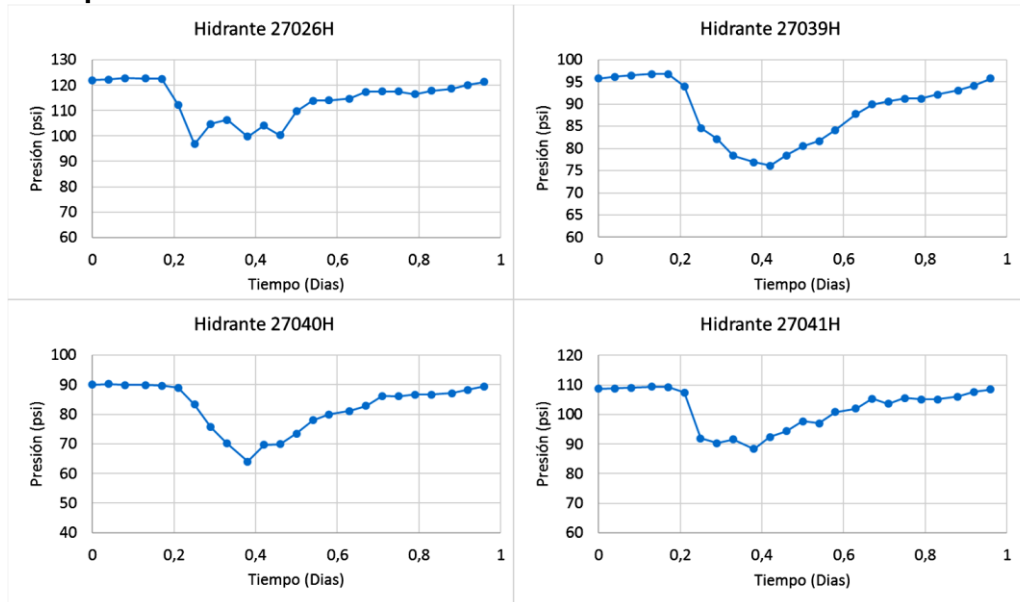


Figura 63. Curvas de presión circuito T23 salida de 8 durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Tomas de presión Enea III

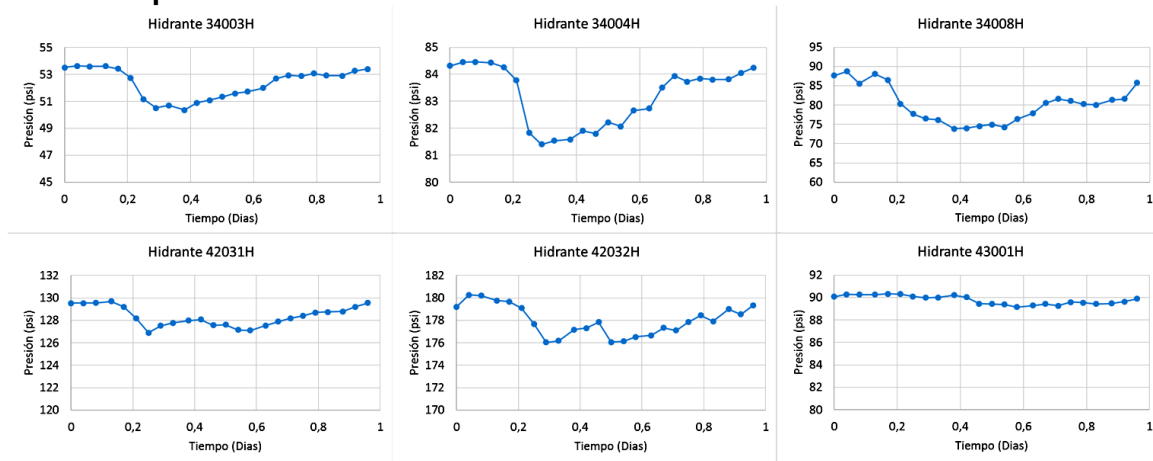


Figura 64. Curvas de presión circuito Enea III durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Tomas de presión T34 Enea II

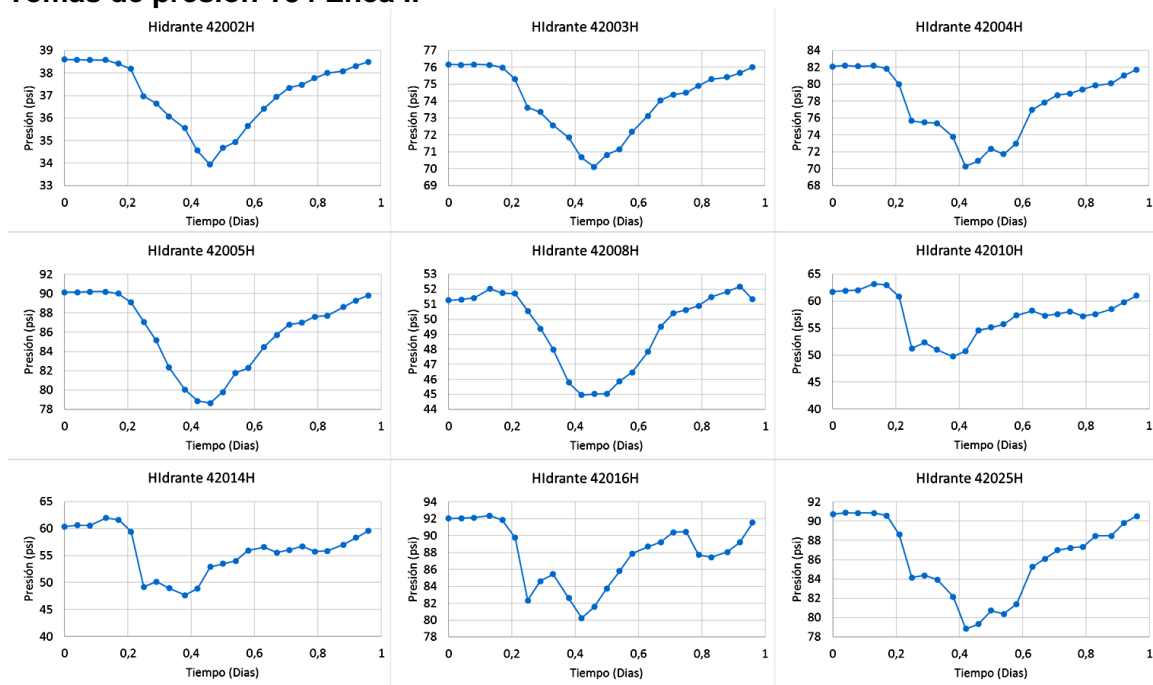


Figura 65. Curvas de presión circuito T34 Enea II durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Tomas de presión T33 Enea I

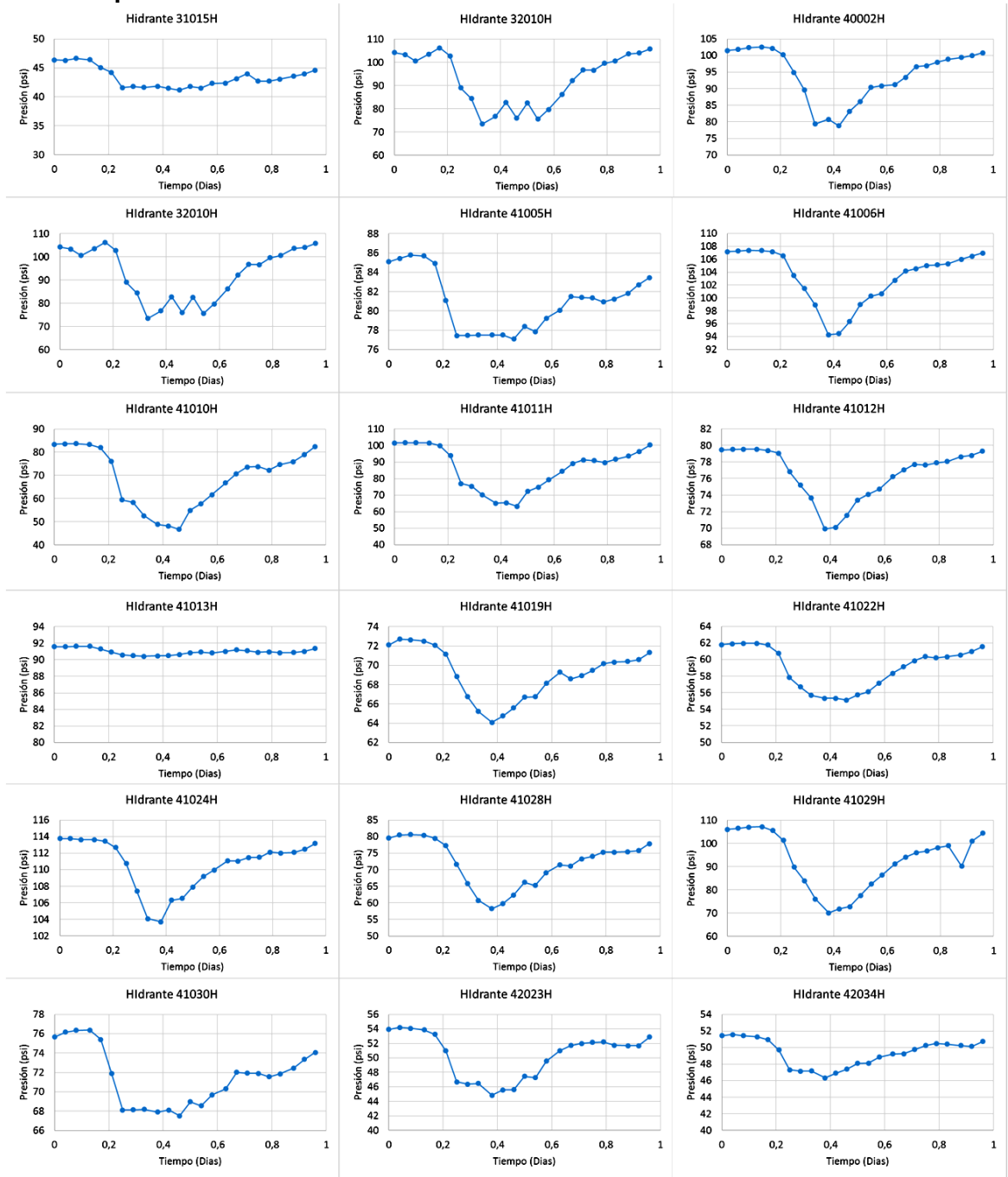


Figura 66. Curvas de presión circuito T33 Enea I durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

5.2.6 Índice de Agua No Contabilizada (IANC)

Mediante la consolidación del IANC de los sectores hidráulicos, expresados en la Tabla 11, se determina que el sector de mayor envergadura tiende a generar más pérdidas en su sistema, puesto que, entre mayor sea la cantidad de redes y accesorios que lo constituyen, tiene altas posibilidades de tener conexiones directas y puntos de fuga. Adicionalmente, los sectores de mayor tamaño y composición tienden a presentar zonas de altas presiones donde es factible la ocurrencia de daños, pero, no es posible regular las presiones dada la condición de requerir alimentar sectores ubicados en las partes altas del relieve, y no sería posible llegar con la presión exigida a abastecer.

Tabla 11. Consolidado de los IANC de los sectores zona de estudio, (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

Código	Circuito	IANC (%)
635	T1 El Cable Salida de 8"	11,58%
650	T23B Derivación 14" HF	49,78%
	T23B Derivación 14" HF (Sector Milán)	15,50%
	T23B Derivación 14" HF (Sector Camelia)	40,04%
647	T23 Salida de 12" Alta Suiza	11,48%
648	T23 Salida de 8"	0,78%
665	Tanque Enea III	24,68%
656	T33 Enea I (Sector San Marcel)	37,56%
	T33 Enea I (Sector La Florida)	25,32%
657	T34 Enea II	13,41%
IANC Promedio de la zona de estudio		23,01%

5.3 Modelo, calibración y validación hidráulica

En el proceso de modelación se realizó la construcción de las simulaciones hidráulicas en su estado base sin evaluar las condiciones o parámetros que lo afectan, para tener un primer acercamiento al sistema existente en campo. A continuación, se tienen las generalidades obtenidas para cada uno de los siete sectores hidráulicos.

T1 EL CABLE SALIDA DE 8

El modelo se encuentra constituido por 237 tuberías, 232 nodos, 74 válvulas de cierre/apertura y no tiene válvulas reguladoras, dentro del cual tiene 8 series de presión y una medición de caudal.

En la Figura 67 se presenta el modelo del sector, donde se tiene la posibilidad de tener la composición topológica y espacial de los elementos constitutivos de la zona con la finalidad de validar los parámetros que permitan asimilar las cualidades de las redes instaladas en campo.

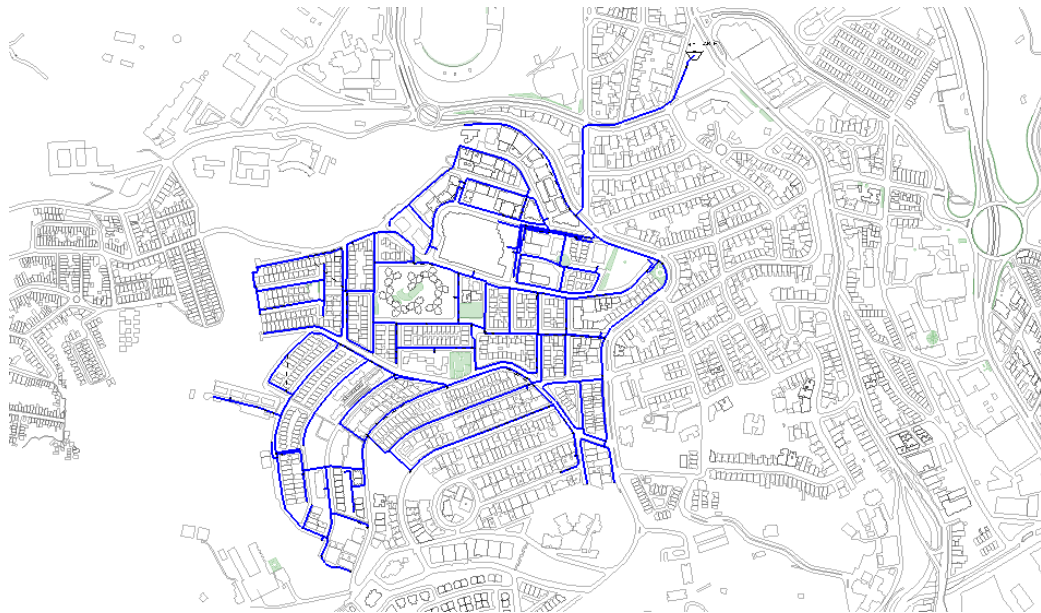


Figura 67. Representación gráfica del modelo hidráulico T1 el cable salida de 8 en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

T23B DERIVACIÓN DE 14 HF

El modelo se encuentra constituido por 752 tuberías, 682 nodos, 216 válvulas de cierre/apertura y 21 válvulas reguladoras, dentro del cual tiene 20 series de presión y 3 mediciones de caudal.

En la Figura 68 se presenta el modelo del sector, donde se tiene la posibilidad de tener la composición topológica y espacial de los elementos constitutivos de la zona con la finalidad de validar los parámetros que permitan asimilar las cualidades de las redes instaladas en campo.

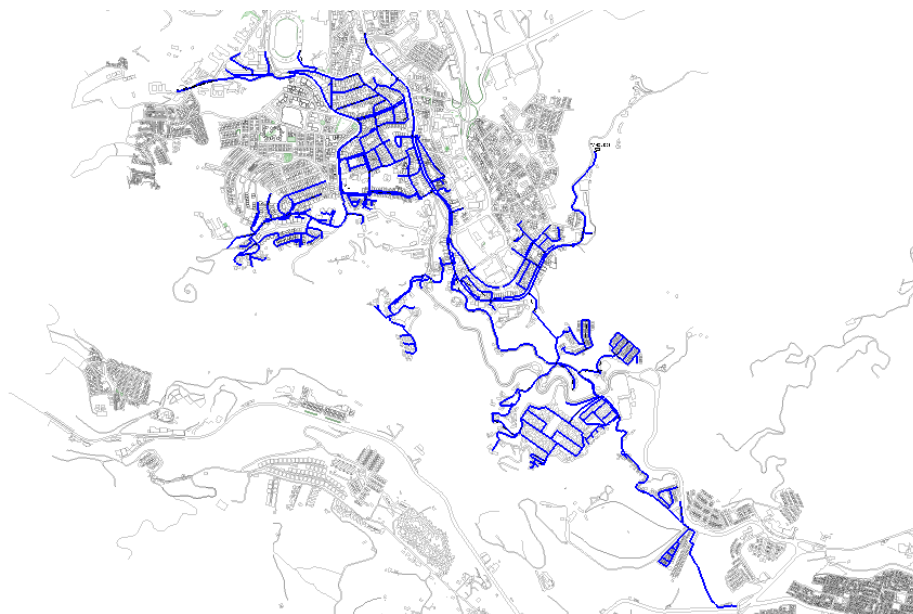


Figura 68. Representación gráfica del modelo hidráulico T23B derivación de 14 HF en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA

El modelo se encuentra constituido por 122 tuberías, 110 nodos, 21 válvulas de cierre/apertura y no tiene válvulas reguladoras, dentro del cual tiene 6 series de presión y una medición de caudal.

En la Figura 69 se presenta el modelo del sector, donde se tiene la posibilidad de tener la composición topológica y espacial de los elementos constitutivos de la zona con la finalidad de validar los parámetros que permitan asimilar las cualidades de las redes instaladas en campo.



Figura 69. Representación gráfica del modelo hidráulico T23 salida de 12 Alta Suiza en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

T23 SALIDA DE 8

El modelo se encuentra constituido por 54 tuberías, 48 nodos, 26 válvulas de cierre/apertura y no tiene válvulas reguladoras, dentro del cual tiene 4 series de presión y una medición de caudal.

En la Figura 70 se presenta el modelo del sector, donde se tiene la posibilidad de tener la composición topológica y espacial de los elementos constitutivos de la zona con la finalidad de validar los parámetros que permitan asimilar las cualidades de las redes instaladas en campo.

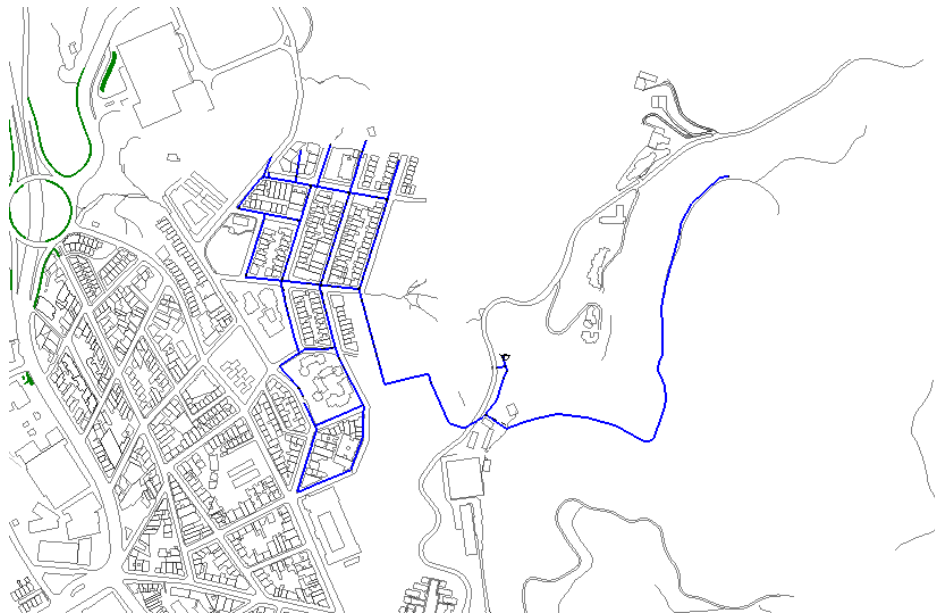


Figura 70. Representación gráfica del modelo hidráulico T23 salida de 8 en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

TANQUE ENEA III

El modelo se encuentra constituido por 149 tuberías, 128 nodos, 38 válvulas de cierre/apertura y 5 válvulas reguladoras, dentro del cual se tiene 6 series de presión y una medición de caudal.

En la Figura 71 se presenta el modelo del sector, donde se tiene la posibilidad de tener la composición topológica y espacial de los elementos constitutivos de la zona con la finalidad de validar los parámetros que permitan asimilar las cualidades de las redes instaladas en campo.

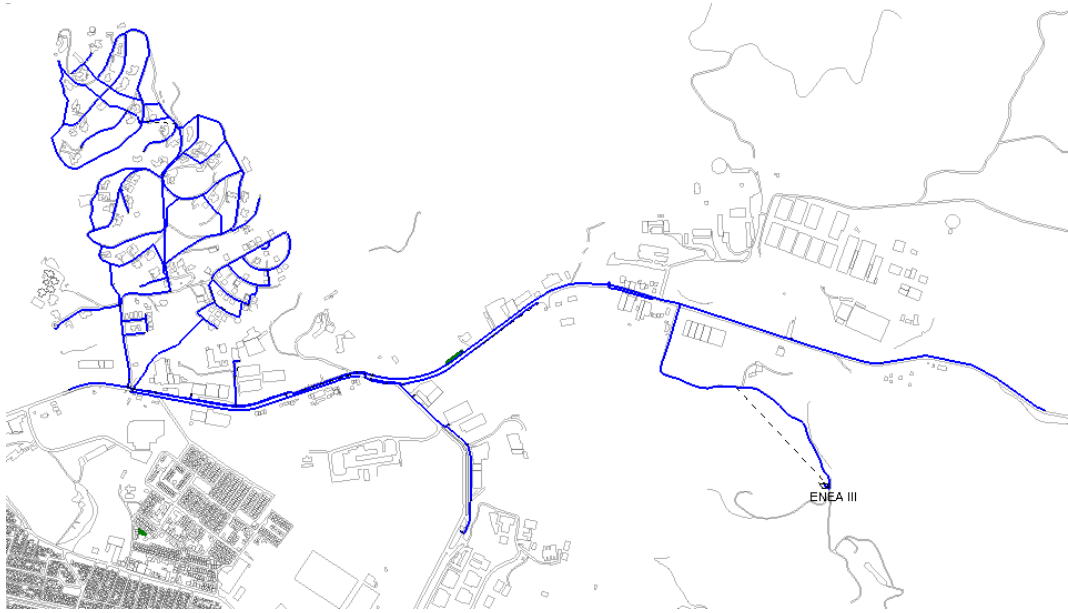


Figura 71. Representación gráfica del modelo hidráulico tanque Enea III en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

T33 ENEA I

El modelo se encuentra constituido por 643 tuberías, 531 nodos, 110 válvulas de cierre/apertura y 18 válvulas reguladoras, dentro del cual se tiene 18 series de presión y 2 mediciones de caudal.

En la Figura 72 se presenta el modelo del sector, donde se tiene la posibilidad de tener la composición topológica y espacial de los elementos constitutivos de la zona con la finalidad de validar los parámetros que permitan asimilar las cualidades de las redes instaladas en campo.

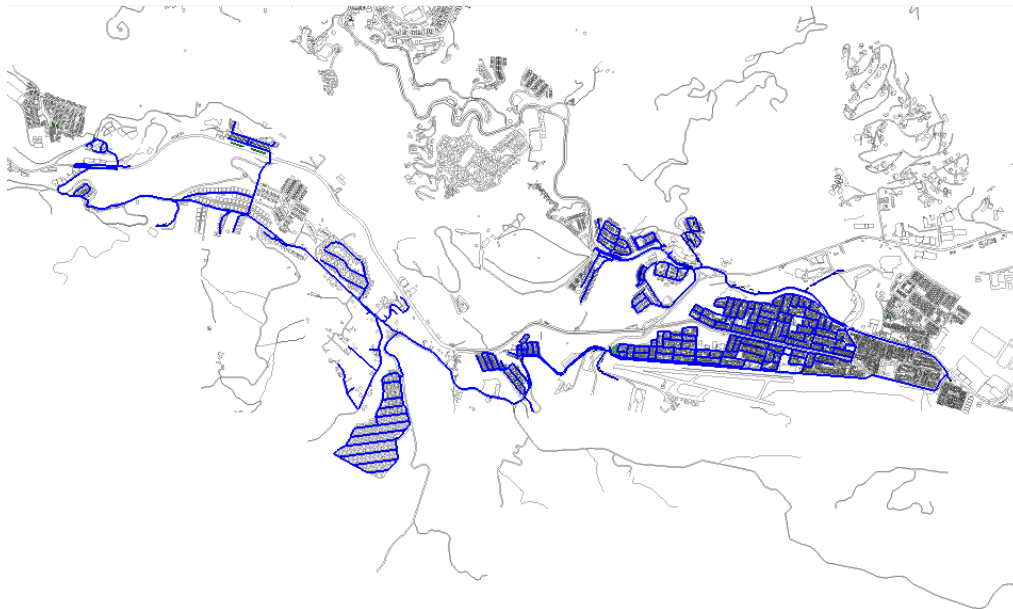


Figura 72. Representación gráfica del modelo hidráulico T33 Enea I en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

T34 ENEA II

El modelo se encuentra constituido por 344 tuberías, 284 nodos, 48 válvulas de cierre/apertura y una válvula reguladora, dentro del cual se tiene 10 series de presión y una medición de caudal.

En la Figura 73 se presenta el modelo del sector, donde se tiene la posibilidad de tener la composición topológica y espacial de los elementos constitutivos de la zona con la finalidad de validar los parámetros que permitan asimilar las cualidades de las redes instaladas en campo.

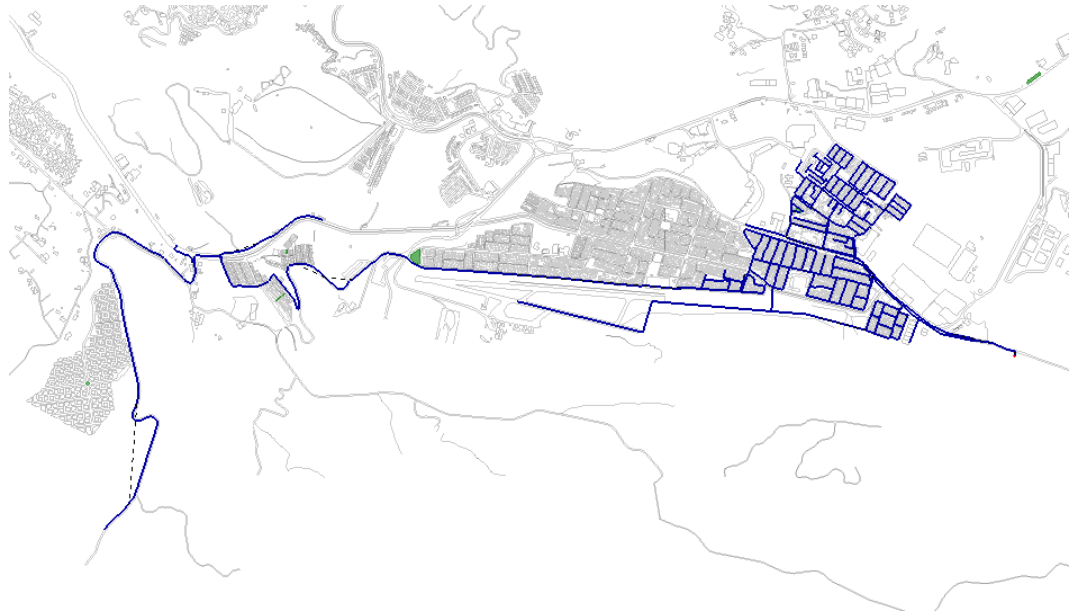


Figura 73. Representación gráfica del modelo hidráulico T34 Enea II en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

5.3.1 Análisis de sensibilidad de las variables

Con el fin de conocer el efecto generado en el comportamiento real de la red de distribución, por medio de la variación de las demandas desconocidas, emisores, diámetros, rugosidades y pérdidas menores. Primero se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros sobre el modelo T23B derivación 14HF, dado la particularidad de tener servicios residenciales, comerciales e industriales y que permite replicar los resultados a los demás sectores hidráulicos.

De acuerdo con las características topológicas de las redes se asigna un valor de demandas desconocidas del 20% adicionales con respecto a la demanda del escenario base (demanda comercial) distribuido homogéneamente en todos los nodos del sector (D-1). Dada la posibilidad de encontrar estas pérdidas en cualquier lugar, para conocer los cambios que sucede en el comportamiento se crean varios escenarios aumentando en rangos de 10% los escenarios D2, D3 y D4 presentes en la Figura 74, y en la Figura 75. También se realiza una variación con respecto a los emisores o fugas en la red evaluados de acuerdo con escenarios de menor variación con valores del 3%, 5% y 8% de la demanda comercial en los escenarios E-1, E-2 y E-3.

Como resultado de dichos escenarios se pudo determinar que el incremento gradual de las demandas desconocidas genera mayores caudales con respecto al comportamiento del escenario base. Mientras que en la presión se observa que en las horas de bajo consumo la variación es mínima en este factor, sobre todo a primeras horas de la mañana. En las horas de mayor demanda se presenta un descenso importante en la presión con respecto al escenario base. Por lo tanto se determina que entre mayor sean las demandas desconocidas mayores serán los caudales base y pico, y las presiones serán similares en consumos bajos, con descensos relevantes en horas de picos de consumo. El mismo comportamiento se observa con respecto a los emisores.

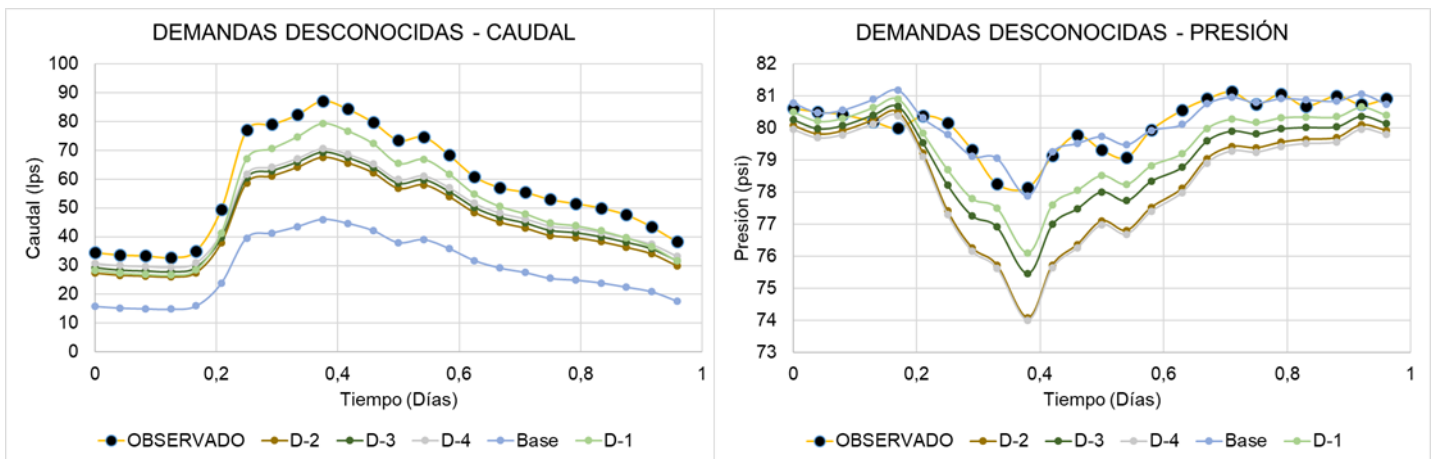


Figura 74. Análisis de sensibilidad del parámetro demandas desconocidas con respecto a la gráfica de caudal y presión en el circuito T23B derivación 14HF en el sector de Milán (Elaboración propia, 2017)

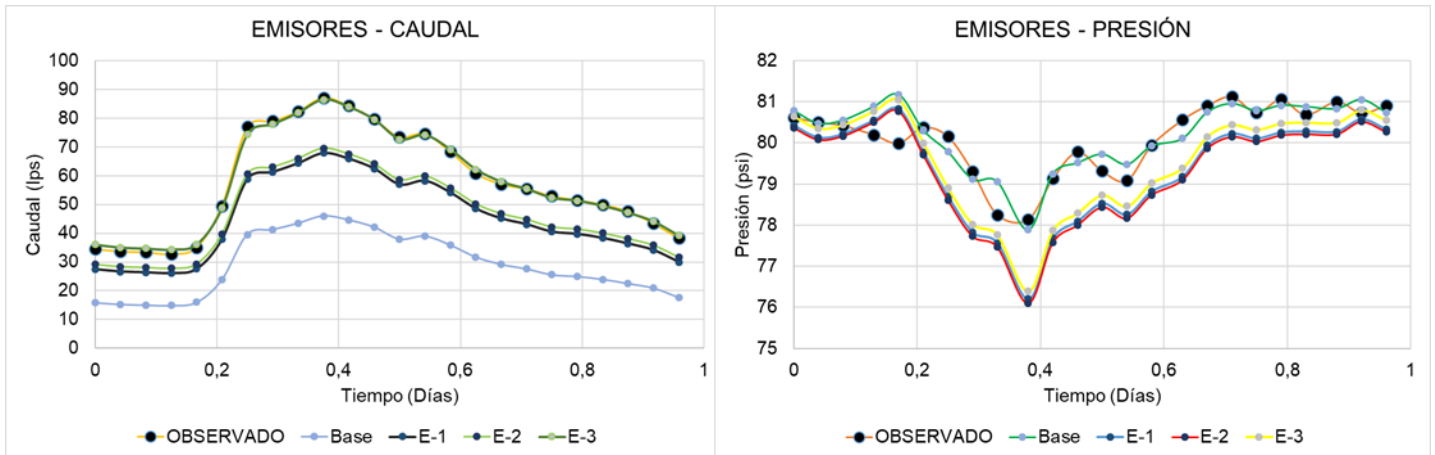


Figura 75. Análisis de sensibilidad del parámetro Emisores con respecto a la gráfica de caudal y presión en el circuito T23B derivación 14HF en el sector de Milán (Elaboración propia, 2017)

En consideración del parámetro diámetro se realiza una variación en función de reducir el diámetro actual, no se analiza la alternativa de aumentar los diámetros considerando que las redes existentes tienen una capacidad alta para el abastecimiento y demanda generada en la ciudad. Se crean cinco escenarios DIAM-1, DIAM-2, DIAM-3, DIAM-4 y DIAM-5, en los cuales se considera la reducción gradual de 5%, 10%, 15%, 20% y 25% respectivamente como se observa en la Figura 76. Con dichas variaciones se determina que la disminución de diámetros genera una reducción de caudales de forma constante y genera una reducción a gran escala de la presión en las horas de mayor demanda, dado que la reducción de la sección aumenta las velocidades en las redes y el efecto del esfuerzo cortante producido por la fricción generando un descenso en las presiones.

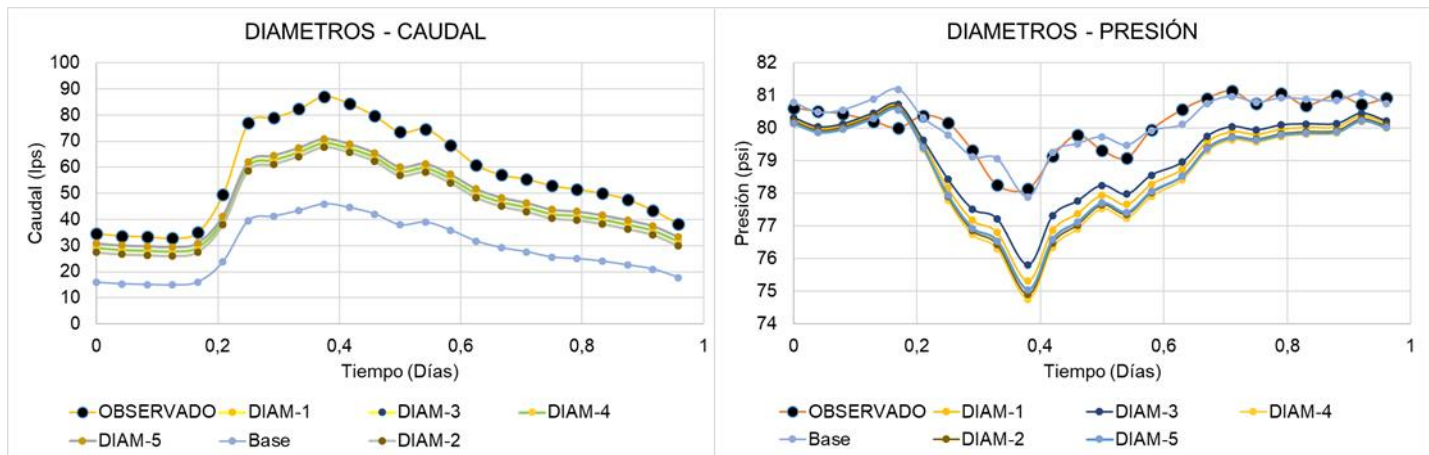


Figura 76. Análisis de sensibilidad del parámetro diámetros con respecto a la gráfica de caudal y presión en el circuito T23B derivación 14HF en el sector de Milán (Elaboración propia, 2017)

De manera que el aumento de las secciones causa el efecto contrario en el sistema estabilizando en mayor medida las presiones la variación de las pérdidas menores y la rugosidad se logran descensos en la presión; se determina que las mayores pérdidas son generadas en horas de máximo consumo.

El análisis realizado con el parámetro rugosidad se realizó incrementando el valor original, en consideración de que entre mayor sea el tiempo que lleva una red instalada, estará más alejado del valor inicial y será un elemento con una rugosidad mayor. Por tal motivo se presenta una comparación de cinco escenarios R-1, R-2, R-3, R-4 y R-5, en función de un rango de variación de 30%, 60%, 100%, 200% y 400% respectivamente en comparación con el valor inicial como se muestra en la Figura 77. En un acercamiento inicial se determina que la variación era mínima con rangos inferiores, es decir que en las horas de baja demanda las afectaciones son mínimas con cualquier valor de esta variables en comparación con el caudal y la presión, pero en horas de máximo consumo se presentan descensos importantes en las presiones según vaya aumentando el valor de la rugosidad.

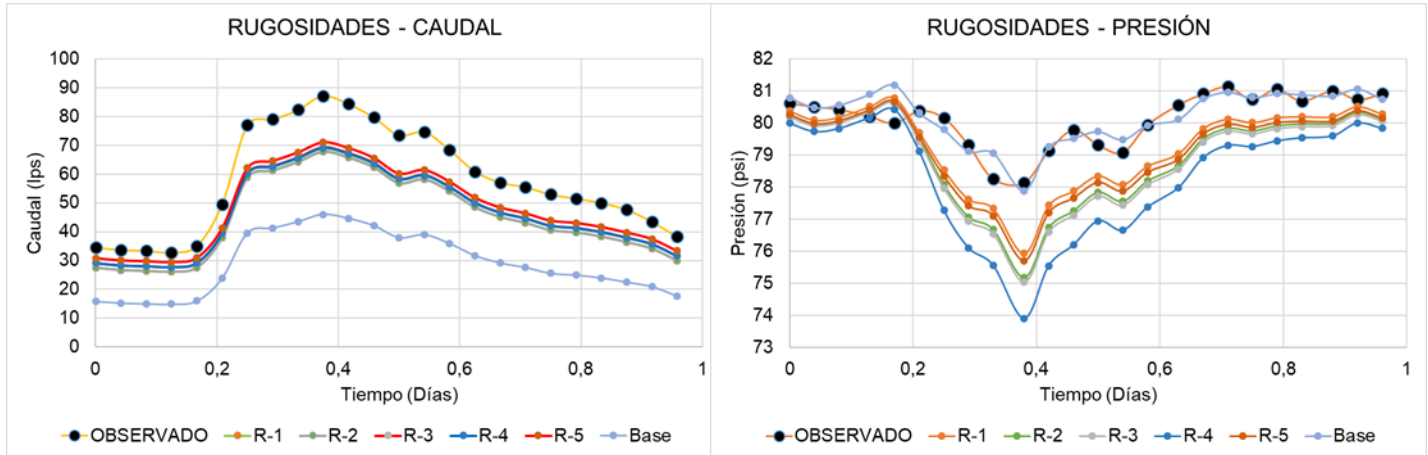


Figura 77. Análisis de sensibilidad del parámetro rugosidades con respecto a la gráfica de caudal y presión en el circuito T23B derivación 14HF en el sector de Milán (Elaboración propia, 2017)

Finalmente, el análisis de la variable pérdidas menores se realizó de manera análoga a la variable rugosidad, dado que entre mayor sea el tiempo de vida útil que llevan los elementos instalados y en operación del sistema el valor de este parámetro será mayor. En consecuencia, se realiza el análisis por medio de la creación de cinco escenarios P-1, P-2, P-3, P-4 y P-5, con un rango de variación del 15%, 30%, 45%, 60% y 80% respectivamente en comparación con el valor inicial como se muestra en la Figura 78. De acuerdo con los resultados obtenidos se determina que su afectación en las presiones y caudales es similar a lo generado por la rugosidad con un rango menor con respecto a su variación. Por lo anterior, el parámetro de pérdidas menores genera alta sensibilidad en el modelo y por tanto es una medida de ajuste importante para lograr una calibración adecuada.

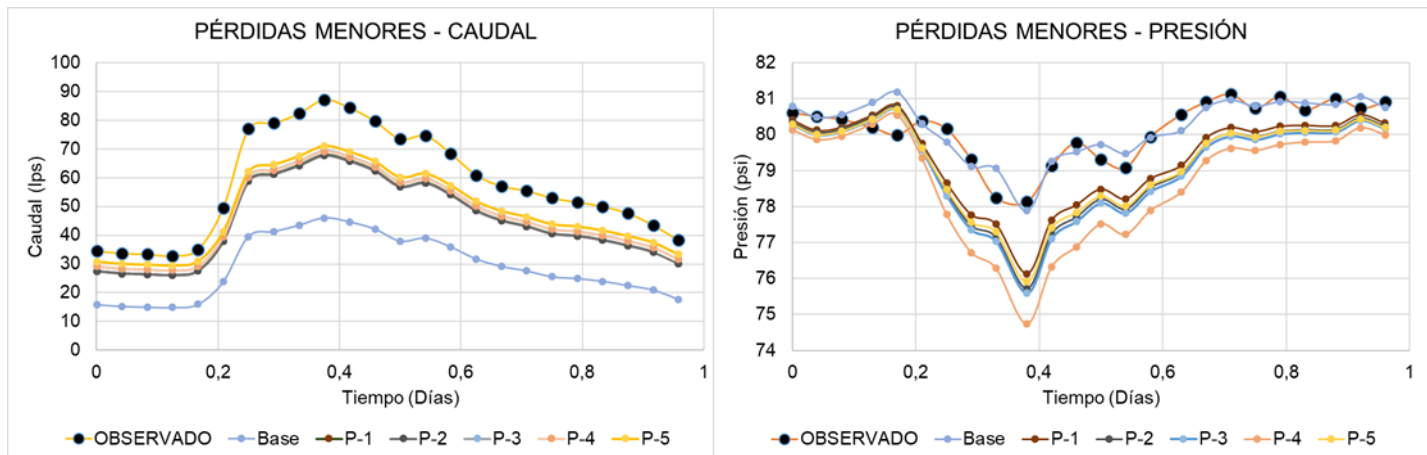


Figura 78. Análisis de sensibilidad del parámetro pérdidas menores con respecto a la gráfica de caudal y presión en el circuito T23B derivación 14HF en el sector de Milán (Elaboración propia, 2017)

En conclusión, se determina que las variaciones en los parámetros es una exploración compleja y requiere una demanda de tiempo importante. El ajuste de los parámetros pueden lograr un acercamiento al comportamiento real del sistema de distribución de agua potable, en lo cual es importante tener claridad que los valores definidos no necesariamente son los más adecuados y para lograr reducir la posibilidad de errores es indispensable que en el momento de la realización de la calibración y el ajuste de estas variables se cuente con un profesional responsable de la operación del acueducto, que permita una mayor definición de los rangos permisibles para cambiar los parámetros.

5.3.2 Calibración del modelo

De acuerdo con la metodología del CIACUA, explicada anteriormente se desarrolla el proceso de calibración del modelo empezando con la creación, ingreso de información, análisis de masas, análisis de energía, creación del modelo unificado y un posterior análisis general de las variables de calibración para generar el modelo calibrado, por lo anterior se presenta el proceso de calibración realizado para los diferentes sectores hidráulicos en un paso a paso.

Paso 1

Después de terminar la creación del modelo, el ingreso de la información de las pérdidas menores y asignación de los diámetros, se comienza la revisión de la existencia de un

tanque desde donde empieza el sistema. En la zona de estudio se presenta que en el circuito T23 salida de 12 Alta Suiza, su punto de origen es diferente a un tanque y es la derivación de una tubería matriz, por lo tanto, se requiere representar el comportamiento real del sistema por medio del ingreso de un gradiente hidráulico elaborado de acuerdo con tomas de presión en el punto de la derivación. En la Figura 79 se presenta la curva de gradiente hidráulico que modifica el comportamiento inicial del modelo, permitiendo tener un ajuste ideal y cercano a la realidad según la toma de presión realizada en el tramo inicial del circuito, en la cual se puede observar que los comportamientos son análogos.

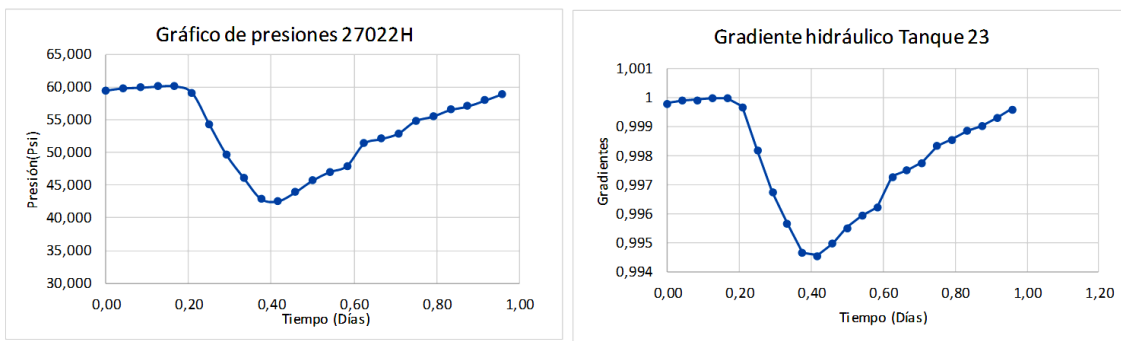


Figura 79. Gradiente hidráulico para reservorio elaborado de acuerdo con la curva de presión (Elaboración propia, 2017)

De acuerdo al procedimiento anterior se requiere el ajuste del comportamiento en las válvulas reguladoras, puesto que en el modelo la existencia de un elemento de estos genera una linealidad en el estado de las presiones aguas abajo y en realidad el comportamiento sufre variaciones a lo largo del tiempo. En la Figura 80 se presenta el comportamiento a lo largo del tiempo de una válvula reguladora, de acuerdo a la toma de presión aguas debajo de la misma.

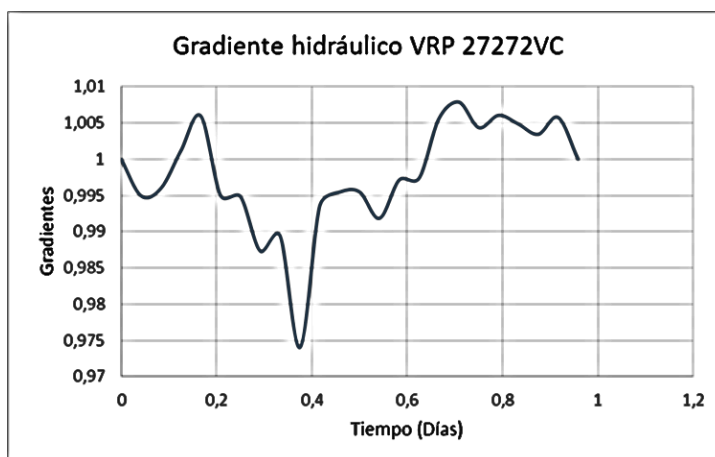


Figura 80. Gradiente hidráulico para válvula reguladora de presión (Elaboración propia, 2017)

Finalmente, es necesario validar las cotas de los tanques según las cotas de los nodos donde se realizó toma de presión, dado que se tiene la posibilidad de comparar en horas de baja demanda y máxima presión la similitud entre las diferencias de nivel, en algunos casos se requiere la variación de la cota del tanque en aproximadamente más o menos 5 metros, y en los nodos variaciones de cota de aproximadamente más o menos 2 metros.

Paso 2

Una vez completada la información inicial o base, se empieza con la creación de diferentes escenarios para el análisis de masas, por medio del conocimiento del agua no contabilizada o pérdidas existentes en el sistema, evaluada según la diferencia entre el caudal promedio del ciclo de facturación y el medido en campo, a continuación se presentan las pérdidas de cada modelo (Tabla 12), en las cuales adicionalmente se muestra la distribución que se realiza para la modelación en la partición de un porcentaje para demandas desconocidas y el restante para emisores o fugas en la red.

Tabla 12. Caudal de facturación y el medido en campo para determinar las pérdidas de cada modelo (Elaboración propia, 2017)

T23 SALIDA DE 8	Q Total	Comparación	PÉRDIDAS	T1 EL CABLE SALIDA DE 8	Q Total	Comparación	PÉRDIDAS
Caudal Campo	3,01	0,99	0,78%	Caudal Campo	10,11	1,12	-11,58%
Caudal Amerika	2,99			Caudal Amerika	11,28		
		DEMANDAS	0,50%			IANC	-15,00%
		FUGAS	0,28%			FUGAS	3,42%

T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA	Q Total	Comparación	PÉRDIDAS
Caudal Campo	6,59	0,89	11,48%
Caudal Amerika	5,83		
DEMANDAS			8,00%
FUGAS			3,48%

ENE A III	Q Total	Comparación	PÉRDIDAS
Caudal Campo	12,27	0,75	24,68%
Caudal Amerika	9,24		
DEMANDAS			20,00%
FUGAS			4,68%

ENE A II	Q Total	Comparación	PÉRDIDAS
Caudal Campo	13,08	0,87	13,41%
Caudal Amerika	11,33		
DEMANDAS			10,00%
FUGAS			3,41%

ENE A I	Caudal Campo	Caudal Amerika	Comparación	PÉRDIDAS	DEMANDAS	FUGAS
Florida	18,41	11,50	0,62	37,56%	30,00%	7,56%
San Marcel	17,28	12,90	0,75	25,32%	20,00%	5,32%
				DEMANDAS (P)	25,00%	6,44%

T23B DERIVACIÓN 14" HF	Caudal Campo	Caudal Amerika	Comparación	PÉRDIDAS	DEMANDAS	FUGAS
Conjuntos	5,46	4,61	0,84	15,50%	10,00%	5,50%
Milán	30,30	11,22	0,37	62,98%	55,00%	7,98%
Camelia	21,86	13,11	0,60	40,04%	35,00%	5,04%
				DEMANDAS (P)	33,33%	6,17%

En los valores de pérdidas de los sectores se puede determinar que en los pequeños se tienen menores pérdidas que los grandes, según la posibilidad de mayores puntos de fuga, errores de medición o fraudes; teniendo en cuenta que la facturación que se tiene en el "Amerika" es un promedio de 6 meses y las mediciones de caudal fueron tomadas en una duración máxima de una semana, se pueden presentar variaciones importantes en las mediciones de un periodo a otro, por lo anterior, se considera aceptable la presencia de pérdidas negativas existentes en el circuito T1 El cable salida de 8.

Paso 3.

En el modelo se ingresa las demandas desconocidas y posteriormente se realiza la creación de diversos escenarios variando el coeficiente emisor en cada nodo, llegando al nivel de considerar que la curva de masas se encuentra ajustada para avanzar a la línea

base 2, en la Tabla 13 se presenta el procedimiento que se realizó, en la cual se inicia con un escenario de base 1, al cual se le afecta por un factor de demandas desconocidas, seguido esto, al escenario determinado se le afecta por cinco diversos emisores.

Tabla 13. Procedimiento para la determinación de la línea base 2 (Elaboración propia, 2017)

Escenario	Factor
Base 1	Demandas
Demandas	E1
	E2
	E3
	E4
	E5

En la Tabla 14 se presenta los resultados obtenidos después de realizar el análisis de los coeficientes emisores, para emprender el análisis de la energía, del anterior proceso se seleccionan tres escenarios de los cinco elaborados, para reducir el espacio muestral y sin limitar la posibilidad de un mayor ajuste en la curva de masas con presencia de varias alternativas.

Tabla 14. Resultados obtenidos después de realizar el análisis de masas (Elaboración propia, 2017)

CIRCUITO HIDRÁULICO	EMISORES					VARIACIÓN CAUDAL				
	E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5
T23 SALIDA DE 8	4,E-04	2,E-04	2,E-05	1,E-04	5,E-05	-14,1%	-21,5%	0,2%	-23,2%	-25,0%
T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA	1,E-04	4,E-04	2,E-04	3,E-04	5,E-05	2,3%	8,5%	4,5%	6,5%	1,2%
ENE A II	4,E-04	1,E-04	2,E-04	3,E-04	2,E-03	8,8%	2,4%	4,7%	6,8%	30,0%
T1 EL CABLE SALIDA DE 8	4,E-04	1,E-04	2,E-04	3,E-04	5,E-05	12,0%	3,5%	6,7%	9,5%	1,8%
ENE A III	4,E-04	2,E-04	3,E-04	5,E-04	6,E-04	4,2%	2,1%	3,2%	5,2%	6,1%
ENE A I	4,E-04	8,E-04	1,E-03	7,E-04	5,E-04	5,4%	10,2%	12,4%	7,9%	6,7%
T23B DERIVACIÓN 14" HF	1,E-03	2,E-03	2,E-03	3,E-03	3,E-03	-20,1%	-14,6%	-9,6%	-5,1%	14,3%

Los escenarios seleccionados fueron los resaltados en verde, los resaltados en amarillo se descartaron, ya que no cumplían con los criterios de cercanía al valor deseado, así mismo se observa que el valor del coeficiente emisor depende directamente del tamaño de la zona o en consecuencia del caudal demandado, por lo tanto, entre más grande es la demanda mayor será el coeficiente emisor.

Paso 4.

Posteriormente, se realiza la creación de escenarios dependientes de los tres valores de emisores seleccionados, inicialmente se generan tres escenarios relacionados a las pérdidas menores para cada emisor denominados (P100, P200 y P400) y a su vez de cada escenario de estos se crean tres escenarios finales con las rugosidades de las tuberías (R100, R300 y R500), en la Tabla 15 se presenta el procedimiento realizado para la creación de los escenarios, en la cual se observa un análisis final de 40 posibles soluciones para calibrar el modelo hidráulico y generar el denominado “modelo unificado”.

Tabla 15. Procedimiento para la determinación del “modelo unificado” (Elaboración propia, 2017)

Escenario	Factor (n)	Factor (p)		
Base 2	E1	P100	P200	P400
	Factor (r)	R100	R101	R102
		R300	R301	R302
		R500	R501	R502
	E2	P101	P201	P401
	Factor (r)	R103	R104	R105
		R303	R304	R305
		R503	R504	R505
	E3	P102	P202	P402
	Factor (r)	R106	R107	R108
		R306	R307	R308
		R506	R507	R508

De acuerdo al análisis de sensibilidad, la confiabilidad de la información existente y la experiencia profesional del personal técnico de la empresa de servicios públicos con temas

relacionados con periodos de instalación, deterioro y fallas de los diferentes materiales, se determinaron los factores que se utilizan para calibrar, por lo anterior, fue considerado que la variación del material asbesto cemento tiene una relación 2 a 1 en comparación con el PVC y Polietileno y que las tuberías elaboradas en materiales de hierro tienen una relación 4 a 1 en comparación a los materiales plásticos, finalmente, se decide no realizar una calibración de diámetros por la variación que genera y en consideración de la correcta información que se dispone; en la Tabla 16 se presenta la metodología utilizada para la generación de los escenarios para la calibración de la energía, según las pérdidas menores y rugosidades.

Tabla 16. Metodología para la creación de los escenarios de la línea base 2 (Elaboración propia, 2017)

Pérdidas Menores		P100	P200	P400
Materiales	PE - PVC	1	2	4
	AC	2	4	8
	HIERROS	4	8	16
Rugosidades		R100	R300	R500
Materiales	PE - PVC	1	3	5
	AC	2	6	10
	HIERROS	4	12	20

Paso 5.

Mediante la presentación de la Figura 81 y Figura 82 se puede observar las variaciones que se presentan entre los diversos escenarios creados dado los amplios rangos usados para la iteración de escenarios, puesto que el análisis por medio de gráficas es demasiado complejo, se procede a usar una metodología que permita comparar numéricamente los resultados, por consiguiente, se determina el uso del error medio cuadrático para cumplir esta labor y establecer la similitud de las variables.

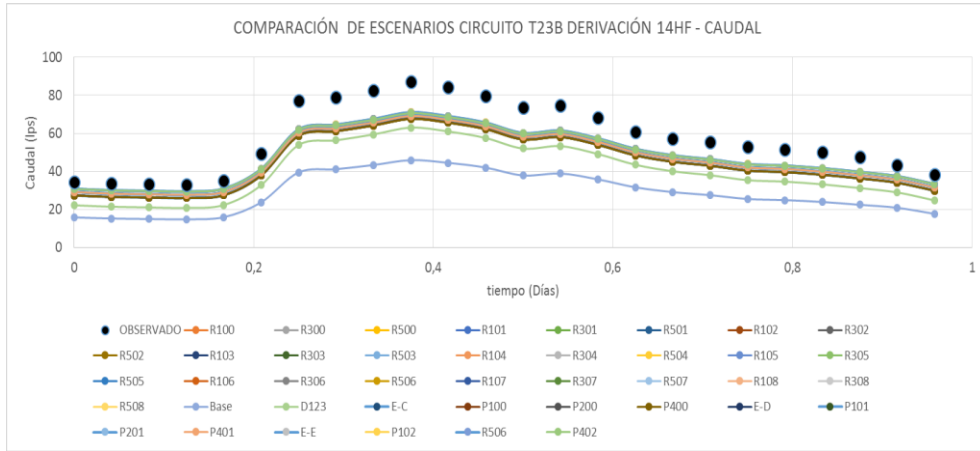


Figura 81. Comparación de escenarios creados para la determinación del “modelo unificado” en la curva de caudal (Elaboración propia, 2017)

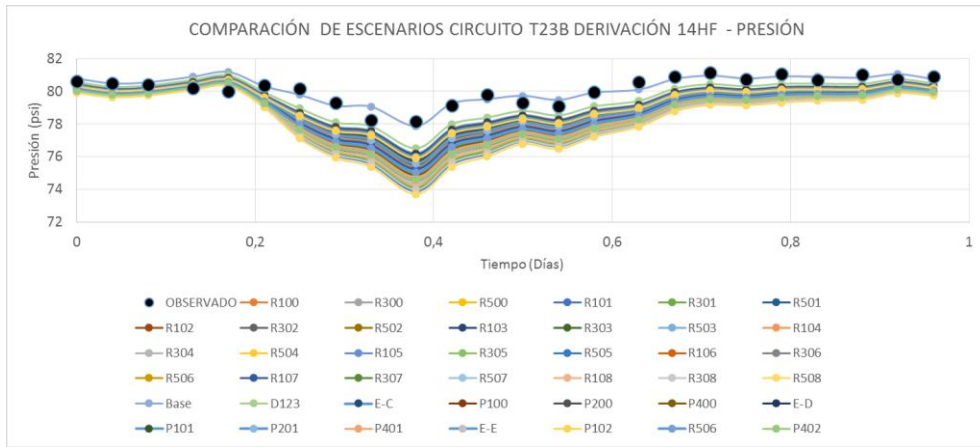


Figura 82. Comparación de escenarios creados para la determinación del “modelo unificado” en la curva de presión (Elaboración propia, 2017)

Para la determinación del escenario considerado “modelo unificado”, se realiza un análisis por medio del cálculo del error medio cuadrático $ECM = \sum(X_{med} - X_{obs})^2$, considerado como un estimador, puesto que permite conocer la diferencia entre el valor medido y el modelado, finalmente no tiene un criterio claro de aceptabilidad, pero permite la comparación de la información obtenida y evaluar la similitud de los resultados obtenidos.

En la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos del cálculo del error medio cuadrático para cada sector hidráulico de los escenarios estudiados, de los cuales se resaltan en amarillo los escenarios seleccionados con mayor similitud a lo obtenido en campo y considerados como el “modelo unificado” de cada modelo hidráulico.

Tabla 17. Resultados obtenidos del cálculo del error medio cuadrático para cada sector hidráulico (Elaboración propia, 2017)

ECM	D085	E10	P100	R100	R300	R500	P200	R101	R301	R501
Caudal	3,0	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Presión	2059,1	2027,1	1914,6	1888,9	1804,3	1739,8	1619,9	1597,7	1525,1	1470,2
ECM Total	2062,0	2028,4	1915,9	1890,2	1805,6	1741,1	1621,2	1599,0	1526,4	1471,5
P400	R102	R302	R502	E20	P101	R103	R303	R503	P201	R104
1,3	1,3	1,3	1,3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
1166,0	1150,8	1102,3	1066,2	1995,1	1881,9	1856,0	1770,8	1705,9	1586,7	1564,5
1167,3	1152,1	1103,6	1067,5	1996,0	1882,8	1856,8	1771,6	1706,8	1587,6	1565,4
R304	R504	P401	R105	R305	R505	E05	P102	R106	R306	R506
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
1491,8	1436,9	1137,5	1122,6	1075,0	1039,9	2043,2	1931,1	1905,5	1821,2	1756,9
1492,7	1437,8	1138,4	1123,5	1075,9	1040,8	2045,2	1933,1	1907,5	1823,2	1758,9
P202	R107	R307	R507	P402	R108	R308	R508	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS CIRCUITO EL CABLE SALIDA DE 8		
2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0			
1636,7	1614,6	1542,1	1487,0	1180,6	1165,4	1116,4	1079,9			
1638,7	1616,6	1544,1	1489,0	1182,6	1167,4	1118,4	1081,9			

ECM	D123	E-C	P100	R100	R300	R500	P200	R101	R301	R501
Caudal	7926,4	4267,8	4280,5	4284,7	4292,1	4297,8	4304,9	4309,0	4316,7	4322,3
Presión	9181,5	15496,1	18719,7	19727,5	22187,9	24252,8	28955,5	30340,7	33605,5	36285,9
ECM Total	17107,9	19763,8	23000,2	24012,2	26480,0	28550,6	33260,3	34649,7	37922,2	40608,2
P400	R102	R302	R502	E-D	P101	R103	R303	R503	P201	R104
4354,7	4359,3	4367,2	4372,9	3325,1	3340,2	3346,4	3354,9	3363,3	3372,2	3377,4
58408,2	60521,5	65332,2	69192,2	18545,6	22405,4	23602,7	26529,2	28974,2	34484,9	36097,3
62763,0	64880,7	69699,4	73565,1	21870,7	25745,6	26949,0	29884,1	32337,5	37857,1	39474,7
R304	R504	P401	R105	R305	R505	E-E	P102	R106	R306	R506
3387,1	3394,6	3434,7	3441,0	3451,1	3458,9	2520,1	2538,8	2544,9	2556,3	2564,6
39907,4	43026,4	68412,8	70813,9	76294,9	80685,1	22098,8	26651,7	28055,5	31491,7	34351,7
43294,5	46421,0	71847,6	74254,9	79746,0	84144,0	24618,9	29190,4	30600,4	34048,0	36916,2
P202	R107	R307	R507	P402	R108	R308	R508	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS CIRCUITO T23B DERIVACIÓN 14HF		
2574,9	2581,1	2592,5	2601,2	2649,2	2655,7	2667,6	2676,6			
40728,3	42585,6	46985,9	50577,7	79417,6	82125,6	88314,7	93263,0			
43303,2	45166,7	49578,4	53178,9	82066,8	84781,3	90982,3	95939,6			

ECM	D108	E10	P100	R100	R300	R500	P200	R101	R301	R501
Caudal	1,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
Presión	11159,2	11051,8	10900,7	10792,7	10409,8	10115,7	10092,1	9997,1	9667,1	9416,3
ECM Total	11161,1	11052,8	10901,7	10793,8	10410,9	10116,8	10093,1	9998,2	9668,1	9417,4
P400	R102	R302	R502	E20	P101	R103	R303	R503	P201	R104
1,1	1,1	1,1	1,1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
8983,1	8914,1	8689,5	8525,3	10946,0	10794,7	10686,2	10302,7	10009,1	9994,9	9900,0
8984,1	8915,1	8690,5	8526,3	10946,6	10795,3	10686,8	10303,3	10009,7	9995,5	9900,6

R304	R504	P401	R105	R305	R505	E30	P102	R106	R306	R506
0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
9571,5	9322,6	8921,1	8853,1	8633,6	8474,3	10842,1	10690,5	10581,7	10198,1	9905,1
9572,1	9323,2	8921,7	8853,7	8634,2	8474,9	10842,6	10691,0	10582,2	10198,6	9905,6
P202	R107	R307	R507	P402	R108	R308	R508	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS CIRCUITO T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA		
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5			
9901,0	9806,0	9479,2	9232,6	8864,1	8797,0	8583,1	8429,0			
9901,5	9806,5	9479,7	9233,1	8864,6	8797,5	8583,6	8429,6			

ECM	D085	E15	P100	R100	R300	R500	P200	R101	R301	R501
Caudal	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Presión	847,3	848,3	849,3	849,5	850,3	851,1	854,5	854,8	855,8	856,8
ECM Total	847,5	848,3	849,3	849,5	850,4	851,2	854,6	854,9	855,9	856,8
P400	R102	R302	R502	E20	P101	R103	R303	R503	P201	R104
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
868,0	868,4	869,7	871,0	848,6	849,6	849,8	850,7	851,5	855,0	855,3
868,1	868,4	869,8	871,0	848,7	849,6	849,8	850,8	851,6	855,1	855,3
R304	R504	P401	R105	R305	R505	E10	P102	R106	R306	R506
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
856,4	857,3	868,7	869,1	870,5	871,8	847,9	848,9	849,1	850,0	850,7
856,4	857,3	868,8	869,2	870,6	871,8	848,0	849,0	849,2	850,0	850,8
P202	R107	R307	R507	P402	R108	R308	R508	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS CIRCUITO T23 SALIDA DE 8		
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1			
854,1	854,3	855,3	856,3	867,2	867,5	869,0	870,1			
854,2	854,4	855,4	856,4	867,3	867,6	869,0	870,2			

ECM	D120	E40	P100	R100	R300	R500	P200	R101	R301	R501
Caudal	12,9	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Presión	63,7	78,7	79,4	80,6	84,0	87,0	127,3	129,0	134,3	139,0
ECM Total	76,6	81,1	81,7	82,9	86,3	89,4	129,6	131,4	136,6	141,3
P400	R102	R302	R502	E30	P101	R103	R303	R503	P201	R104
2,4	2,4	2,4	2,4	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
290,0	292,9	301,9	309,7	74,6	75,2	76,2	79,4	82,2	119,8	121,5
292,4	295,3	304,2	312,1	78,6	79,2	80,3	83,5	86,3	123,9	125,5
R304	R504	P401	R105	R305	R505	E50	P102	R106	R306	R506
4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
126,4	130,8	273,9	276,7	285,2	292,6	83,2	83,9	85,2	88,9	92,2
130,5	134,9	278,0	280,8	289,3	296,7	84,4	85,1	86,4	90,1	93,4
P202	R107	R307	R507	P402	R108	R308	R508	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS CIRCUITO ENEA III		
1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2			
135,2	137,0	142,6	147,6	306,7	309,8	319,2	327,4			
136,4	138,2	143,8	148,8	307,9	311,0	320,4	328,7			

ECM	D125	E40	P100	R100	R300	R500	P200	R101	R301	R501
Caudal	265,1	155,9	155,8	155,8	155,9	155,9	155,9	156,0	156,0	156,0
Presión	8846,9	8169,2	8141,0	8128,6	7974,5	7834,5	7224,8	7220,4	7112,8	7015,0
ECM Total	9112,0	8325,0	8296,8	8284,5	8130,3	7990,3	7380,7	7376,4	7268,8	7171,0
P400	R102	R302	R502	E50	P101	R103	R303	R503	P201	R104
156,2	156,2	156,2	156,2	138,1	138,1	138,1	138,1	138,1	138,2	138,2
6988,9	7000,5	6985,2	6970,7	8011,3	7983,9	7971,8	7820,0	7682,5	7107,9	7104,2
7145,1	7156,7	7141,4	7127,0	8149,4	8122,0	8109,9	7958,2	7820,6	7246,2	7242,4
R304	R504	P401	R105	R305	R505	E60	P102	R106	R306	R506
138,2	138,2	138,4	138,4	138,5	138,5	124,2	124,2	124,2	124,2	124,2
7000,4	6906,0	6996,1	7008,9	6999,9	6991,1	7858,5	7831,7	7820,2	7670,9	7535,7
7138,7	7044,2	7134,6	7147,3	7138,4	7129,6	7982,7	7955,9	7944,4	7795,1	7659,9
P202	R107	R307	R507	P402	R108	R308	R508	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS CIRCUITO ENEA I		
124,3	124,3	124,3	124,3	124,4	124,4	124,5	124,4			
6998,1	6995,0	6894,9	6804,3	7014,7	7028,5	7026,2	7023,4			
7122,3	7119,3	7019,2	6928,6	7139,1	7153,0	7150,6	7147,9			

ECM	D110	E10	P100	R100	R300	R500	P200	R101	R301	R501
Caudal	7,3	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Presión	1267,5	1254,4	1242,7	1232,1	1214,8	1203,2	1181,0	1174,4	1169,8	1169,1
ECM Total	1274,8	1257,9	1246,2	1235,6	1218,2	1206,6	1184,5	1177,9	1173,3	1172,6
P400	R102	R302	R502	E50	P101	R103	R303	R503	P201	R104
3,5	3,5	3,5	3,5	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
1344,4	1345,3	1365,9	1386,8	1246,8	1235,7	1225,6	1210,7	1201,5	1196,3	1190,3
1347,9	1348,8	1369,4	1390,3	1248,4	1237,4	1227,2	1212,4	1203,1	1197,9	1191,9
R304	R504	P401	R105	R305	R505	E60	P102	R106	R306	R506
1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
1188,9	1191,0	1417,0	1419,1	1444,0	1468,5	1244,7	1234,3	1224,8	1212,6	1205,7
1190,5	1192,6	1418,7	1420,8	1445,7	1470,2	1246,5	1236,2	1226,7	1214,5	1207,6
P202	R107	R307	R507	P402	R108	R308	R508	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS CIRCUITO TANQUE ENEA II		
1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9			
1218,5	1213,3	1215,1	1220,1	1499,9	1503,0	1532,4	1561,0			
1220,3	1215,2	1217,0	1222,0	1501,8	1504,8	1534,3	1562,9			

Paso 6.

De acuerdo a los resultados obtenidos y su posterior consecución del “modelo unificado” se prosigue a realizar el análisis final, según el conocimiento del personal técnico de la empresa y la validación de la información obtenida en campo, considerado que algunas diferencias entre lo observado y lo medido son amplias, por consiguiente es necesario la evaluación de realizar nuevamente tomas de presión, la revisión en campo de la presión inicial de las reductoras, validación del estado de las válvulas de cierre/ aperturas para así lograr llegar al final del proceso de calibración y obtener el denominado “modelo calibrado”.

A su vez, por medio nuevamente del cálculo del error medio cuadrático, se permite analizar y comparar la similitud de los resultados obtenidos hasta llegar al “modelo unificado” y las mejoras representativas cuando se realizan los ajustes finales, en la Tabla 18 se puede observar las reducciones del error medio cuadrático en su último análisis.

Tabla 18. Comparación y reducciones del error medio cuadrático entre el “modelo unificado” y el modelo calibrado (Elaboración propia, 2017)

CIRCUITO EL CABLE SALIDA DE 8				CIRCUITO T23B DERIVACIÓN 14HF			
ECM	Modelo Unificado	Modelo Calibrado	Reducción ECM	ECM	Modelo Unificado	Modelo Calibrado	Reducción ECM
Caudal	0,90	0,90	83,3%	Caudal	2520,08	42,89	97,8%
Presión	1039,87	172,68		Presión	22098,85	491,40	
ECM Total	1040,77	173,59		ECM Total	24618,93	534,29	
CIRCUITO T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA				CIRCUITO T23 SALIDA DE 8			
ECM	Modelo Unificado	Modelo Calibrado	Reducción ECM	ECM	Modelo Unificado	Modelo Calibrado	Reducción ECM
Caudal	0,51	0,52	94,5%	Caudal	0,06	0,00	82,6%
Presión	8429,05	461,03		Presión	848,63	147,62	
ECM Total	8429,56	461,55		ECM Total	848,69	147,62	
CIRCUITO ENEA III				CIRCUITO ENEA I			
ECM	Modelo Unificado	Modelo Calibrado	Reducción ECM	ECM	Modelo Unificado	Modelo Calibrado	Reducción ECM
Caudal	1,19	1,18	70,4%	Caudal	124,30	25,05	91,9%
Presión	83,22	23,82		Presión	6804,31	537,17	
ECM Total	84,41	25,00		ECM Total	6928,61	562,22	
CIRCUITO ENEA II							
ECM	Modelo Unificado	Modelo Calibrado	Reducción ECM				
Caudal	3,48	3,50	57,8%				
Presión	1169,13	490,94					
ECM Total	1172,60	494,44					

En representación de los resultados del proceso de calibración se exhiben las gráficas de comportamiento de caudal y presión entre la Figura 83 y la Figura 90, de los elementos que fueron medidos en campo, y en los cuales se puede observar la adecuada similitud entre los datos medidos en campo y los datos resultantes de la modelación hidráulica posteriormente calibrada y validada.

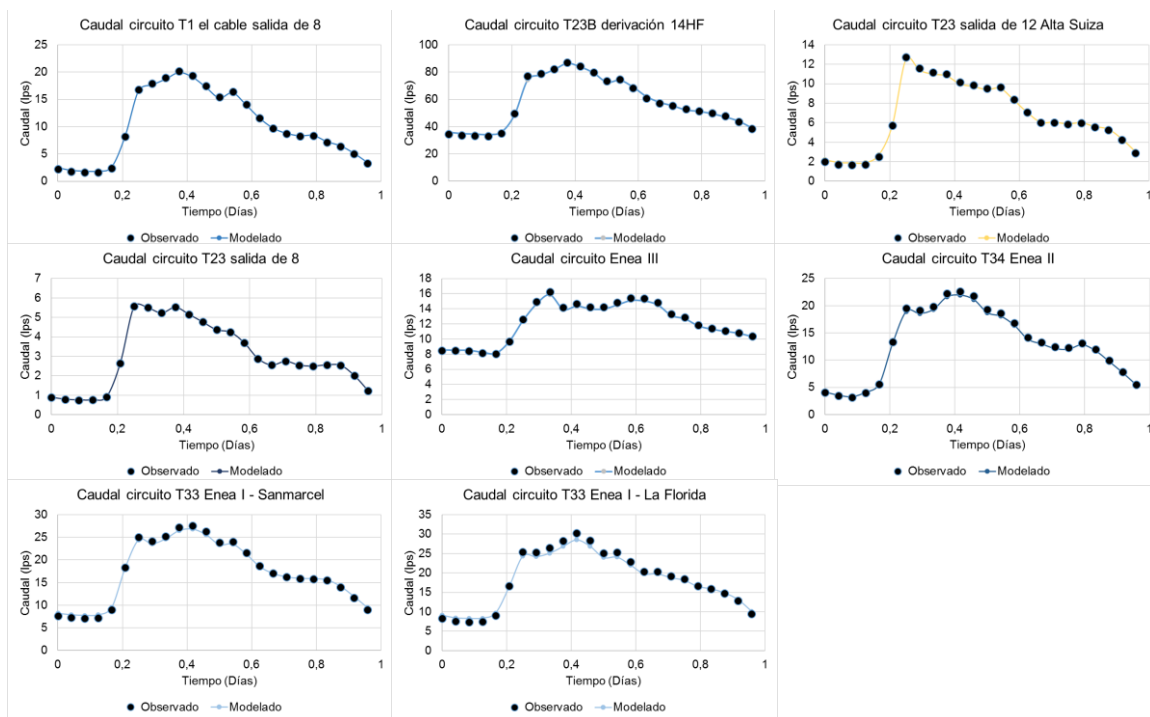


Figura 83. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la masa de la zona de estudio (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

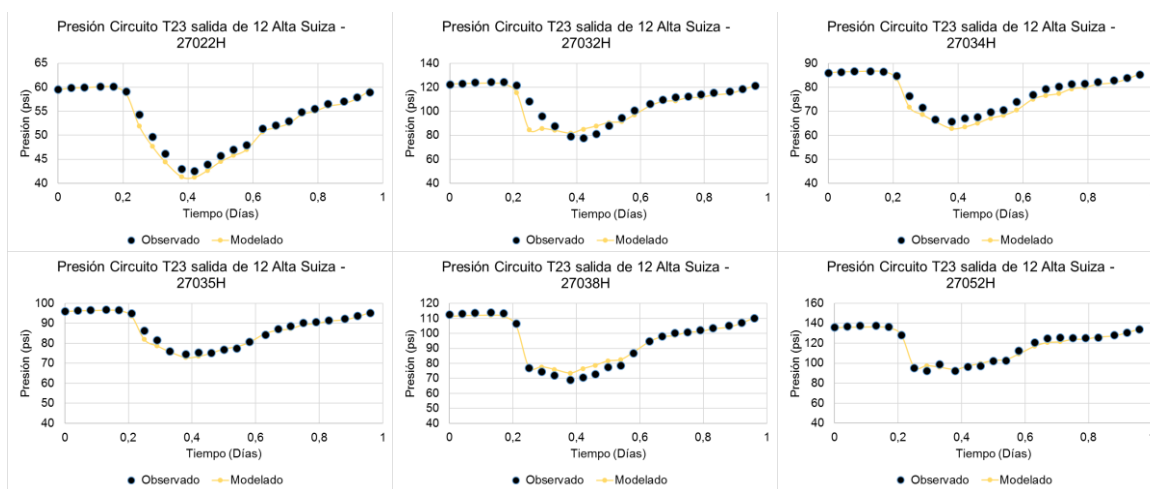


Figura 84. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía - T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

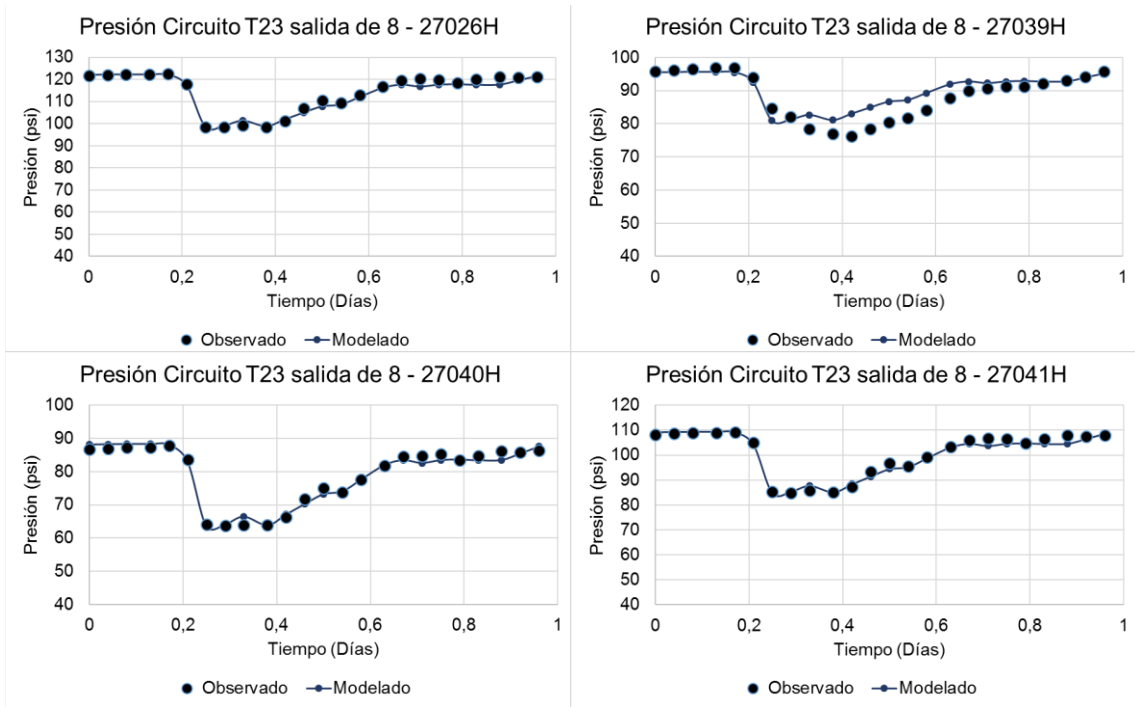


Figura 85. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía - T23 salida de 8 (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

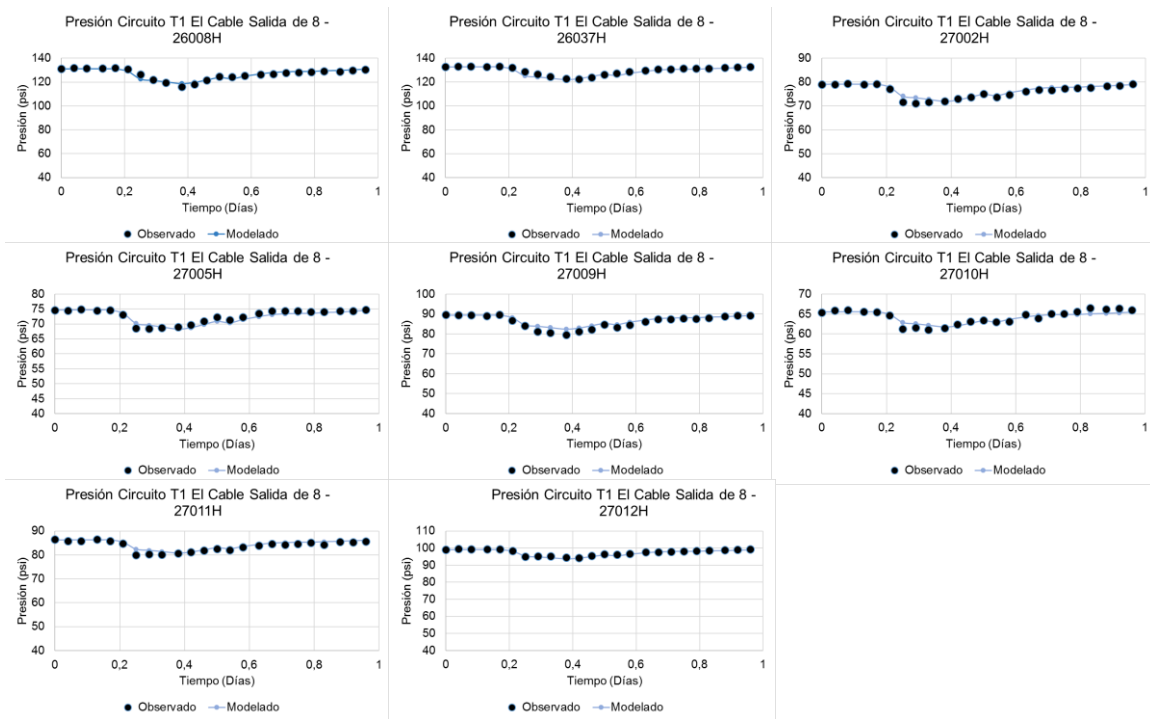


Figura 86. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía – T1 El cable salida de 8 (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

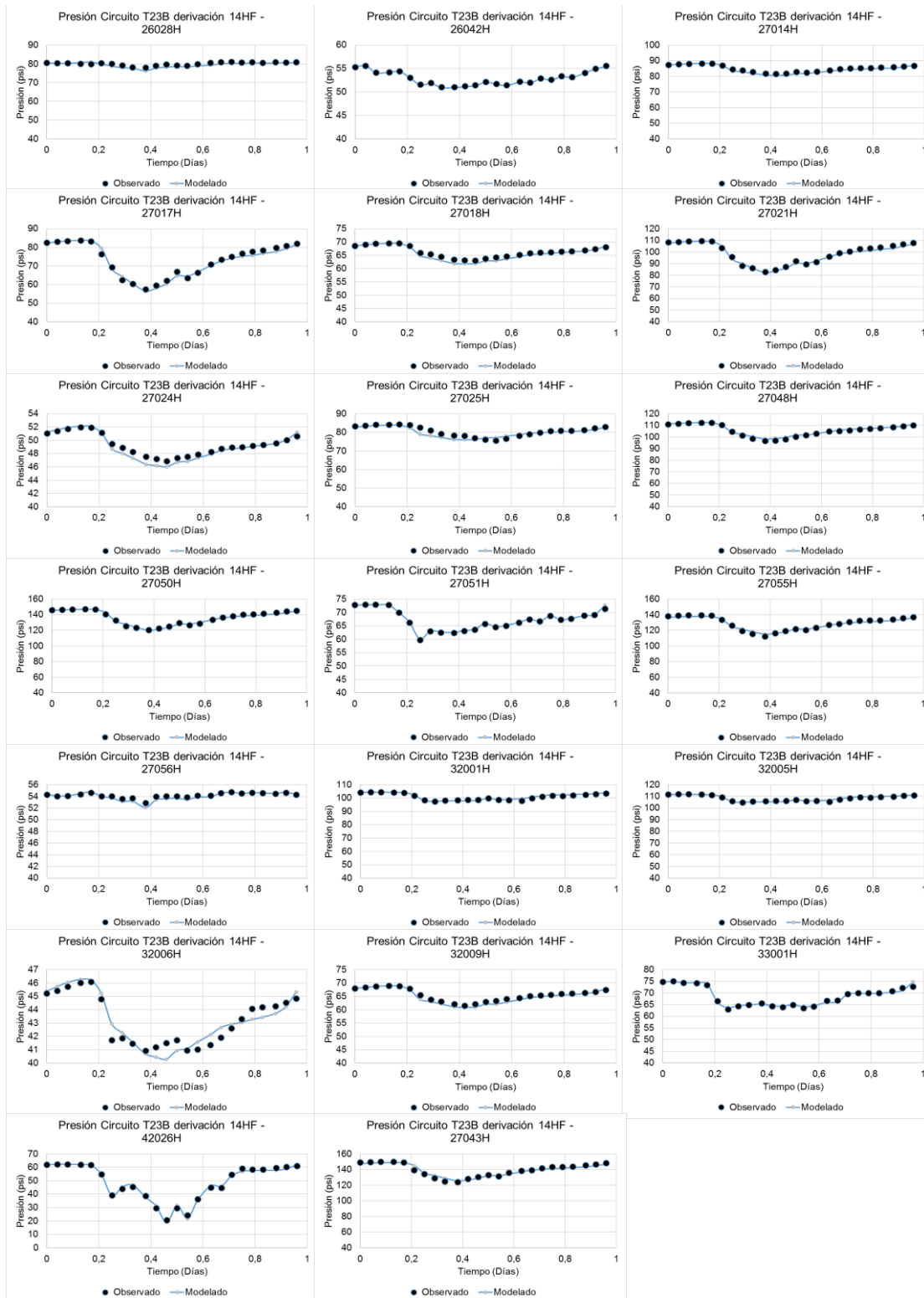


Figura 87. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía - T23B derivación 14HF (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

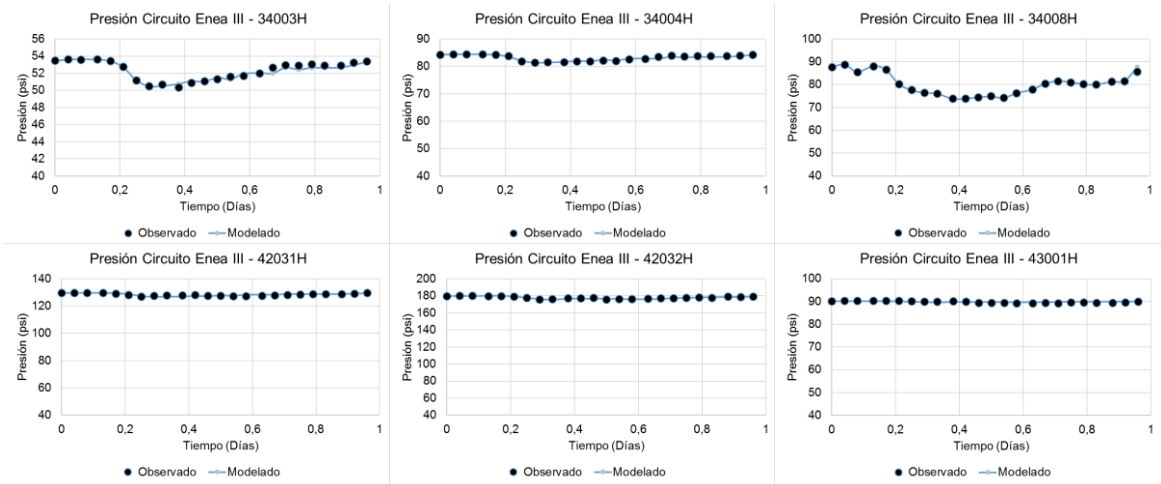


Figura 88. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía – Enea III (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

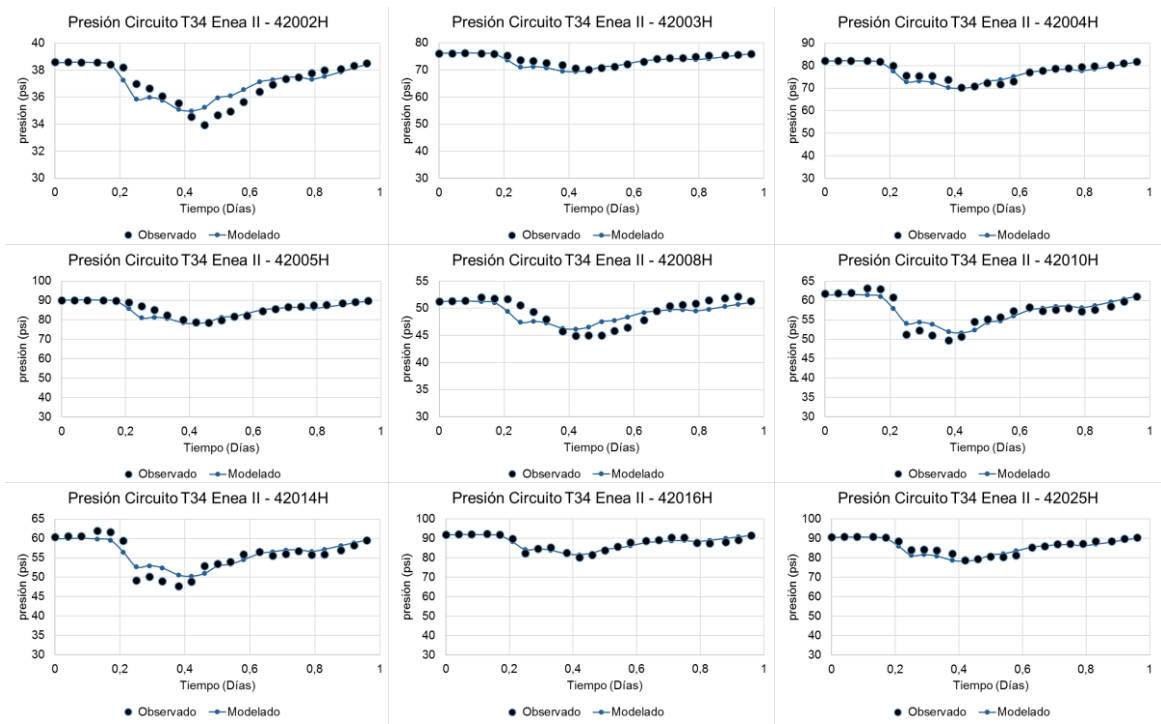


Figura 89. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía – T34 Enea II (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

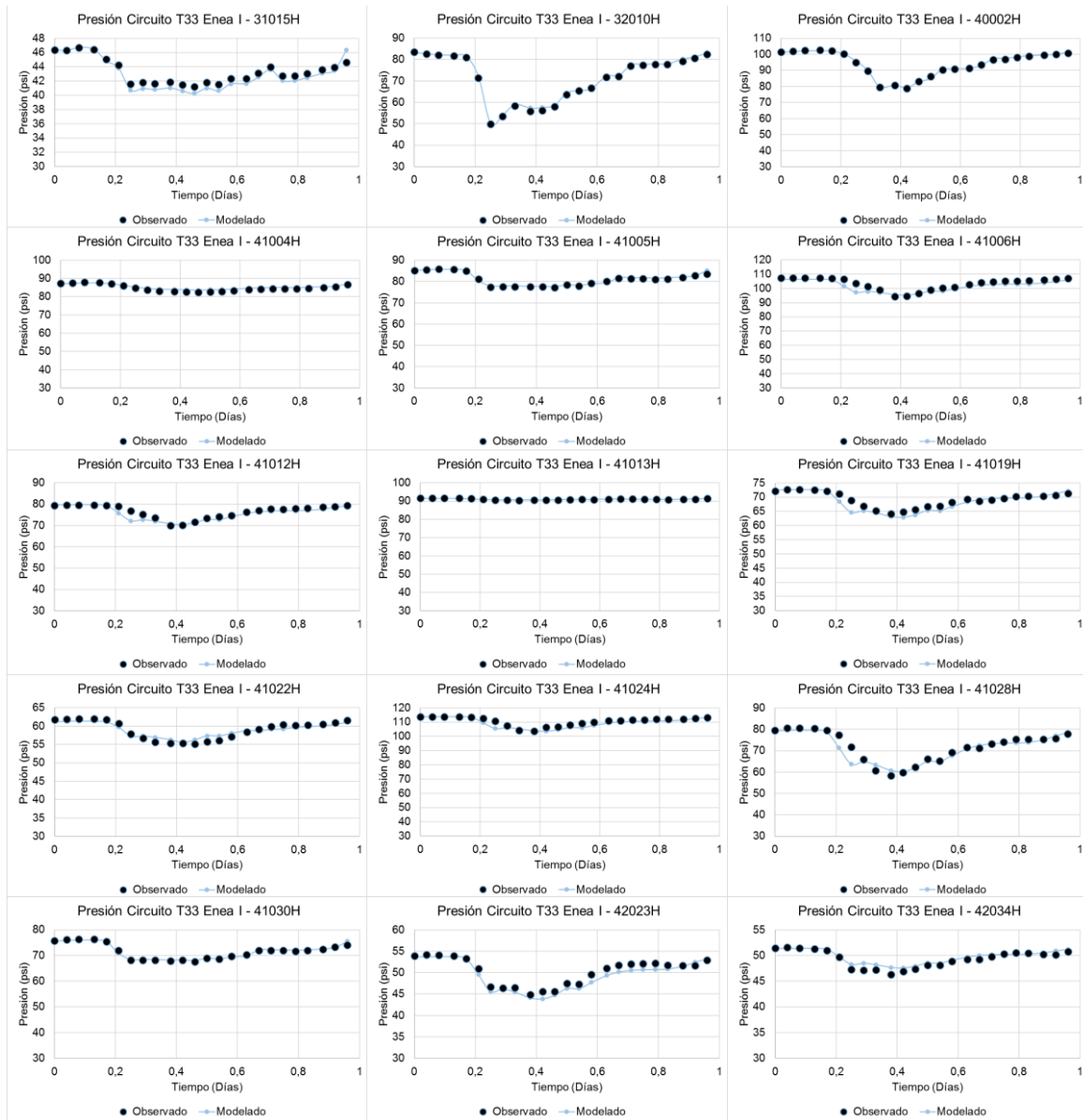


Figura 90. Resultados entre modelado y observado de la conservación de la energía – T33 Enea I (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2017)

5.3.3 Análisis de resultados del comportamiento actual de las redes

Los resultados obtenidos en el proceso de modelación se presentan en el siguiente resumen por sector hidráulico.

T1 EL CABLE SALIDA DE 8

De acuerdo con el análisis se determina que este sector hidráulico presenta una alta variación de presiones como se presenta en la Figura 91, donde es posible identificar los cambios de rangos de presión según la topografía montañosa que existe, en la cual se tienen pendientes que varían entre el 3% y el 148%, en su mayoría se tienen pendientes del 19%, dadas por su amplia extensión de territorio que acoge 2.852 metros de longitud y 310.126 metros cuadrados en área, por tal motivo, se generan presiones superiores a las establecidas en el reglamento de agua potable para la prestación del servicio de acueducto.

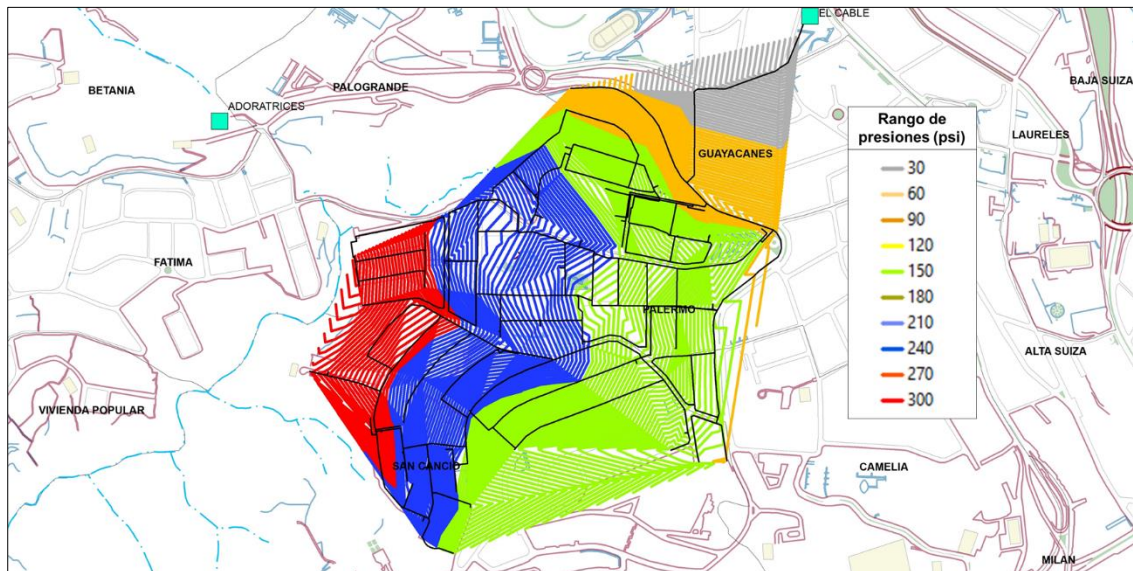


Figura 91. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T1 el cable salida de 8 (Elaboración propia, 2017)

Los comportamientos de las presiones mediante los rangos estipulados se muestran en la Figura 92, donde se observa que aproximadamente el 60% del sector supera presiones de 85 psi con un alto exceso de energía que requiere ser disipada (lo marcado en rosado).

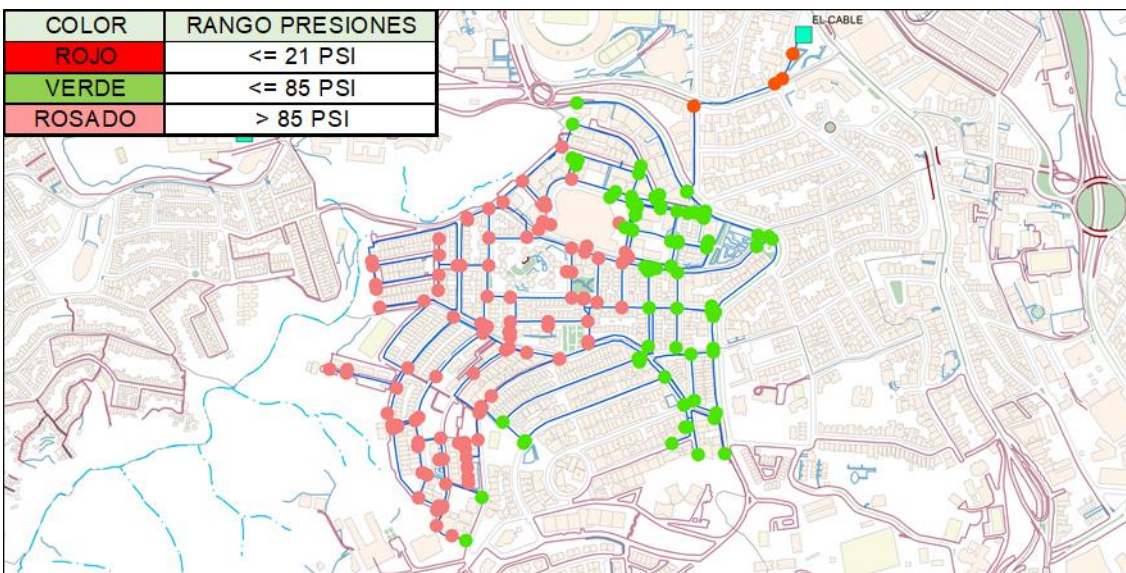


Figura 92. Presiones en el circuito hidráulico modelado T1 el cable salida de 8 (Elaboración propia, 2017)

Según los resultados de la Figura 93, se observa que la mayoría de diámetros de las redes están en un rango de 3 y 4 pulgadas, considerados como diámetros pequeños, solo la tubería de abastecimiento tiene diámetros superiores a las 6 pulgadas. Adicional, según las demandas promedio presentes en la Figura 95, que en general son inferiores a 0,1 litros por segundo dado el sector residencial y en consideración, que el factor multiplicador es inferior a 2 y evaluando las velocidades bajas que maneja las redes (Inferiores a 1 metro por segundo) presentadas en la Figura 94, se considera que el sector hidráulico tiene una amplia capacidad hidráulica.

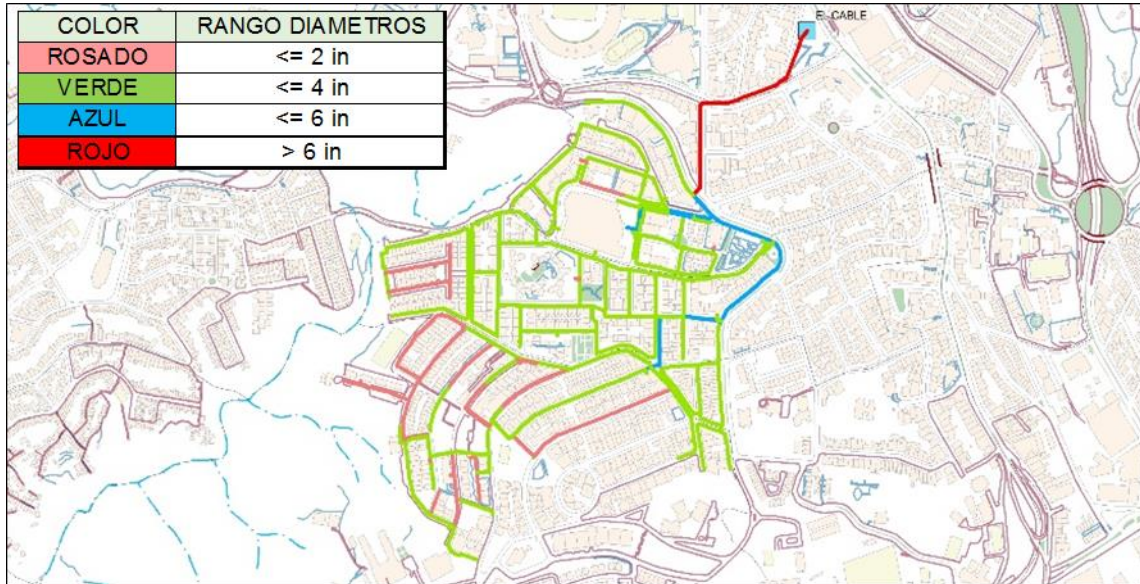


Figura 93. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T1 el cable salida de 8 (Elaboración propia, 2017)

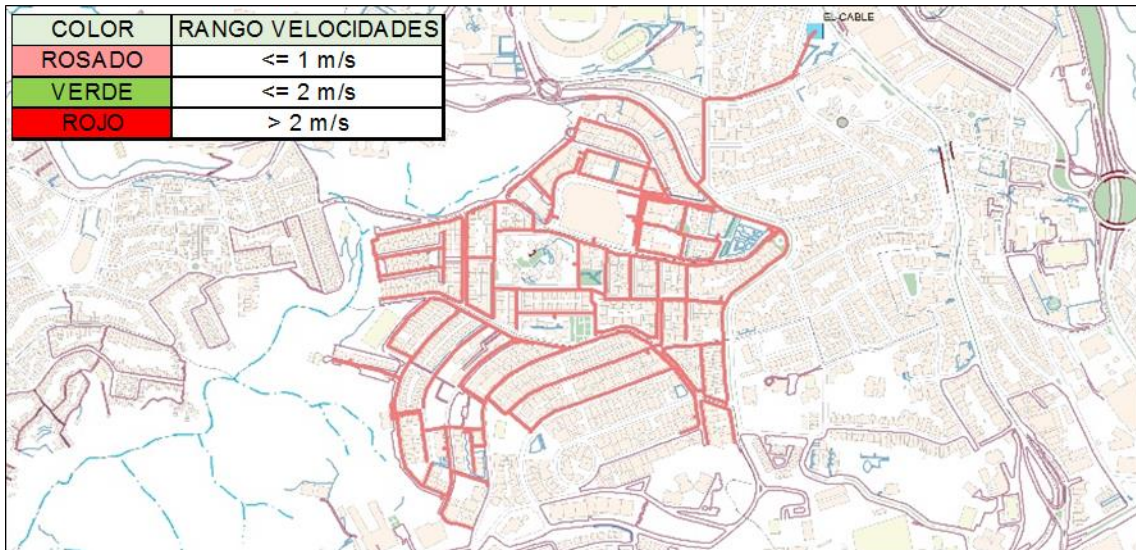


Figura 94. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T1 el cable salida de 8 (Elaboración propia, 2017)

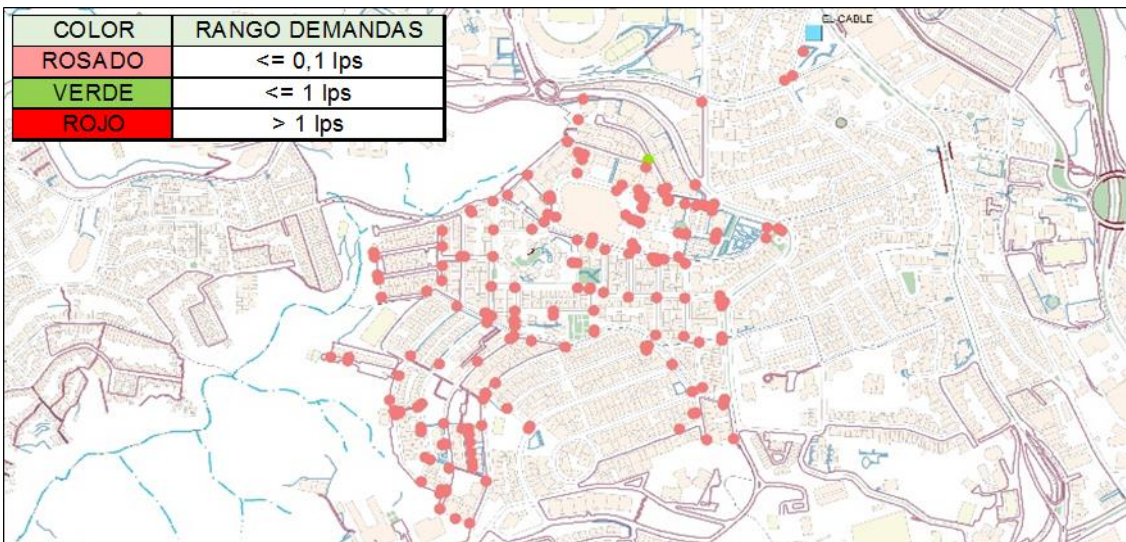


Figura 95. Demandas en el circuito hidráulico modelado T1 el cable salida de 8
(Elaboración propia, 2017)

T23B DERIVACIÓN DE 14 HF

De acuerdo con el análisis se determina que este sector hidráulico presenta una alta variación de presiones como se presenta en la Figura 96, donde es posible identificar los cambios de rangos de presión según la topografía montañosa que existe, en la cual se tienen pendientes que varían entre el 2% y el 203%, en su mayoría se tienen pendientes del 25%, dadas por su amplia extensión de territorio que acoge 16.538 metros de longitud y 1.888.831 metros cuadrados en área, por tal motivo, se generan cambios bruscos en el comportamiento de la energía en el sistema y presiones superiores a las establecidas en el reglamento de agua potable para la prestación del servicio de acueducto.

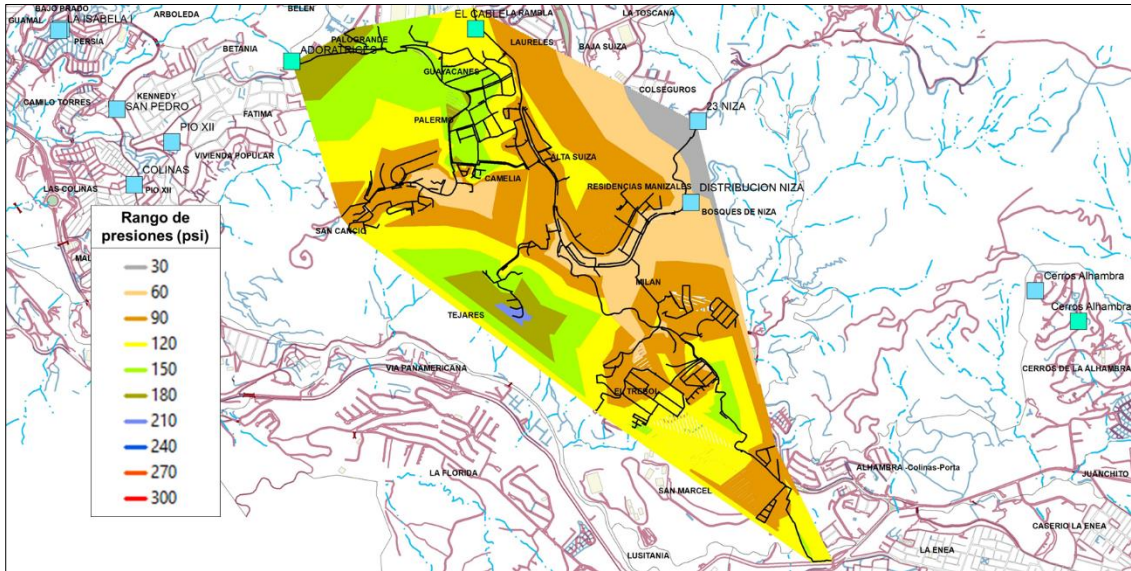


Figura 96. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)

Los comportamientos de las presiones mediante los rangos estipulados se muestran en la Figura 97 donde se observa que aproximadamente el 40% del sector supera presiones de 85 psi (lo marcado en rosado), considerando que este sector tiene una vasta cantidad de válvulas reguladoras que controlan varios sectores con presiones superiores a 150 psi. A pesar de lo anterior, en el sector de San Marcel ubicado dentro del circuito, no es posible reducir las presiones fácilmente, teniendo en cuenta, la localización de urbanizaciones en las partes altas donde la energía del sistema es mínima.

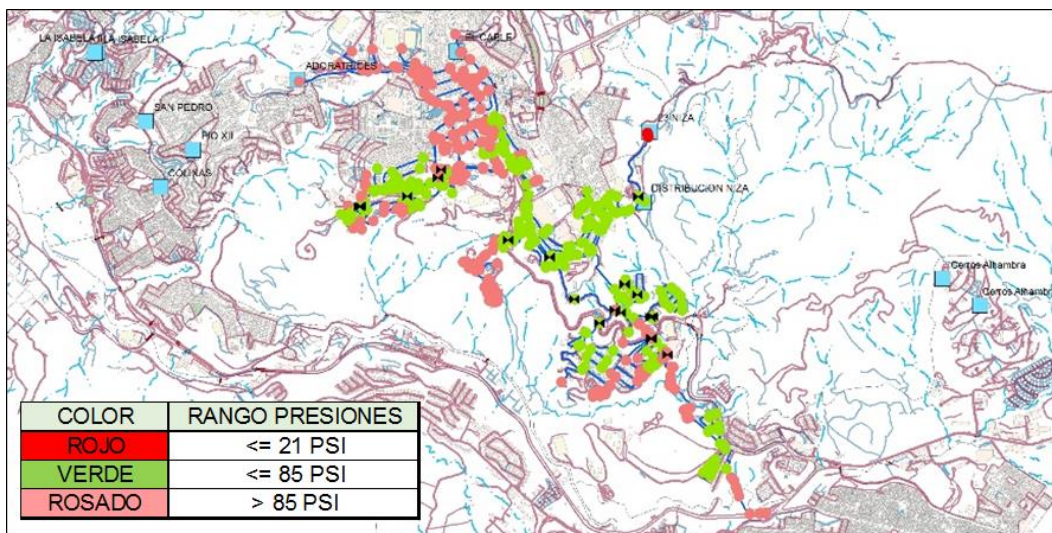


Figura 97. Presiones en el circuito hidráulico modelado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)

Según los resultados de la Figura 98, se observa que la mayoría de diámetros de las redes están entre un rango de 3 y 4 pulgadas, considerados como diámetros pequeños, solo las tuberías de abastecimiento y conducciones tiene diámetros superiores a las 6 pulgadas hasta las 14 pulgadas. Adicional, según las demandas promedio presentes en la Figura 100, que en general en la zona de uso comercial ubicados por el barrio Milán y La Camelia están entre 0,1 y 1 litros por segundo, y en las zonas de uso residencial que conforman el resto del sector con demandas inferiores a 0,1 litros por segundo, y evaluando las velocidades bajas que maneja las redes (Inferiores a 1 metro por segundo) presentadas en la Figura 99, se considera que el sector hidráulico tiene una amplia capacidad de las redes.

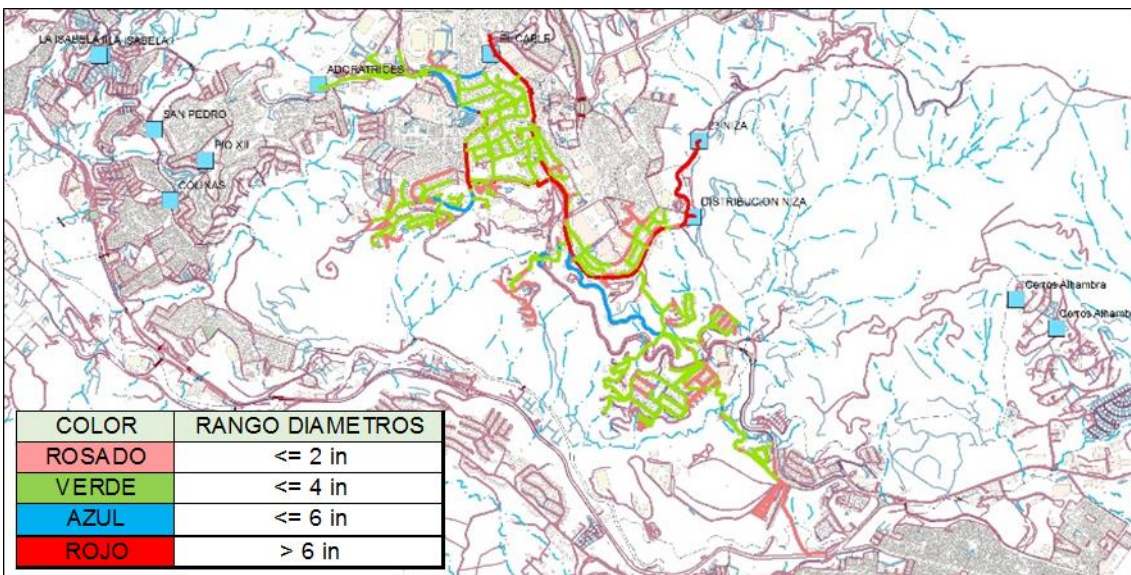


Figura 98. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)

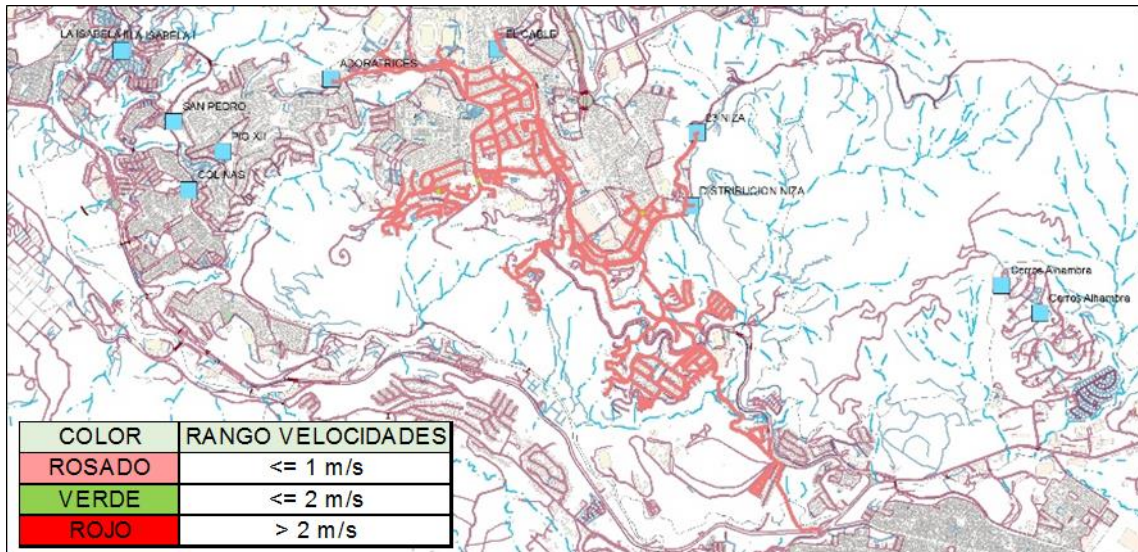


Figura 99. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)

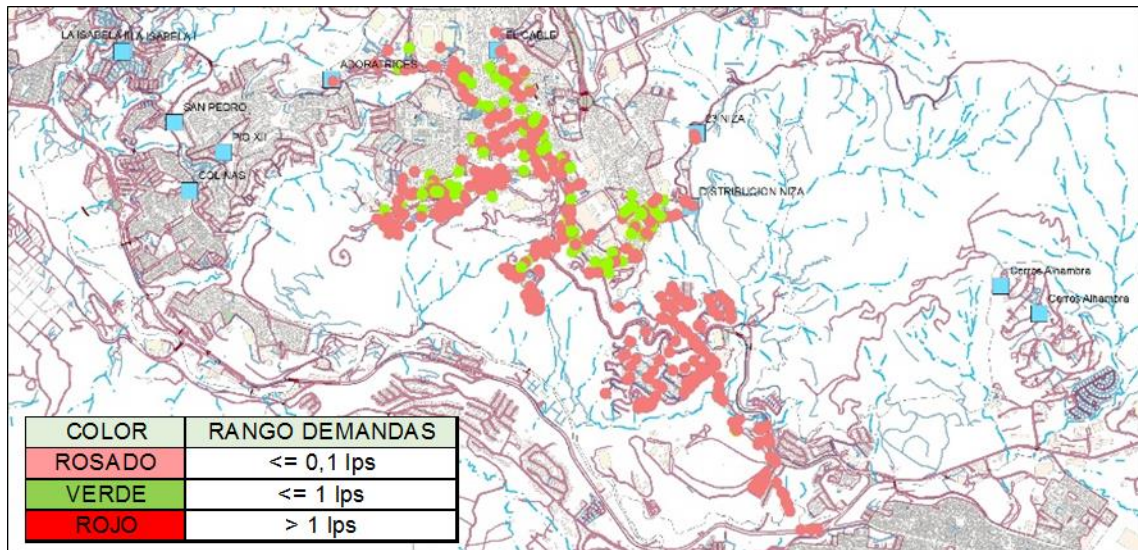


Figura 100. Demandas en el circuito hidráulico modelado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)

T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA

De acuerdo con el análisis se determina que este sector hidráulico presenta una alta variación de presiones como se presenta en la Figura 101, donde es posible identificar los cambios de rangos de presión según la topografía montañosa que existe, en la cual se

tienen pendientes que varían entre el 3% y el 112%, en su mayoría se tienen pendientes del 15%, dadas por su amplia extensión de territorio que acoge 2.186 metros de longitud y 173.568 metros cuadrados en área, por tal motivo, se generan presiones superiores a las establecidas en el reglamento de agua potable para la prestación del servicio de acueducto.

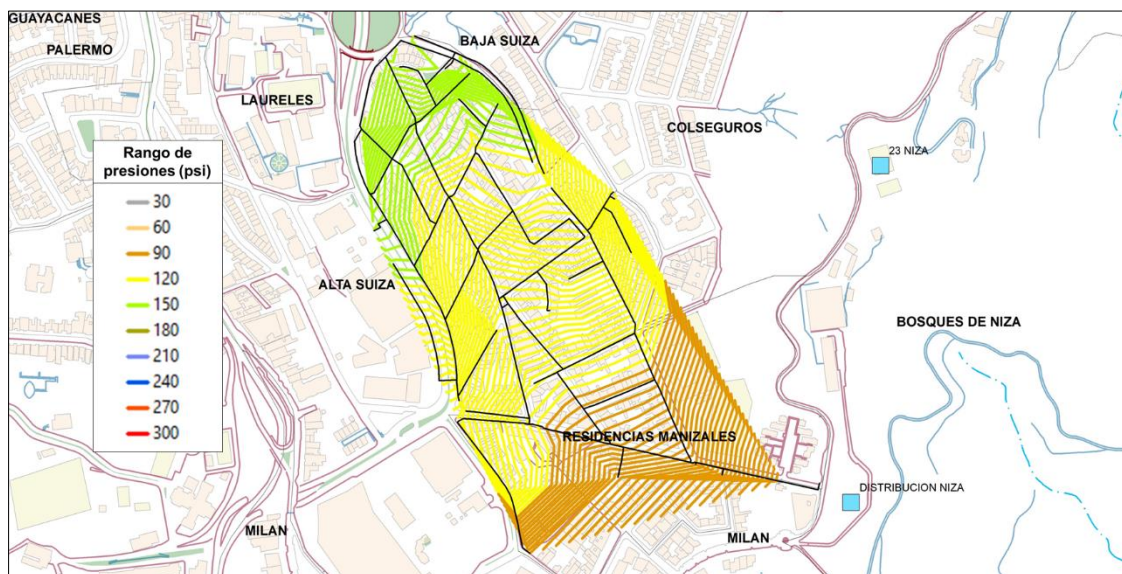


Figura 101. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)

Los comportamientos de las presiones mediante los rangos estipulados se muestran en la Figura 102, donde se observa que aproximadamente el 90% del sector supera presiones de 85 psi con un exceso de energía que requiere ser disipada (lo marcado en rosado).

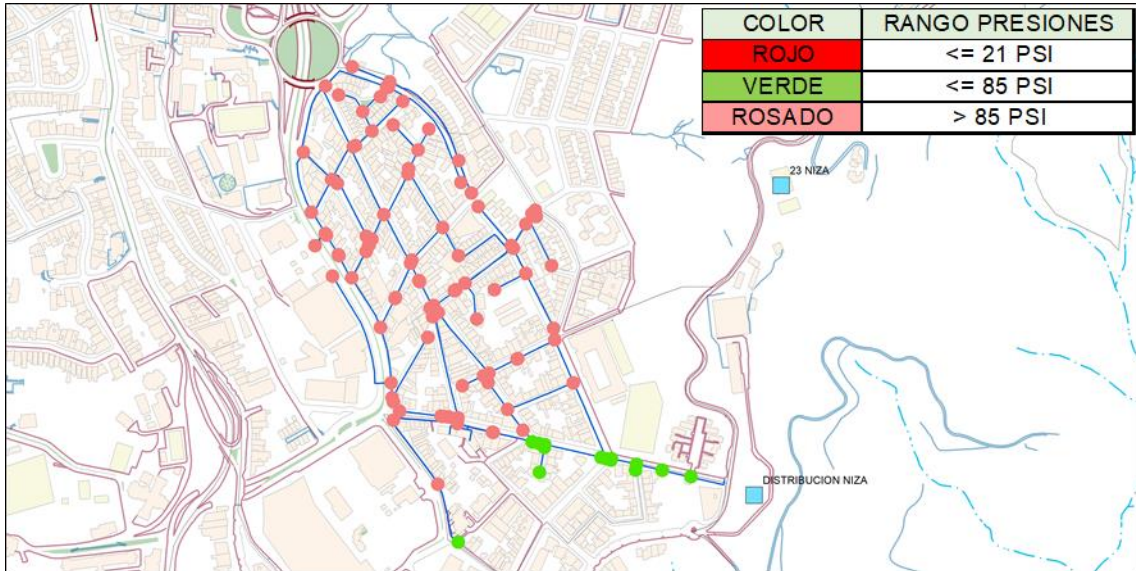


Figura 102. Presiones en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)

Según los resultados de la Figura 103, se observa que la mayoría de diámetros de las redes están entre un rango de 3 y 4 pulgadas incluyendo la tubería de abastecimiento, teniendo en cuenta, que el sector se deriva de una conducción de 12 pulgadas con baja demanda en el punto de conexión por su cercanía a la planta de tratamiento. Adicional, según las demandas promedio presentes en la Figura 105, que en general son inferiores a 0,1 litros por segundo y en consideración, que el factor multiplicador es inferior a 2 y evaluando las velocidades bajas que maneja las redes (Inferiores a 1 metro por segundo) presentadas en la Figura 104, se considera que el sector hidráulico tiene una capacidad hidráulica superior a lo requerido.

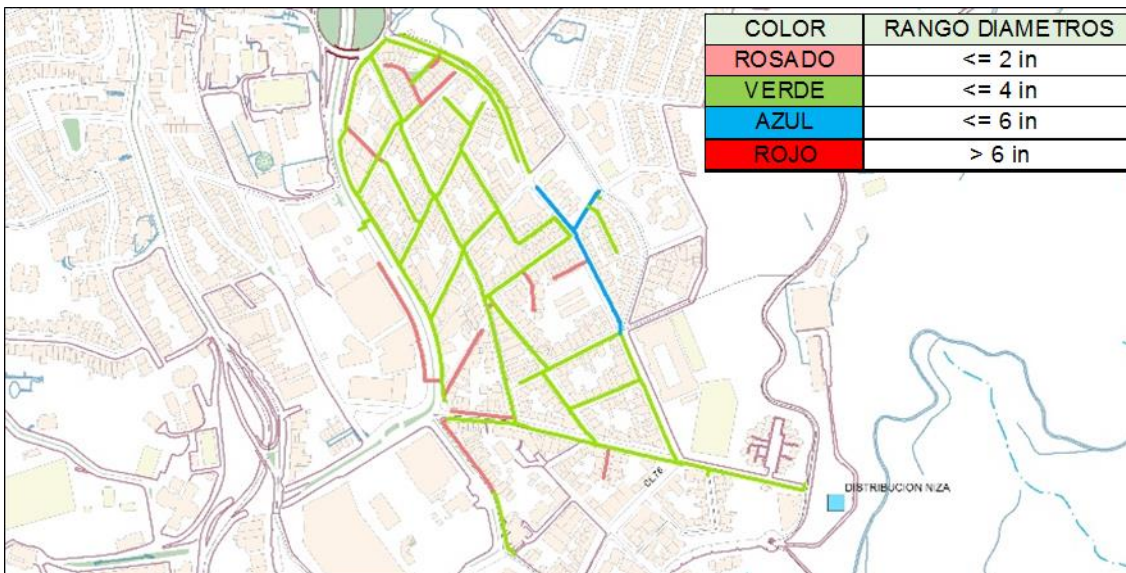


Figura 103. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)

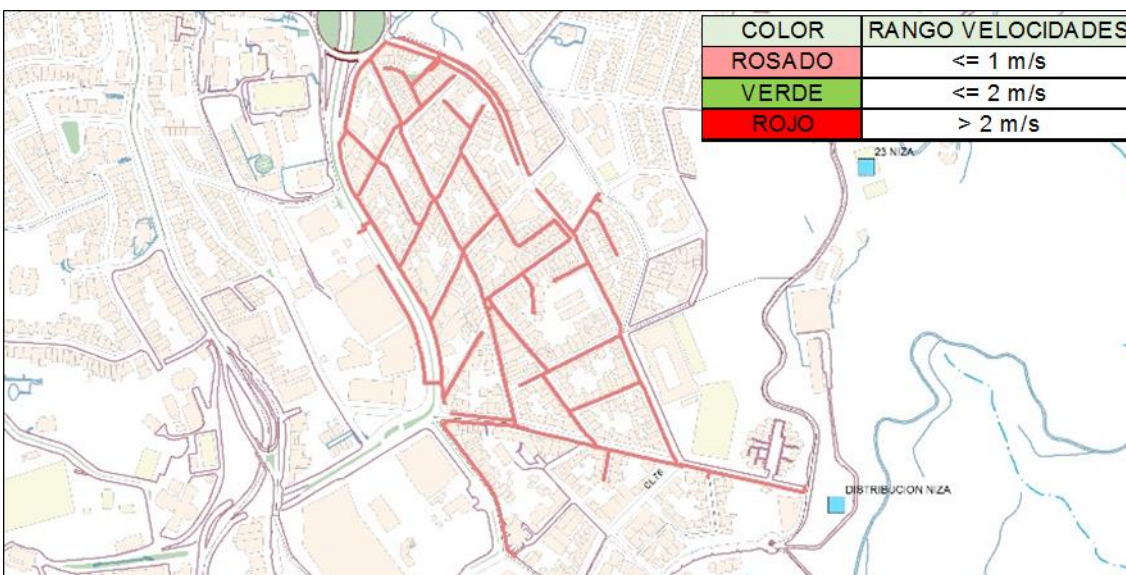


Figura 104. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)

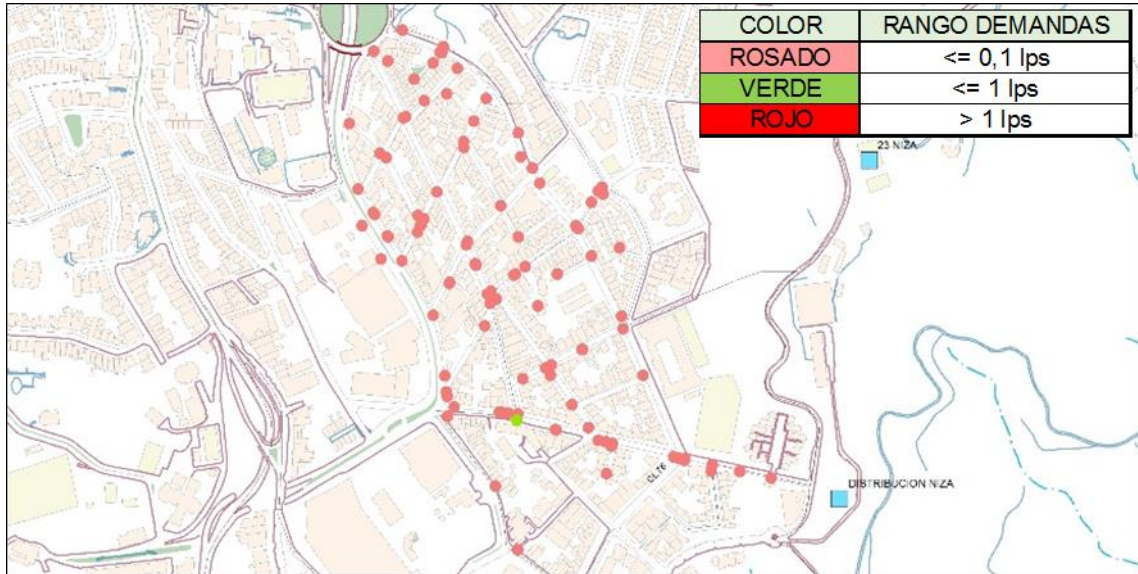


Figura 105. Demandas en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)

T23 SALIDA DE 8

De acuerdo con el análisis se determina que este sector hidráulico presenta una alta variación de presiones como se presenta en la Figura 106, donde es posible identificar los cambios de rangos de presión según la topografía montañosa que existe, en la cual se tienen pendientes que varían entre el 2% y el 161%, en su mayoría se tienen pendientes del 34%, dadas por su amplia extensión de territorio que acoge 2.549 metros de longitud y 154.994 metros cuadrados en área, por tal motivo, se generan presiones superiores a las establecidas en el reglamento de agua potable para la prestación del servicio de acueducto.

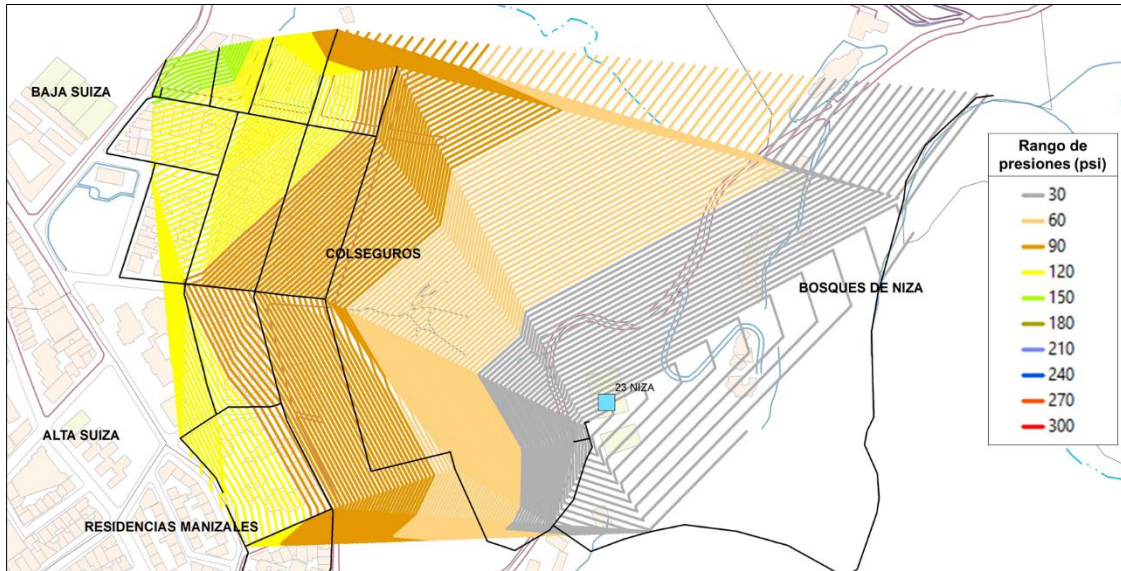


Figura 106. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 8 (Elaboración propia, 2017)

Los comportamientos de las presiones mediante los rangos estipulados se muestran en la Figura 107, donde se observa que aproximadamente el 80% del sector supera presiones de 85 psi con un exceso de energía que requiere ser disipada (lo marcado en rosado).

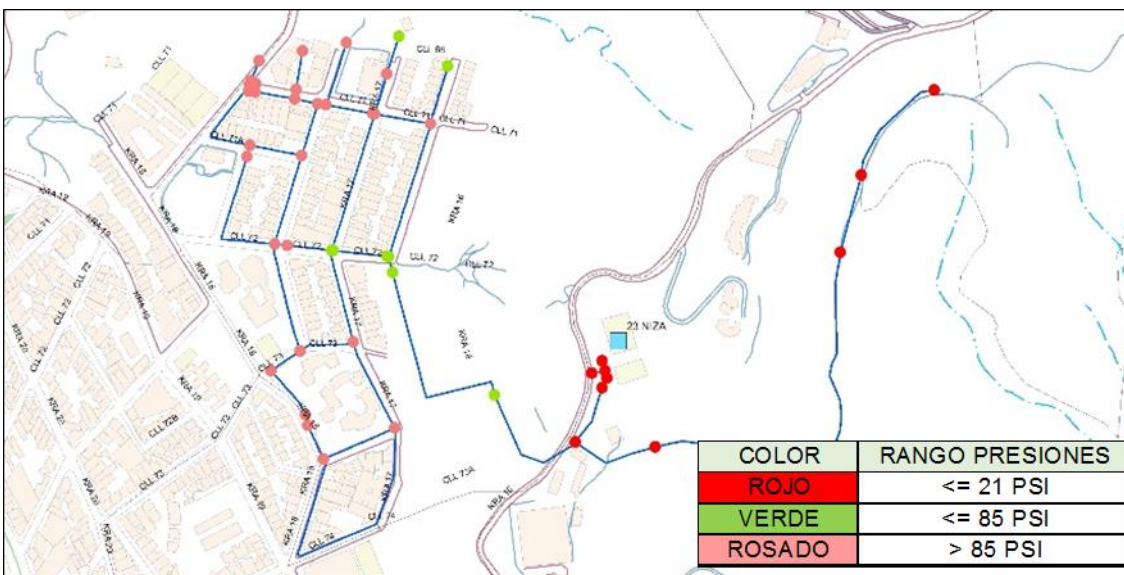


Figura 107. Presiones en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 8 (Elaboración propia, 2017)

Según los resultados de la Figura 108, se observa que la mayoría de diámetros de las redes están entre un rango de 3 y 4 pulgadas, considerados como diámetros pequeños, solo la tubería de abastecimiento tiene diámetros superiores a las 6 pulgadas. Adicional, según las demandas promedio presentes en la Figura 110, que en general son inferiores a 0,1 litros por segundo dado el sector residencial y en consideración a que el factor multiplicador es inferior a 2 y evaluando las velocidades bajas que maneja las redes (Inferiores a 1 metro por segundo) presentadas en la Figura 109, se considera que el sector hidráulico tiene una capacidad hidráulica superior a lo requerido.

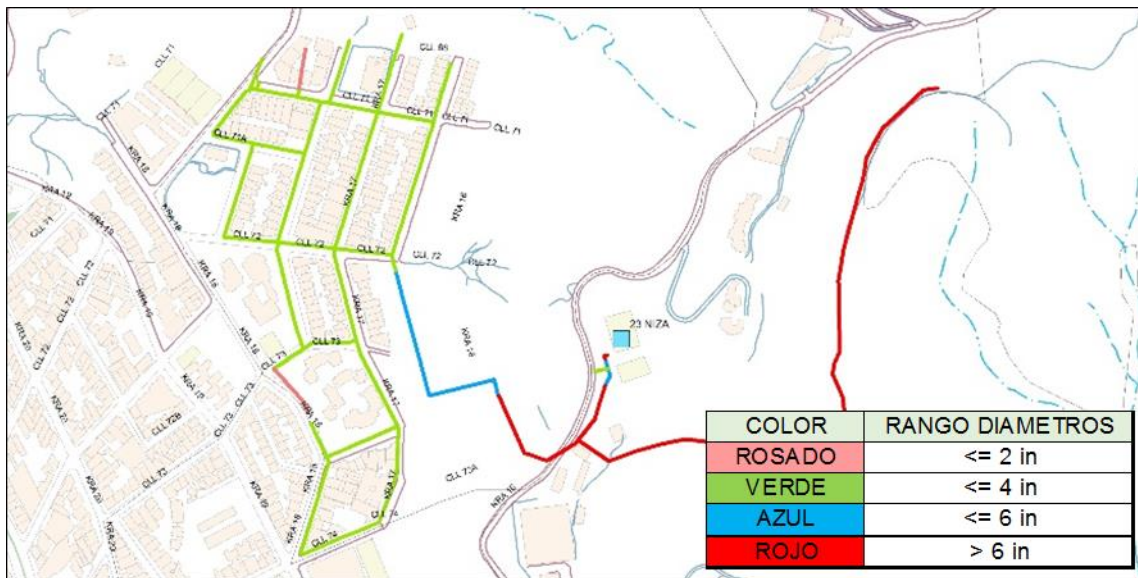


Figura 108. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 8 (Elaboración propia, 2017)

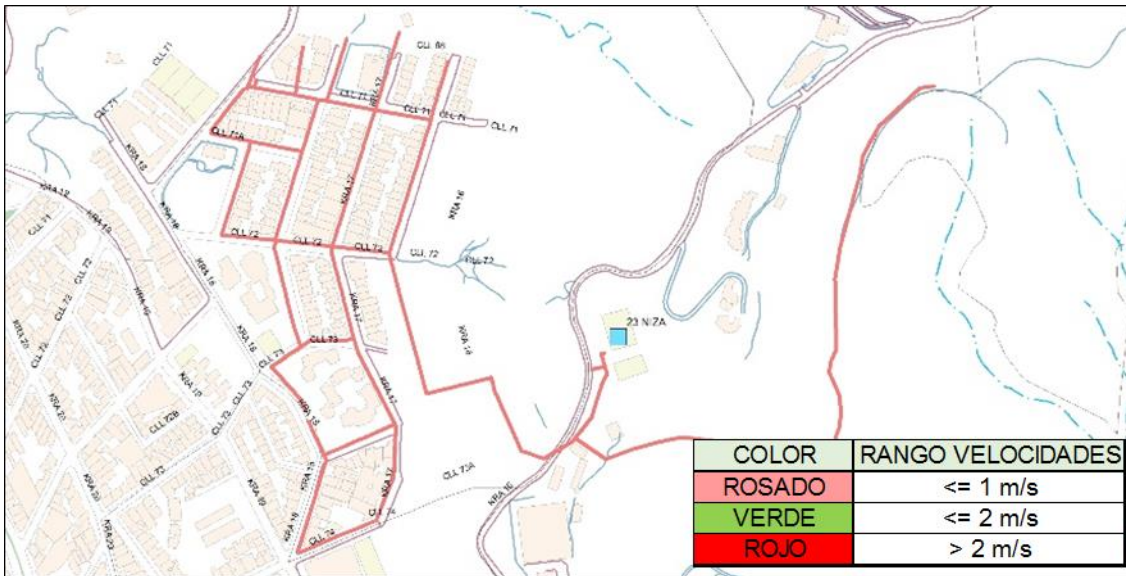


Figura 109. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 8 (Elaboración propia, 2017)

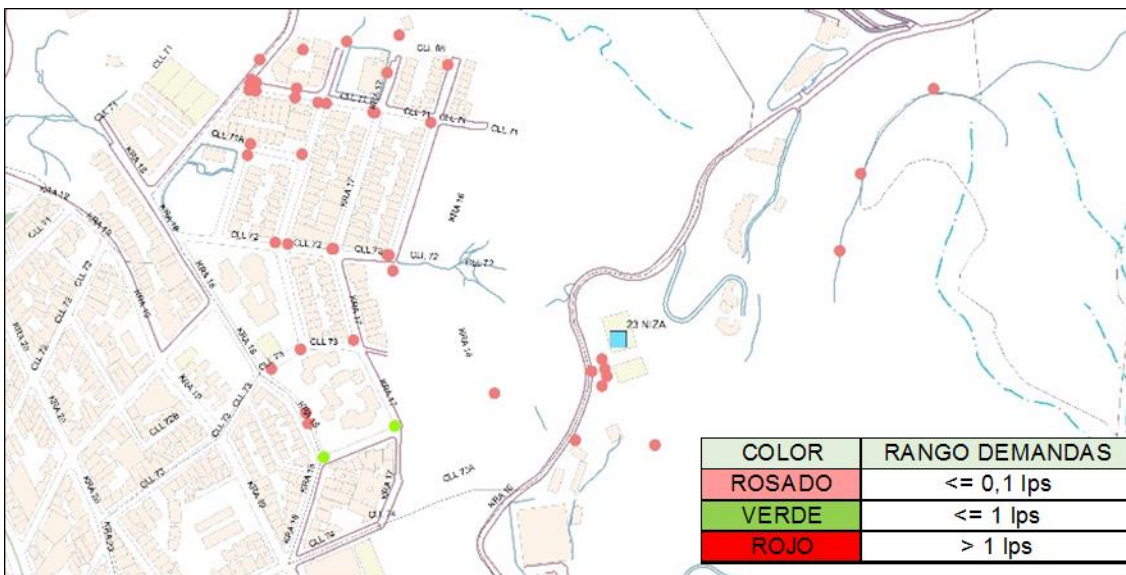


Figura 110. Demandas en el circuito hidráulico modelado T23 salida de 8 (Elaboración propia, 2017)

TANQUE ENEA III

De acuerdo con el análisis se determina que este sector hidráulico presenta una alta variación de presiones como se presenta en la Figura 111, donde es posible identificar los

cambios de rangos de presión según la topografía montañosa que existe, en la cual se tienen pendientes que varían entre el 1% y el 125%, en su mayoría se tienen pendientes del 20%, dadas por su amplia extensión de territorio que acoge 10.445 metros de longitud y 1.409.408 metros cuadrados en área, por tal motivo, se generan cambios bruscos en el comportamiento de la energía en el sistema y presiones superiores a las establecidas en el reglamento de agua potable para la prestación del servicio de acueducto.

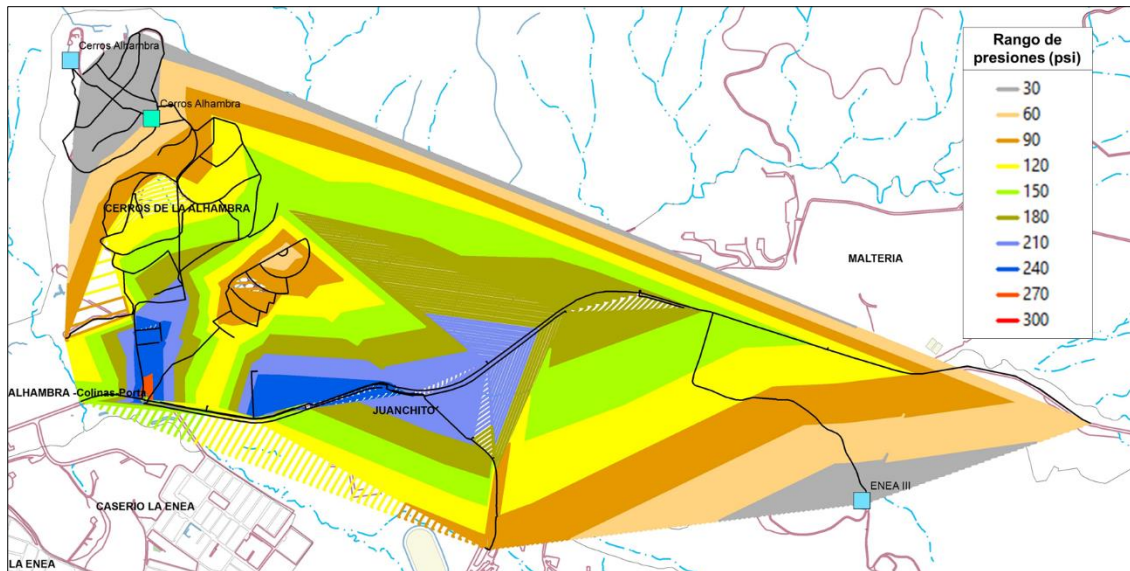


Figura 111. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)

Los comportamientos de las presiones mediante los rangos estipulados se muestran en la Figura 112, donde se observa que aproximadamente el 75% del sector supera presiones de 85 psi con un alto exceso de energía que requiere ser disipada (lo marcado en rosado).

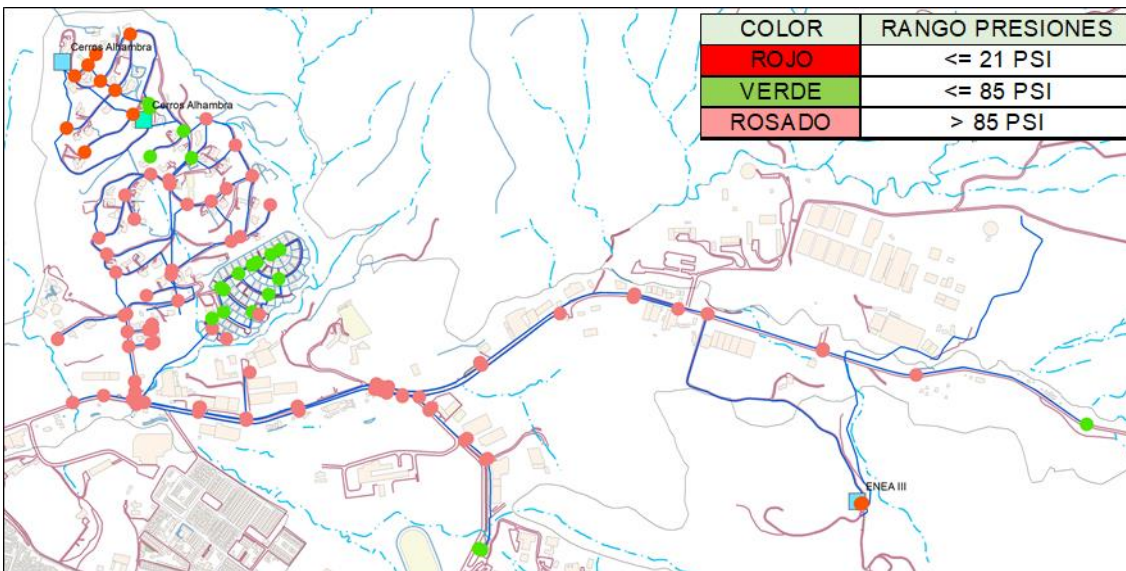


Figura 112. Presiones en el circuito hidráulico modelado tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)

Según los resultados de la Figura 113, se observa que la mayoría de diámetros de las redes están entre un rango de 3 y 4 pulgadas, considerados como diámetros pequeños, solo la tubería de abastecimiento tiene diámetros superiores a las 6 pulgadas. Adicional, según las demandas promedio presentes en la Figura 115, con un rango entre 0,1 y 1 litro por segundo en la zona de uso industrial y con valores inferiores a 0,1 litros por segundo en las zonas de uso residencial con un factor multiplicador de aproximadamente el 1,5 % constante durante la mayor parte del día por la alta presencia de empresas, y evaluando las velocidades bajas que maneja las redes (Inferiores a 1 metro por segundo) presentadas en la Figura 114, se considera que el sector hidráulico tiene una amplia capacidad de las redes.

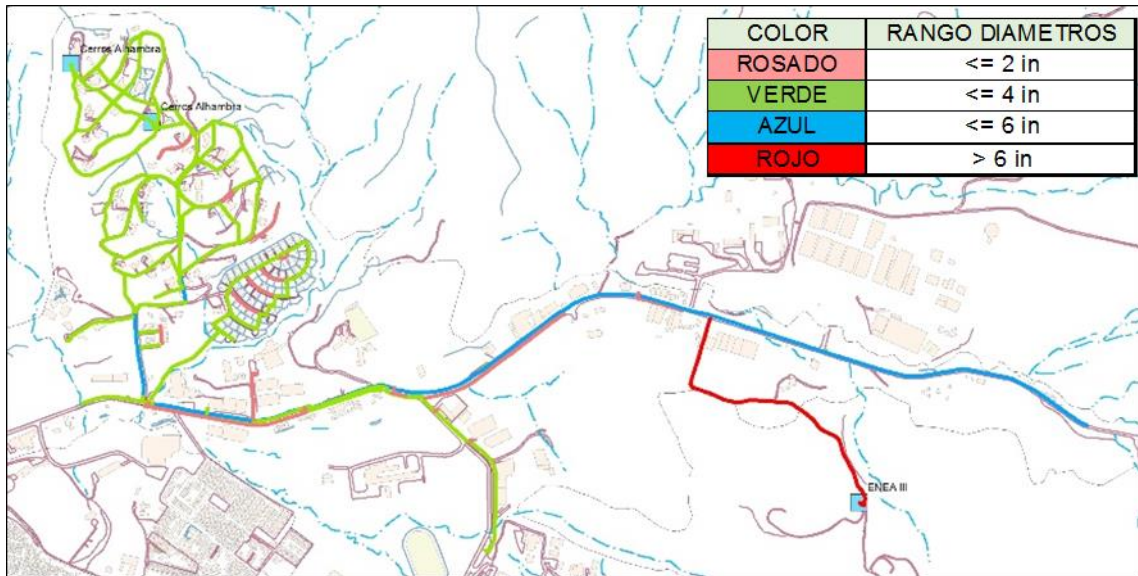


Figura 113. Diámetros en el circuito hidráulico modelado tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)

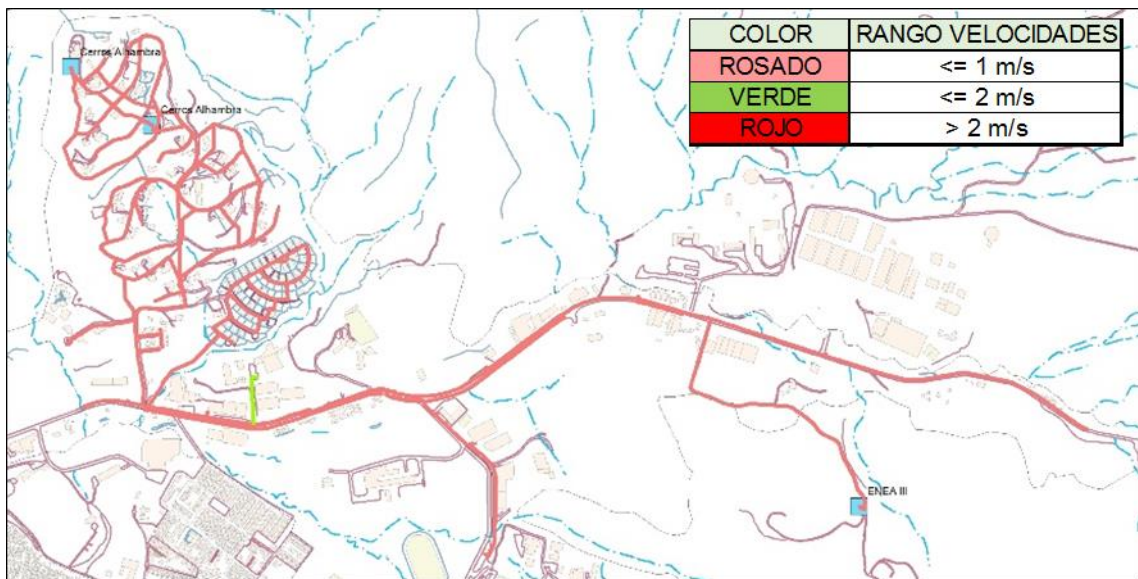


Figura 114. Velocidades en el circuito hidráulico modelado tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)

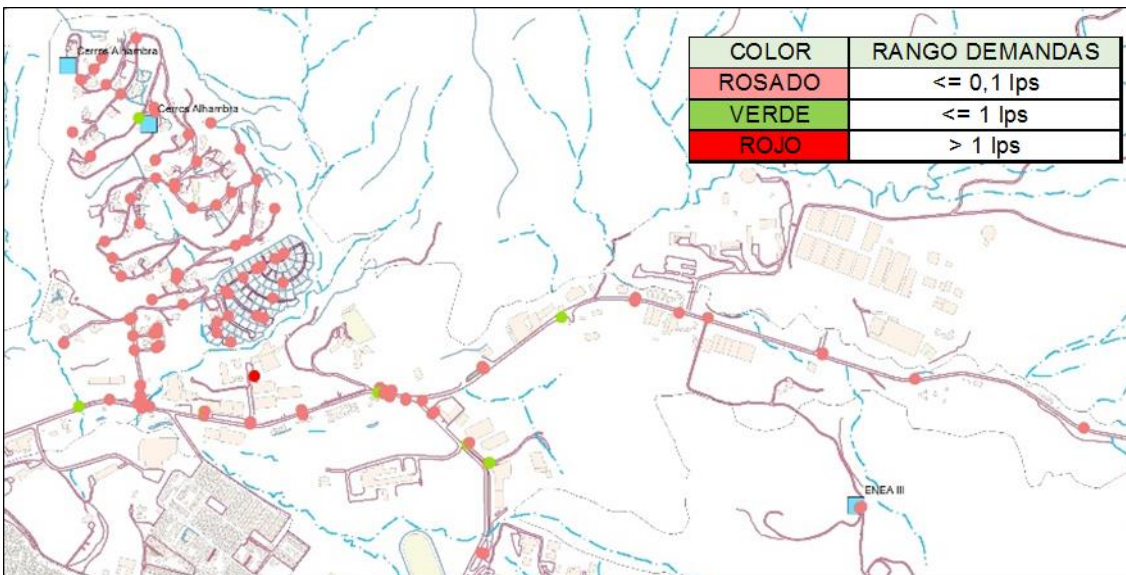


Figura 115. Demandas en el circuito hidráulico modelado tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)

T33 ENEA I

De acuerdo con el análisis se determina que este sector hidráulico presenta una alta variación de presiones como se presenta en la Figura 116, donde es posible identificar los cambios de rangos de presión según la topografía montañosa que existe, en la cual se tienen pendientes que varían entre el 1% y el 109%, en su mayoría se tienen pendientes del 21%, dadas por su amplia extensión de territorio que acoge 21.726 metros de longitud y 1.845.418 metros cuadrados en área, por tal motivo, se generan cambios bruscos en el comportamiento de la energía en el sistema y presiones superiores a las establecidas en el reglamento de agua potable para la prestación del servicio de acueducto.

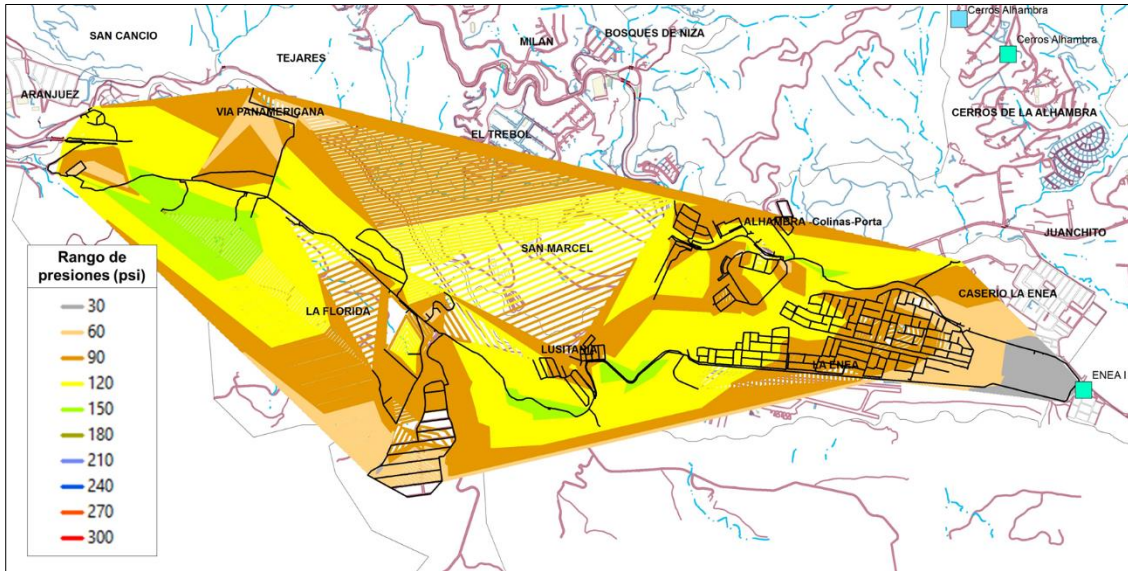


Figura 116. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)

Los comportamientos de las presiones mediante los rangos estipulados se muestran en la Figura 117 donde se observa que aproximadamente el 50% del sector supera presiones de 85 psi (lo marcado en rosado), considerando que este sector tiene una vasta cantidad de válvulas reguladoras que controlan varios sectores con presiones superiores a 130 psi, pero, en sector de San Marcel y La Florida, ubicados dentro del circuito, no es posible reducir las presiones fácilmente, teniendo en cuenta, la localización de urbanizaciones en las partes altas donde la energía del sistema es mínima.

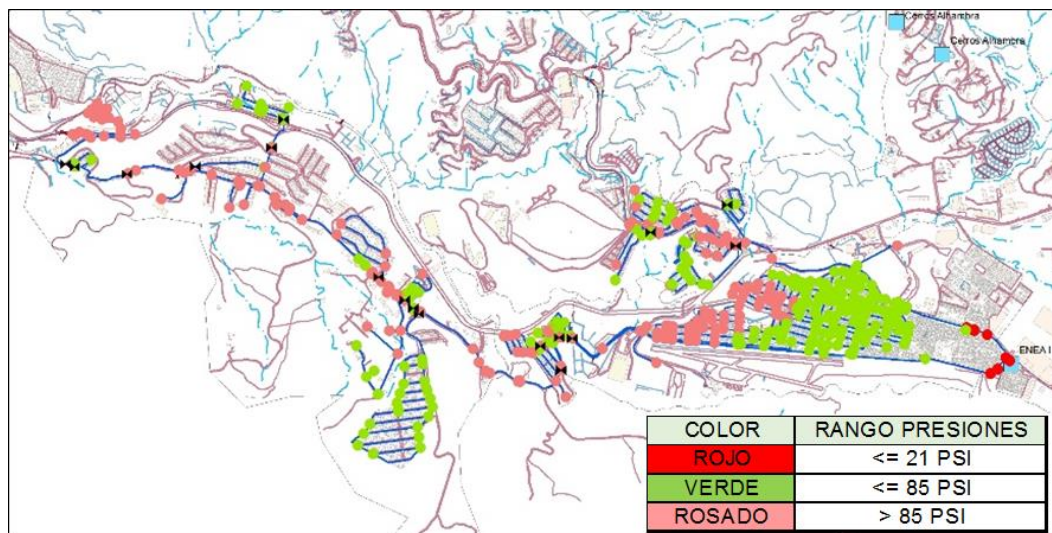


Figura 117. Presiones en el circuito hidráulico modelado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)

Según los resultados de la Figura 118, se observa que la mayoría de diámetros de las redes están entre un rango de 3 y 4 pulgadas, considerados como diámetros pequeños, solo las tuberías de abastecimiento que salen del tanque tienen diámetros superiores a las 6 pulgadas. Adicional, según las demandas promedio presentes en la Figura 120, que en general es un sector de uso residencial con demandas inferiores a 0,1 litro por segundo y tiene unas zonas de uso industrial con demandas entre 0,1 y 1 litro por segundo, y evaluando las velocidades bajas que maneja las redes (Inferiores a 1 metro por segundo) presentadas en la Figura 119, se considera que el sector hidráulico tiene una capacidad hidráulica superior a lo requerido.

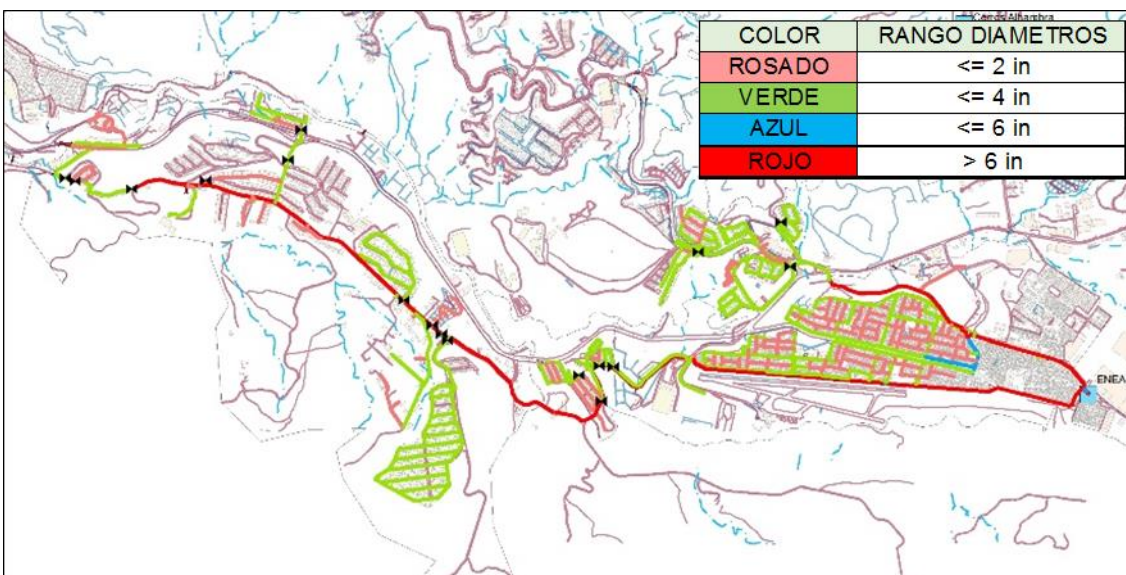


Figura 118. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)

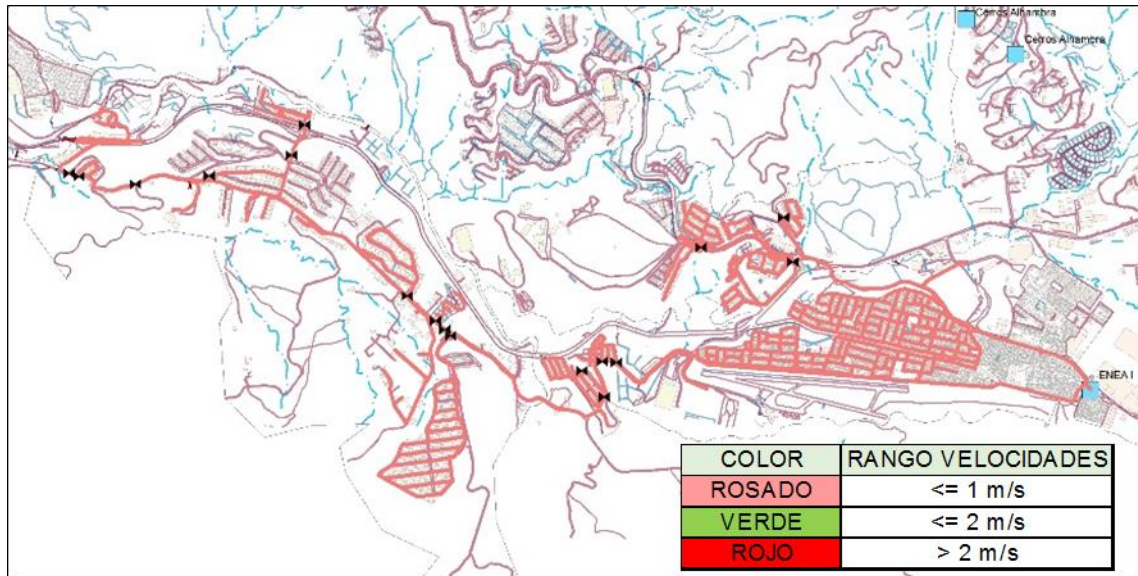


Figura 119. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)

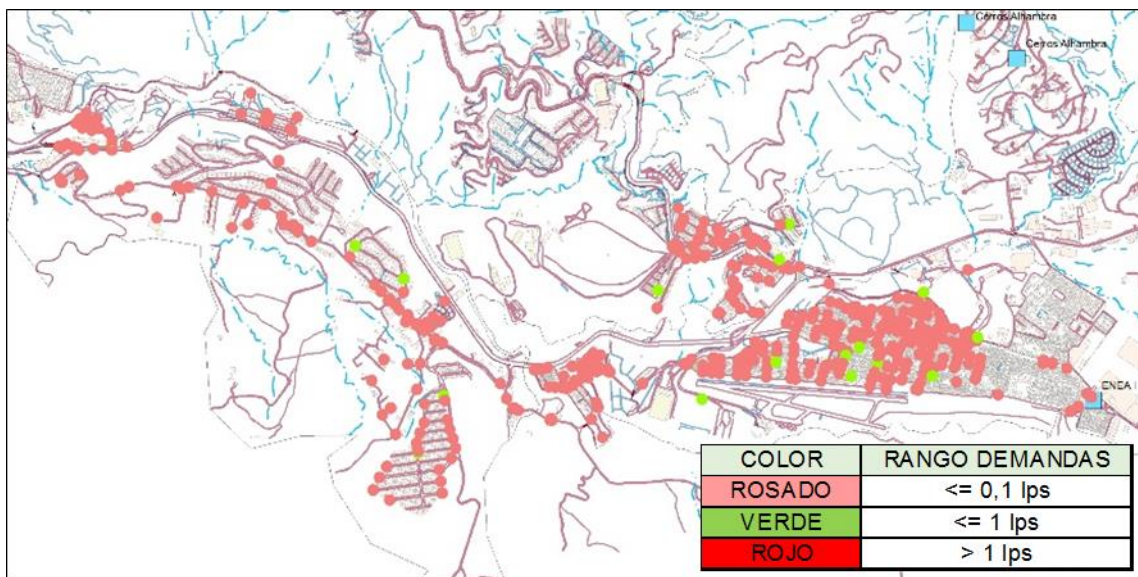


Figura 120. Demandas en el circuito hidráulico modelado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)

T34 ENEA II

De acuerdo con el análisis se determina que este sector hidráulico presenta una alta variación de presiones como se presenta en la Figura 121, donde es posible identificar los

cambios de rangos de presión según la topografía montañosa que existe, en la cual se tienen pendientes que varían entre el 2% y el 115%, en su mayoría se tienen pendientes del 16%, dadas por su amplia extensión de territorio que acoge 11.301 metros de longitud y 588.942 metros cuadrados en área, por tal motivo, se generan cambios bruscos en el comportamiento de la energía en el sistema y presiones superiores a las establecidas en el reglamento de agua potable para la prestación del servicio de acueducto.

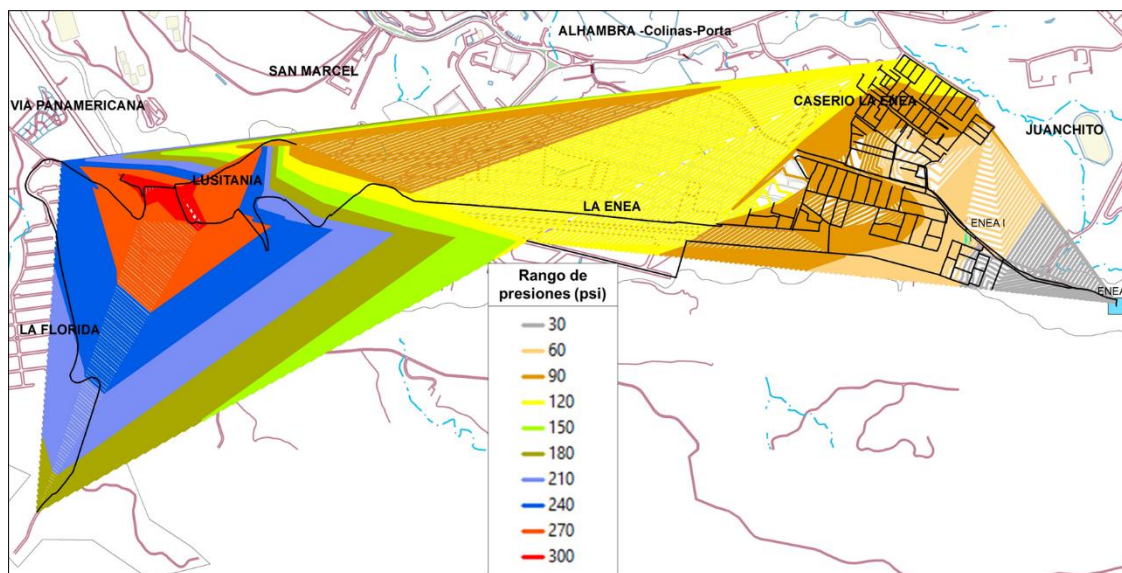


Figura 121. Rango de presiones en el circuito hidráulico modelado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)

Los comportamientos de las presiones mediante los rangos estipulados se muestran en la Figura 122 donde se observa que aproximadamente el 30% del sector supera presiones de 85 psi (lo marcado en rosado). En el sector de Lusitania y La Florida, ubicados dentro del circuito, es complejo reducir las presiones, teniendo en cuenta, la localización de urbanizaciones y entidades educativas en las partes altas donde la energía del sistema es mínima.

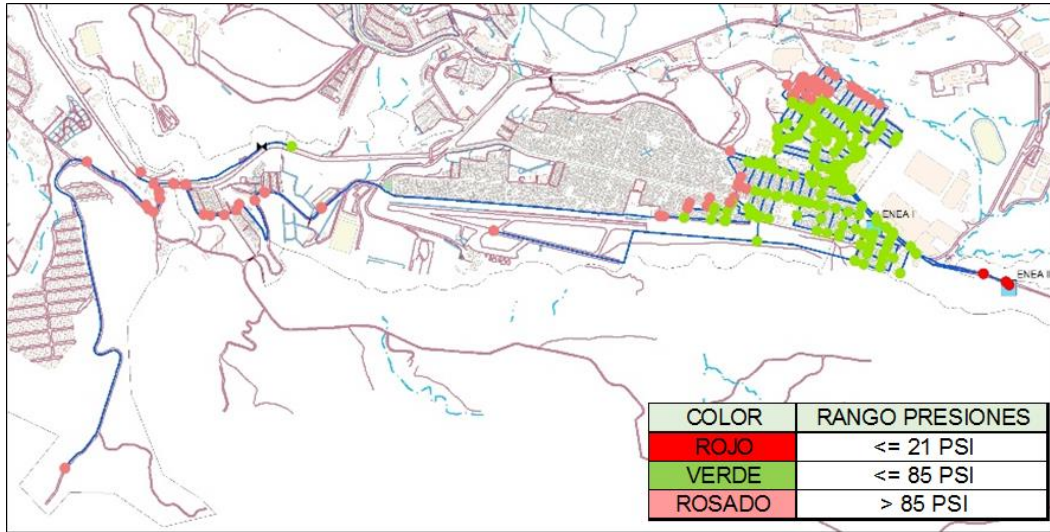


Figura 122. Presiones en el circuito hidráulico modelado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)

Según los resultados de la Figura 123, se observa que la mayoría de diámetros de las redes están entre un rango de 3 y 4 pulgadas, considerados como diámetros pequeños, solo la tubería de abastecimiento que se deriva desde el tanque tiene un diámetro igual a 6 pulgadas. Adicional, según las demandas promedio presentes en la Figura 125, que en general es un sector de uso residencial con demandas inferiores a 0,1 litro por segundo y tiene unas zonas de uso industrial e institucional con demandas entre 0,1 y 1 litro por segundo, y evaluando las velocidades bajas que maneja las redes (Inferiores a 1 metro por segundo) presentadas en la Figura 124, se considera que el sector hidráulico tiene una amplia capacidad de las redes.

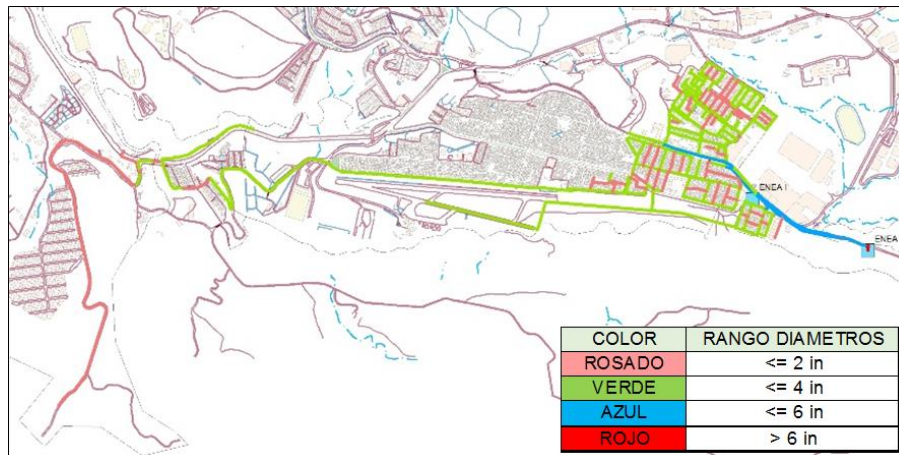


Figura 123. Diámetros en el circuito hidráulico modelado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)

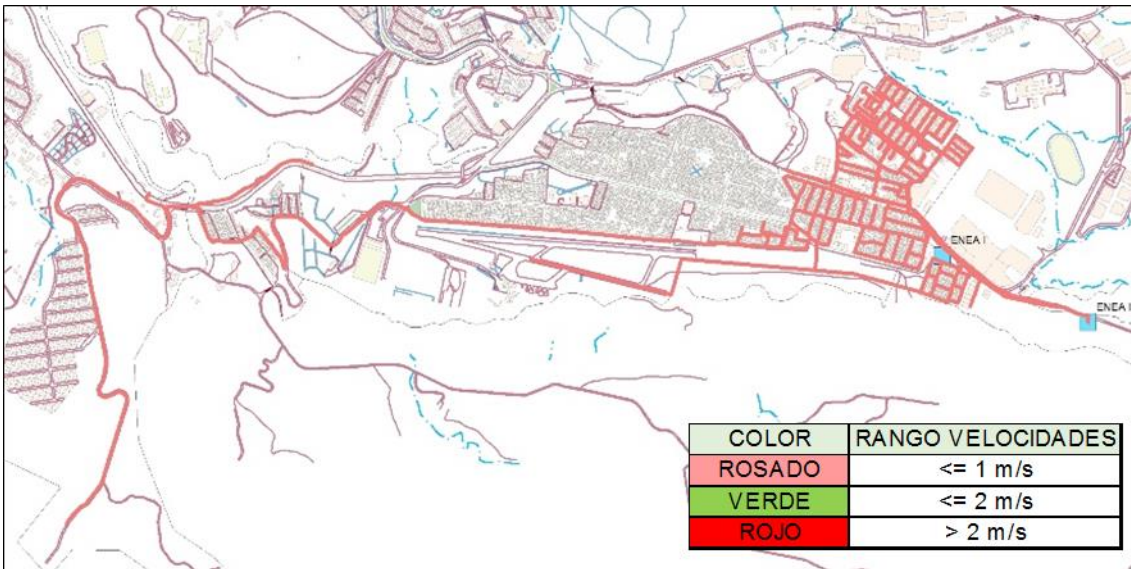


Figura 124. Velocidades en el circuito hidráulico modelado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)

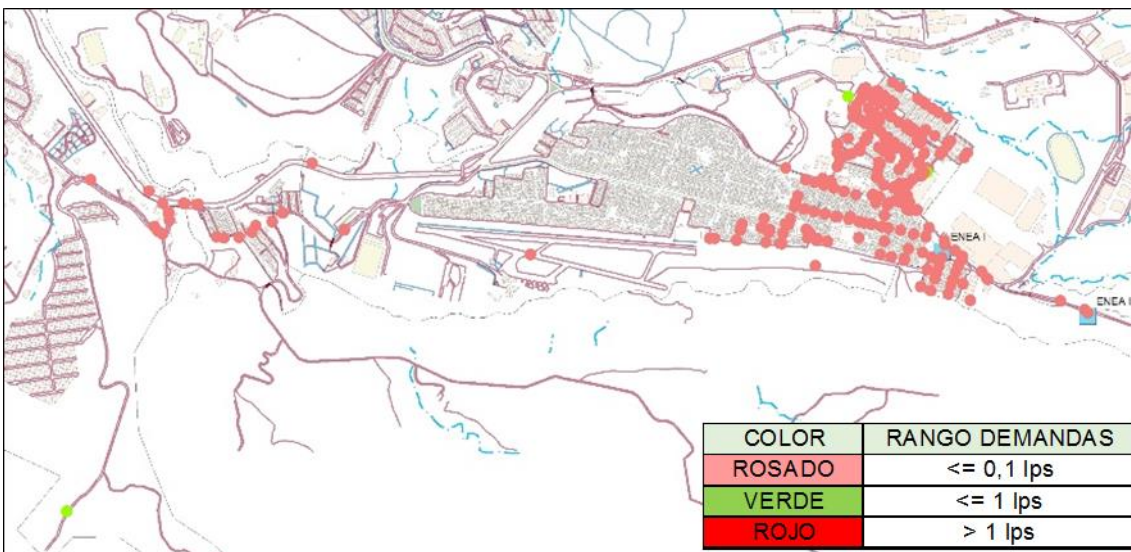


Figura 125. Demandas en el circuito hidráulico modelado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)

En conclusión, se considera factible técnica y económicamente gestionar las pérdidas de agua, teniendo en cuenta, la suficiencia de la capacidad hidráulica, y altas presiones que se tienen en los sistemas, por medio de proyectos para reducir las presiones a bajo costo

como es la instalación de válvulas reguladoras y así, minimizar las pérdidas económicas generadas por la ocurrencia de daños y reducir el suministro de agua.

Adicional, existen algunos sectores ampliamente regulados por medio de estas válvulas, donde se ha logrado reducir las pérdidas económicas generadas por fugas en las redes, pero en los cuales se debe garantizar la correcta prestación del servicio y la viabilidad de generar proyectos de expansión, considerando que barrios como San Marcel, Lusitania, Milán, la Florida, Palermo, entre otros, son zonas donde se está enfocando la construcción de viviendas y por consiguiente el aumento de usuarios y demandas al sistema.

En algunos sectores se presentan “sifones”, los cuales son zonas con altas presiones, ya que son los puntos más bajos de los sectores, pero que requieren ser evaluados de forma diferente, puesto que la energía se disipa cuando llega a las urbanizaciones en partes altas en los cuales las presiones son mínimas dentro de los rangos permitidos.

5.4 Propuesta de optimización del funcionamiento de las redes

De acuerdo con las condiciones de la zona de estudio se considera que la solución más acertada es centrar el problema en la instalación de válvulas reguladoras de presión que permitan minimizar la energía en las redes, en búsqueda de reducir la ocurrencia de daños y restringir el suministro de agua que lleven a disminuir el índice de agua no contabilizada (IANC). La metodología se basa en encontrar la solución óptima que cumpla con las funciones objetivos y las restricciones indicadas.

A continuación, se hace una descripción del planteamiento del problema de optimización enfrentado, estableciendo las variables de decisión a utilizar, la función objetivo y las restricciones que limitan el problema.

5.4.1 Parámetros de optimización

De acuerdo con la metodología planteada para cada sector hidráulico analizado, los parámetros definidos son los siguientes (Tabla 19).

Tabla 19. Parámetros utilizados para la optimización en unidades internacionales e inglesas

Parámetros de optimización	
Presión mínima (m)	20
Consigna VRP (m)	25
Presión máxima (m)	60
Presión mínima (psi)	28
Consigna VRP (psi)	35
Presión máxima (psi)	85

5.4.2 Definición y resultados de la optimización hidráulica

Según lo estipulado se presenta un análisis diverso en la estructuración de la optimización para cada sector hidráulico, en búsqueda de cumplir la función objetivo.

T1 EL CABLE SALIDA DE 8

El sector inicialmente tiene presiones superiores a las estipuladas, por lo anterior se enfoca la optimización en la reducción de la energía en el sistema, por medio de la instalación de válvulas reguladoras y la unificación del abastecimiento de las zonas. El procedimiento planteado para lograr los objetivos es el siguiente.

Considerando la composición del sector, es necesario la ubicación de válvulas en diferentes puntos, para definir la tubería más viable para la ubicación de la válvula reguladora, se requiere validar topológicamente la ubicación de la elevación correspondiente a la cota crítica dada como la 2060 m.s.n.m., y el rango de presión de 35 metros, ubicando la cota para la instalación de la válvula en la 2095 m.s.n.m., como se presenta en la Figura 126.

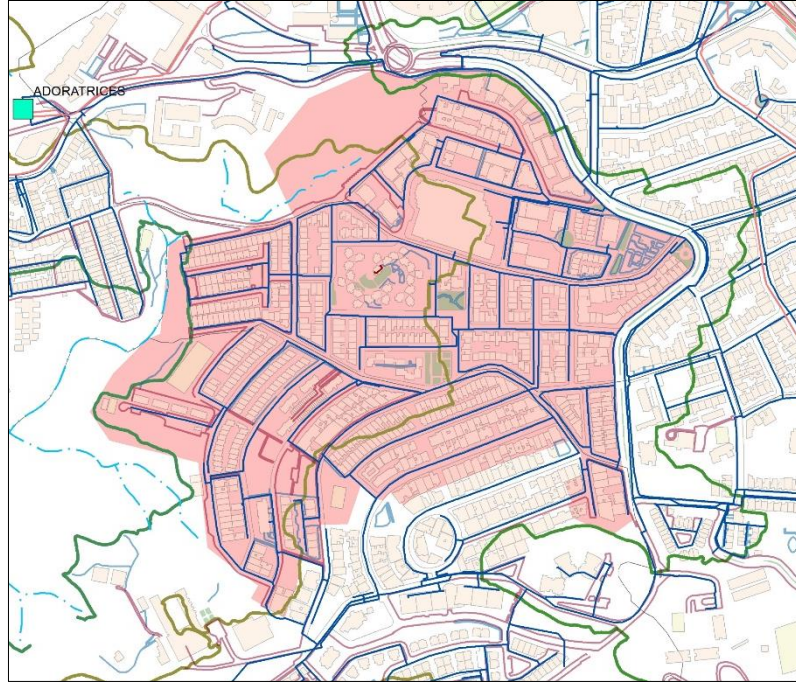


Figura 126. Determinación de las ubicaciones de las VRP para el sector T1 El Cable salida de 8" por medio de límites naturales (Elaboración propia, 2017)

Se establece la necesidad de instalar dos VRP, puesto que el sector tiene zonas independientes en la parte baja del mismo, por lo anterior se seleccionan los conductos que se encuentran próximos a la cota, en este caso el conducto ubicado en la calle 69 entre carreras 28A y 28 (P-1533), de acuerdo con el análisis geodésico solo se presenta un conducto apto para la ubicación de la VRP, por lo anterior, no se aplica el criterio de PU, pero se define la instalación de una válvula reductora de 2" sobre la tubería, y se debe cerrar la válvula ubicada en la calle 70 con carrera 28B y abrir la válvula ubicada en la calle 69 con carrera 28B, como se muestra en la Figura 127.

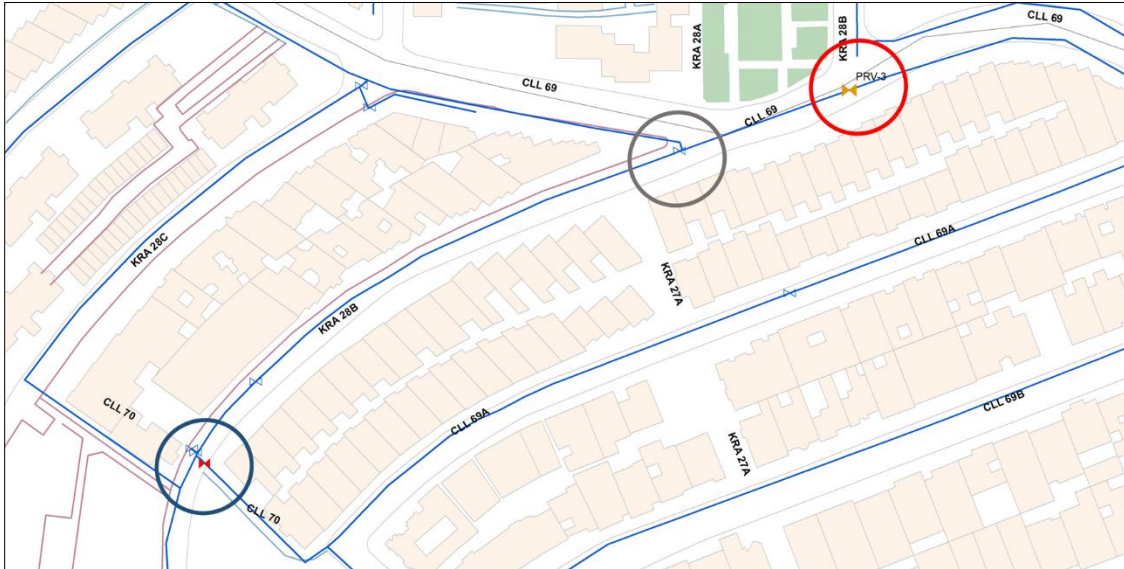


Figura 127. Ubicación óptima VRP en la calle 70 con carrera 28B, sector de Palermo para el circuito T1 El Cable salida de 8" (Elaboración propia, 2017)

La otra localización de la VRP presenta tres posibles conductos, los cuales se encuentran ubicados en la calle 68 entre carreras 28 y 28C (P-1442), calle 67 entre carreras 28 y 28A (P-1470) y en la carrera 28A entre calles 68 y 67 (P-1465), como se muestra en la Figura 128.

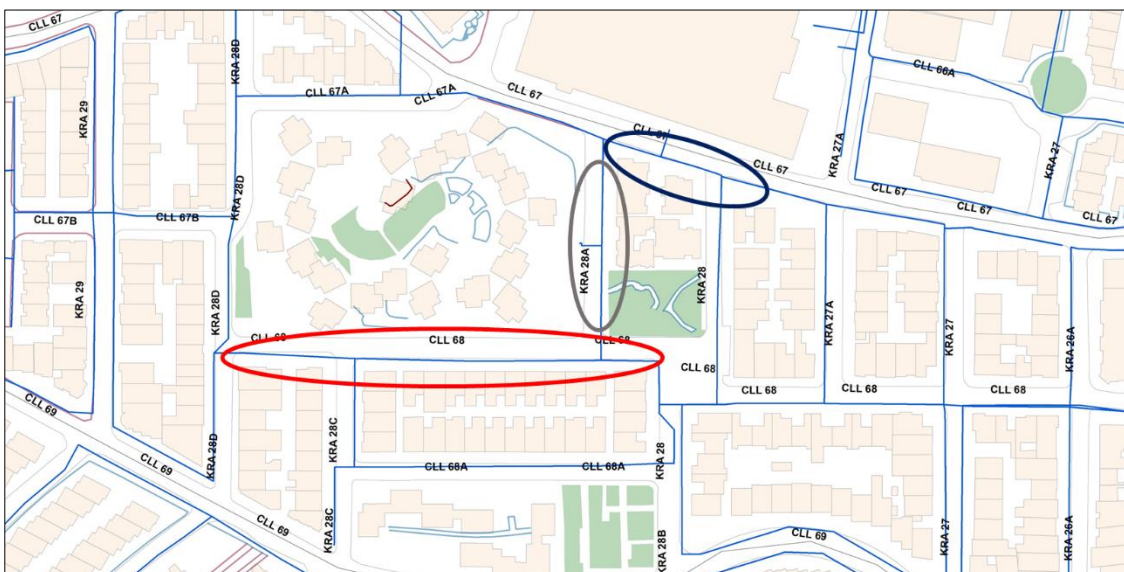


Figura 128. Determinación de las redes para la instalación de VRP en el barrio Sancancio por medio de la topología del sector (Elaboración propia, 2017)

Por medio de la aplicación de la potencia unitaria en horas de baja demanda y máxima presión, se determina que la tubería P-1442 es la óptima para la ubicación de la VRP, por tener un mayor valor de la PU y una amplia importancia dentro del sistema, en búsqueda del control del exceso de energía (Tabla 20).

Tabla 20. Análisis de la Potencia Unitaria de las redes para la instalación de VRP en el barrio Sancancio (Elaboración propia, 2017)

Cota Crítica Sector Sancancio Zona Superior (m)		2060,16	CÁLCULO PU SEGÚN LÍMITES NATURALES		
Rango entre regulación de presión (m)		35			
Cota Instalación Válvula (m)		2095			
Tubería	Presiones	Caudales		PU	
P-1442	Rango de presiones (psi)	84,76	Q (lps)	0,19	0,54
		81,94			
P-1470	Rango de presiones (psi)	92,61	Q (lps)	0,12	1,42
		80,76			
P-1465	Rango de presiones (psi)	87,6	Q (lps)	0,12	1,12
		78,29			

En la definición del sector se determinó la instalación de una válvula reductora de 2" sobre la tubería P-1442 en la calle 68 entre carreras 28 y 28C con la consigna de 35 psi, adicional se requiere cambiar la tubería de esta localización por un conducto de 4" PVC, para reducir las pérdidas por fricción, y para garantizar el paso del agua por esta zona se debe cerrar las válvulas ubicadas en la carrera 28A entre calles 68 y 67 y en la calle 68A entre carreras 28B y 28C e instalar una válvula en la calle 67 entre carreras 28 y 28A, como se observa en la Figura 129.



Figura 129. Ubicación óptima de VRP en el barrio Sancancio (Elaboración propia, 2017)

En la parte alta del sector se realiza el mismo procedimiento utilizado para la ubicación de la válvulas reguladoras, por lo mismo, se determina la cota crítica dada como la 2095 m.s.n.m., y el rango de presión de 35 metros, ubicando la cota para la instalación de la válvula en la 2130 m.s.n.m., seleccionando los conductos que se encuentran próximos a la cota, de acuerdo con el análisis geodésico solo se presenta un conducto apto para la ubicación de la VRP, por lo anterior, no se aplica el criterio de PU, pero se define la instalación de una válvula reductora de 4" sobre la tubería ubicada en la carrera 24 entre calles 65A y 66 (P-1414), como se muestra en la Figura 130.

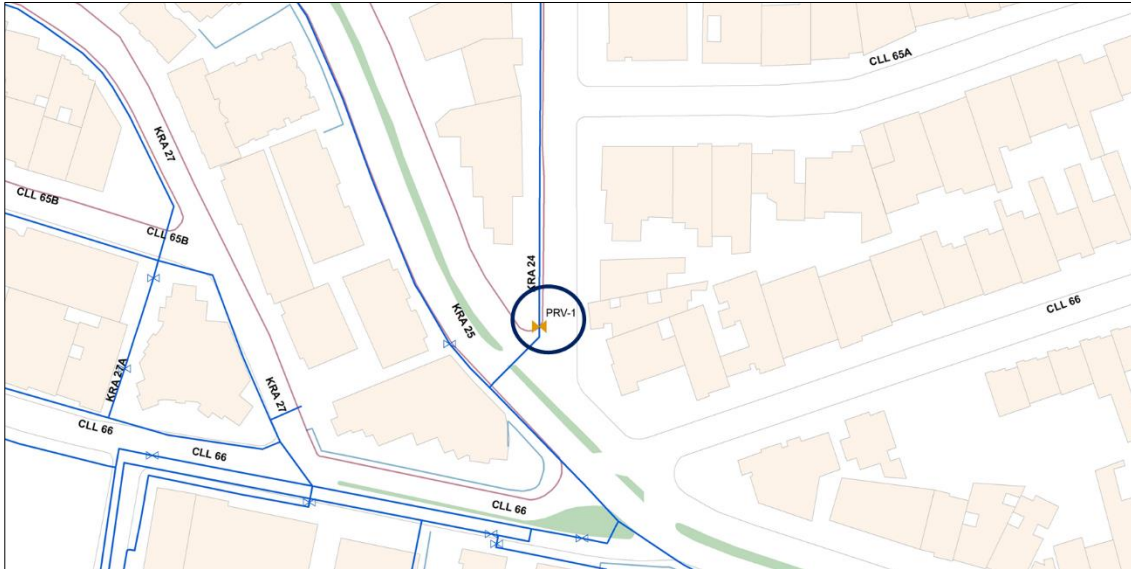


Figura 130. Ubicación óptima VRP en la carrera 24 entre calles 65A y 66, sector de Guayacanes para el circuito T1 El Cable salida de 8" (Elaboración propia, 2017)

Los resultados obtenidos por medio de aplicar esta metodología se presentan en la Figura 131, donde se muestran las presiones obtenidas, considerando una reducción importante en la energía excesiva que tenía el sistema y logrando tener una homogeneidad de acuerdo con los rangos establecidos de presión, de 21 psi a 85 psi, a su vez en la Figura 132 se presenta que las velocidades del sector son aceptables, dada las conexiones realizadas para evitar las pérdidas en las redes y permite considerar que es un sector con alta capacidad hidráulica para futuros proyectos de expansión.

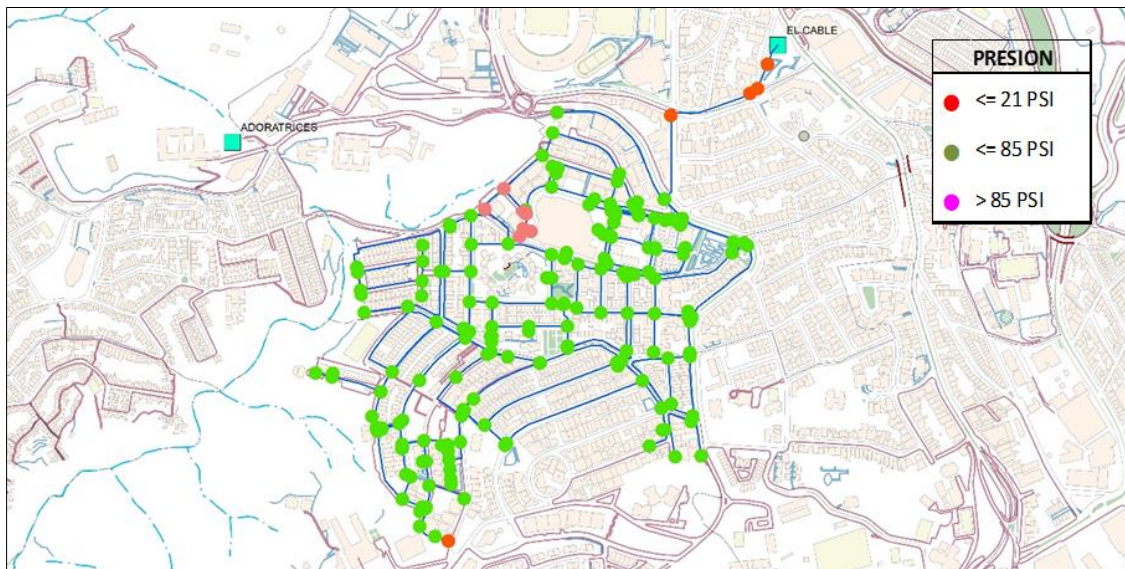


Figura 131. Presiones en el circuito optimizado T1 El Cable salida de 8" (Elaboración propia, 2017)

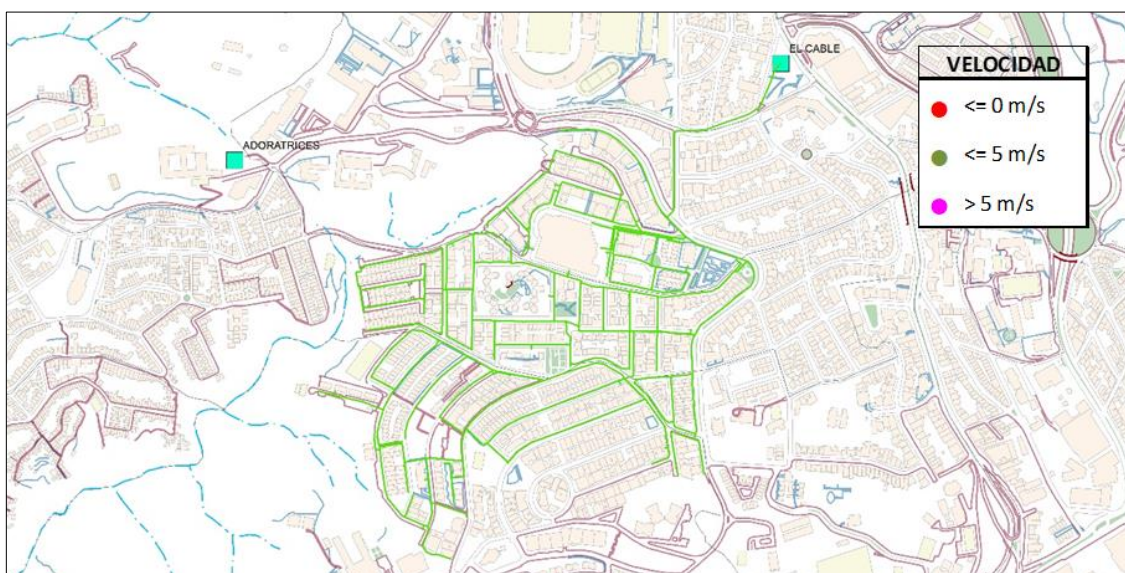


Figura 132. Velocidades en el circuito optimizado T1 El Cable salida de 8" (Elaboración propia, 2017)

Finalmente, en la Figura 133 se presenta el estado de las válvulas de cierre/apertura considerando la necesidad de cerrar algunos tramos de tubería para ser ideal el paso del flujo de agua hacia el sector por los conductos regulados y así cumplir con el objetivo propuesto.

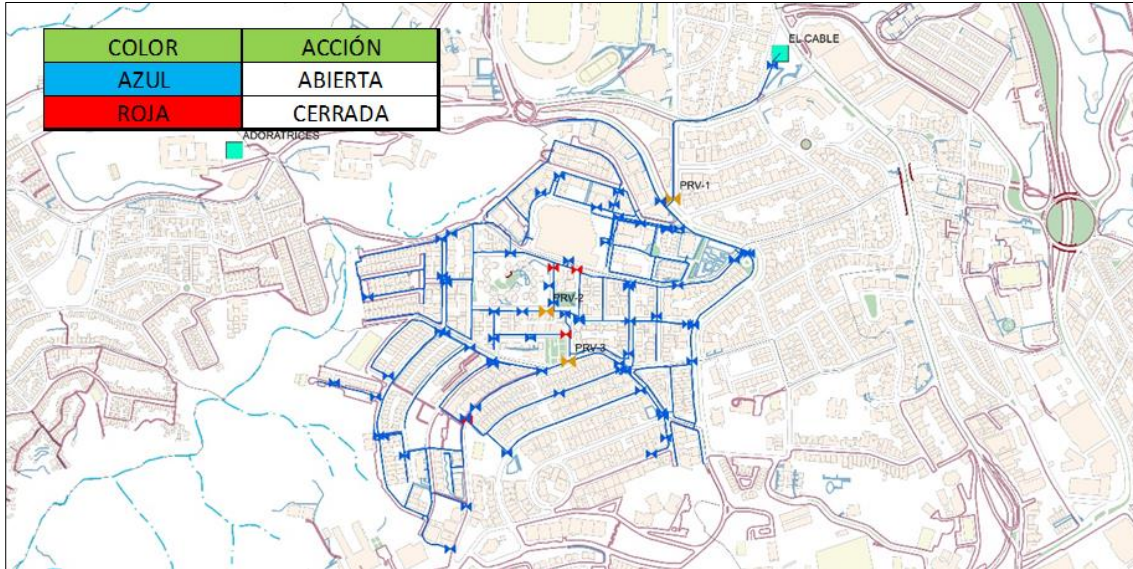


Figura 133. Estado válvulas de cierre/apertura en el circuito optimizado T1 El Cable salida de 8" (Elaboración propia, 2017)

En respeto, con la función objetivo se tiene que el sector hidráulico maximizó las presiones apropiadas según los rangos estipulados como se observa en la Figura 134, teniendo en cuenta que se pasó de tener un 43,78% de presiones apropiadas a lograr un 93,90% de presiones apropiadas, lo cual indica un aumento superior al 50% de las mismas y se considera una medida eficiente para mejorar el comportamiento del sistema.

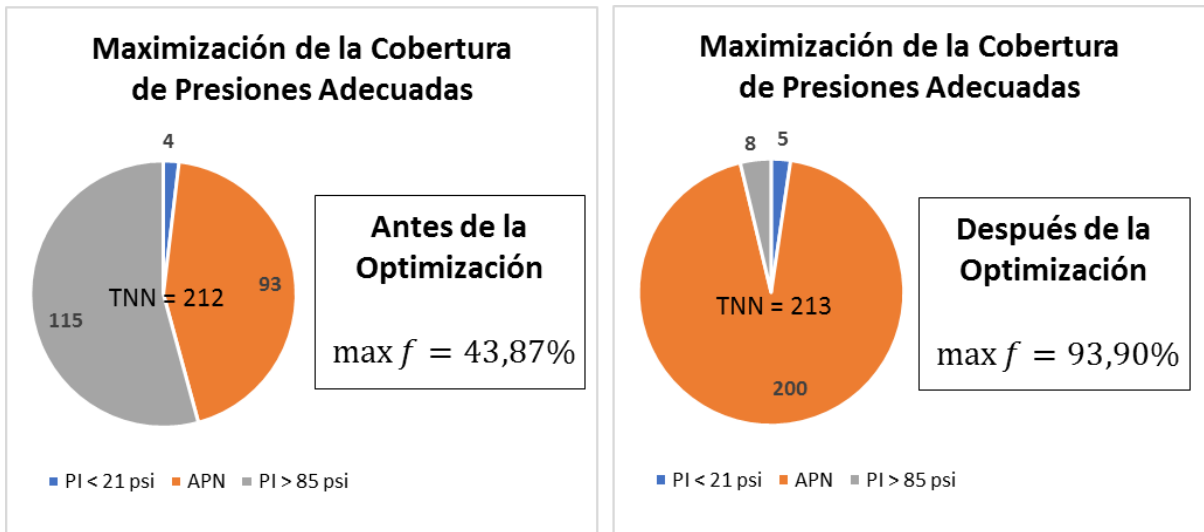


Figura 134. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito T1 El Cable salida de 8", antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017)

T23B DERIVACIÓN DE 14 HF

El sector inicialmente tiene presiones superiores a las estipuladas, por lo anterior se enfoca la optimización en la reducción de la energía en el sistema, por medio de la instalación de válvulas reguladoras y la unificación del abastecimiento de las zonas. El procedimiento planteado para lograr los objetivos es el siguiente.

Según la estructura del sector se presenta que existen varios rangos de presión definidos cada 35 metros de desnivel, teniendo en cuenta que el sector es demasiado largo y variable, se define como cota crítica la de mínima presión dada como la 2232 m.s.n.m., y generando los rangos de presión como se muestra en la Figura 135, adicional, es importante considerar la amplia existencia de VRP en el sector que permiten ajustar su consigna y hacer más eficiente el aprovechamiento de los recursos.

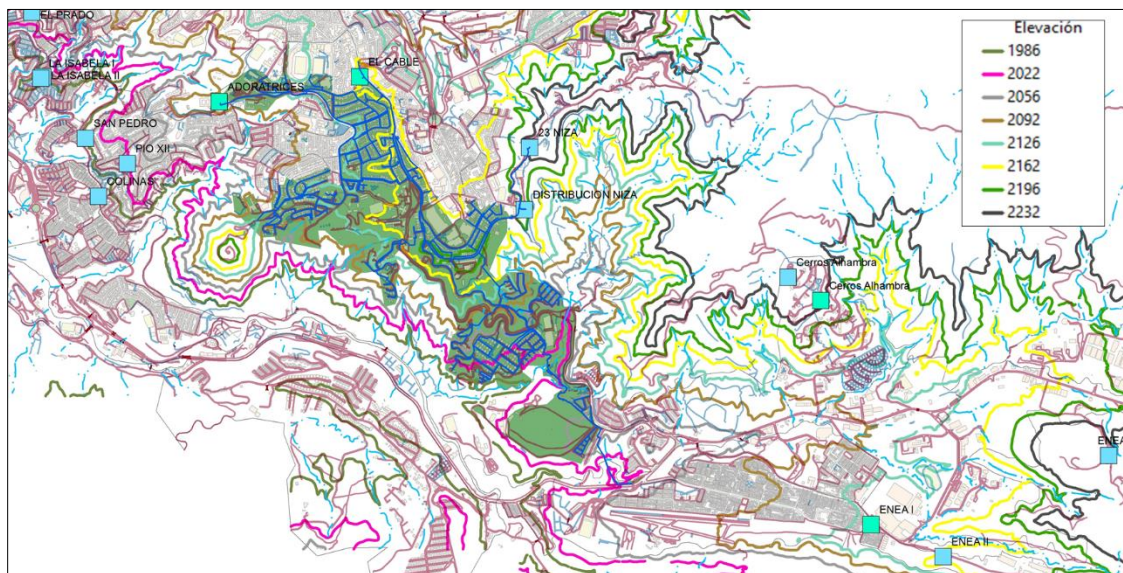


Figura 135. Determinación de las ubicaciones de las VRP para el sector T23B derivación de 14 HF por medio de límites naturales (Elaboración propia, 2017)

Por los bastos cambios de nivel, es necesario analizar la ubicación de válvulas por medio de los rangos de presión, por consiguiente, el proceso se define de acuerdo con las cotas posibles para la ubicación de las VRP.

Elevación 2196 m.s.n.m.

- En esta ubicación no es necesario la instalación de VRP, considerando que el inicio del sector es un tanque que genera el quiebre de las presiones.

Elevación 2161 m.s.n.m.

- Se debe ajustar la consigna de la válvula reguladora de nomenclatura 27236VC a 35 psi, ubicada a la entrada del edificio de la ANDI para reducir la energía que llega al barrio Tejares, como se muestra en la Figura 136.

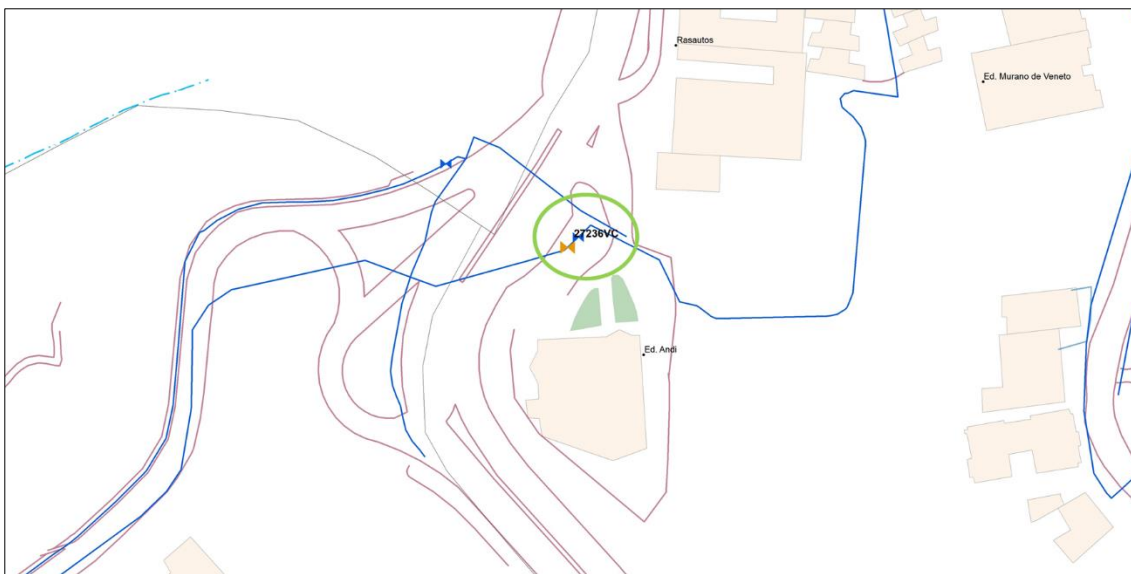


Figura 136. Ubicación de válvula 27236VC (Elaboración propia, 2017)

- Se debe ajustar la consigna de la válvula reguladora de nomenclatura 32034VC a 35 psi, ubicada detrás del colegio Santa Inés (sector del Alto el Perro), para reducir la energía que llega al barrio El Trébol, como se muestra en la Figura 137.

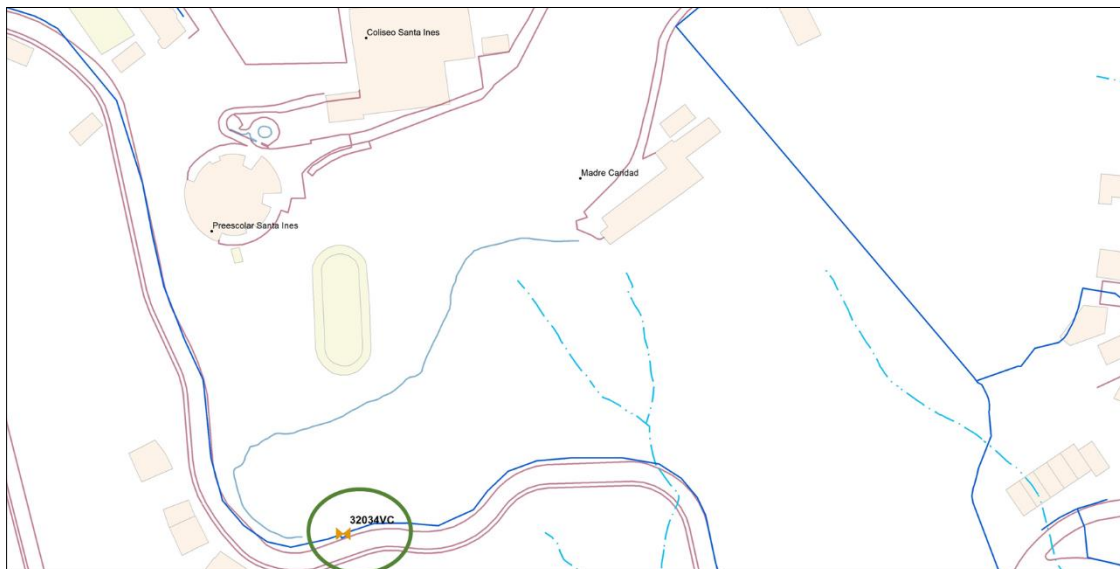


Figura 137. Ubicación de válvula 32034VC (Elaboración propia, 2017)

- Por medio del análisis de la geodesia del sector, se determina que la localización de la VRP presenta tres posibles conductos, los cuales se encuentran ubicados en la carrera 23B con calle 71 (P-1947), calle 70A entre carreras 23 y 23B (P-2031) y en la calle 69A entre carreras 23 y 23B (P-1972) y mediante el cálculo de la potencia unitaria en horas de baja demanda y máxima presión, se determina que la tubería P-1947 es la óptima para la ubicación de la VRP, por tener un mayor valor de la PU y una amplia importancia dentro del sistema, en búsqueda del control del exceso de energía (Tabla 21).

Tabla 21. Análisis de la Potencia Unitaria de las redes para la instalación de VRP en el barrio Palermo (Elaboración propia, 2017)

Cota Critica Sector Palermo (m)		2126	CÁLCULO PU SEGÚN LIMITES NATURALES		
Rango entre regulación de presión (m)		35			
Cota Instalación Válvula		2161			
Tubería	Presiones		Caudales	PU	
P-1947	Rango de presiones (psi)	98,14	Q (lps)	8,97	244,19
		70,91			

P-2031	Rango de presiones (psi)	97,13	Q (lps)	0,53	1,01
		95,22			
P-1972	Rango de presiones (psi)	102,01	Q (lps)	2,35	25,69
		91,07			

En la definición del sector se determinó la instalación de una válvula reductora de 6" sobre la tubería P-1947 en la carrera 23B con calle 71 con la consigna de 35 psi, adicional se requiere abrir la válvula ubicada en la carrera 23B con calle 70 y la válvula ubicada en la carrera 23 con calle 70A e instalar dos válvulas de cierre en la calle 70A entre carreras 23 y 23B y la otra en calle 69A entre carreras 23 y 23B, como se observa en la Figura 138.



Figura 138. Ubicación óptima de VRP en el barrio Palermo (Elaboración propia, 2017)

Elevación 2126 m.s.n.m.

- Se debe ajustar la consigna de la válvula reguladora de nomenclatura 27195VC a 35 psi, ubicada en la entrada al conjunto loma verde para reducir la energía que llega al sector, como se muestra en la Figura 139.

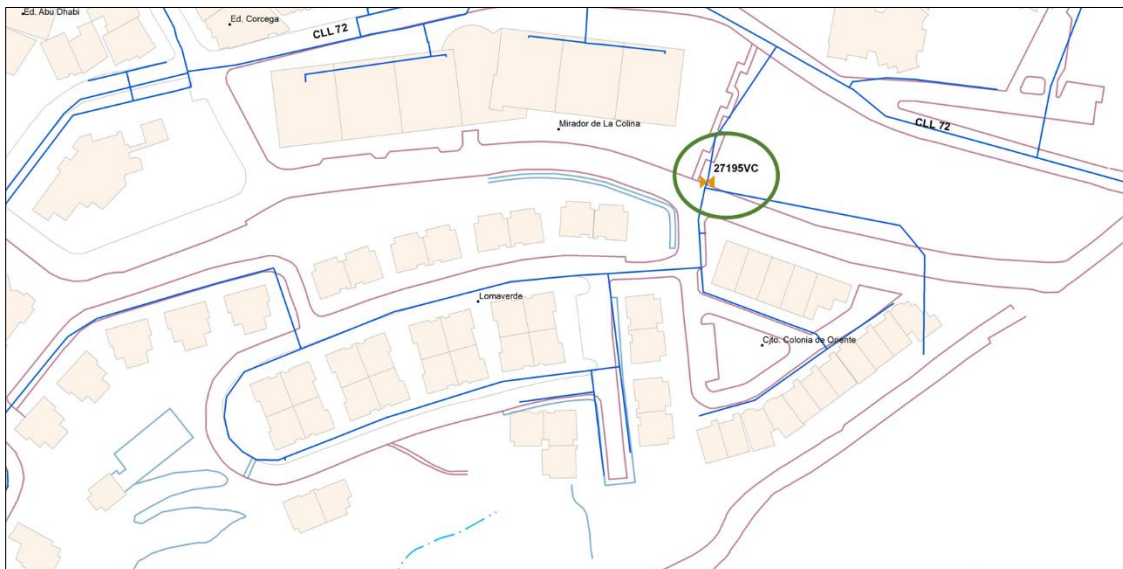


Figura 139. Ubicación de válvula 27195VC (Elaboración propia, 2017)

- Según el análisis geodésico definido se presenta un único conducto apto para la ubicación de la VRP, por lo anterior, no se aplica el criterio de PU, pero se define la instalación de una válvula reductora de 1" sobre la tubería ubicada en la parte baja de Tejares (P-1899), como se muestra en la Figura 140.

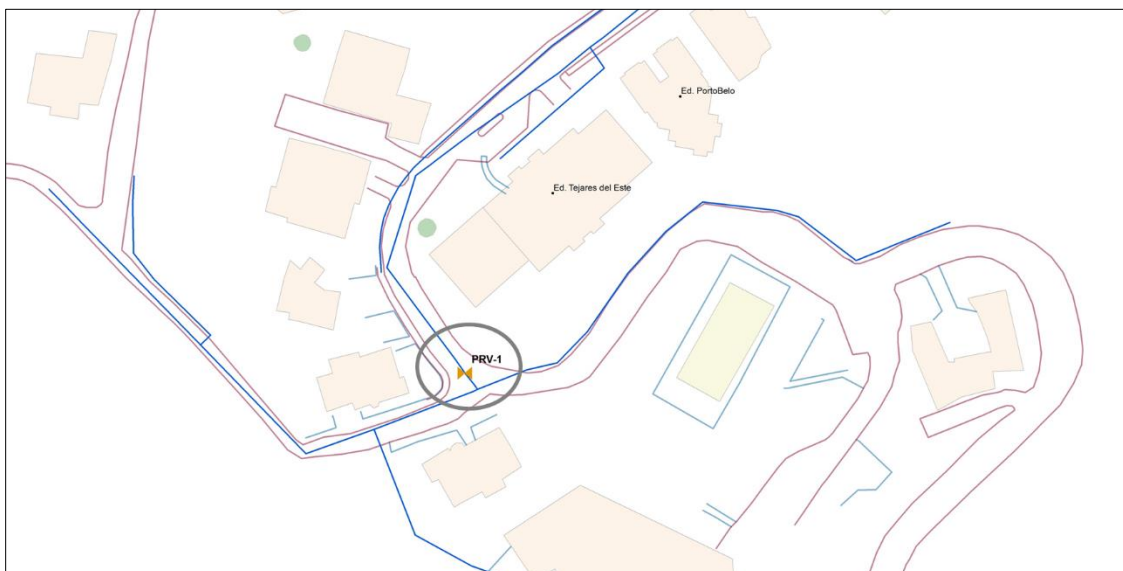


Figura 140. Ubicación óptima VRP en el barrio Tejares, para el circuito T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)

- En el sector de Palermo existe una VRP de nomenclatura 27272VC, considerando que su consigna inicial cumple los criterios de presiones admisibles, no es necesario la regulación de la misma (Figura 141).

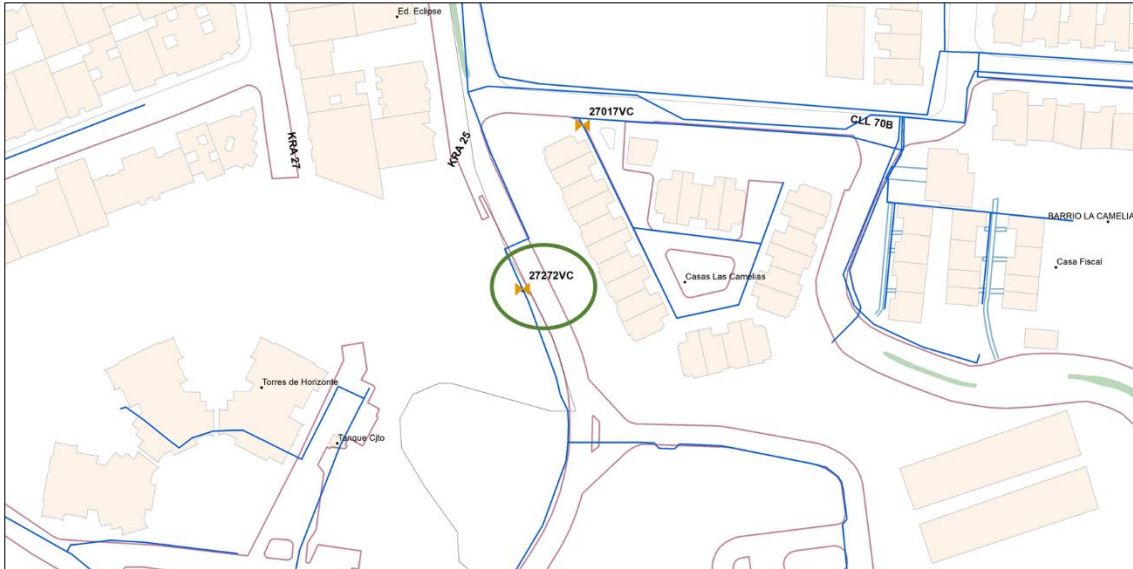


Figura 141. Ubicación de válvula 27272VC (Elaboración propia, 2017)

Elevación 2091 m.s.n.m.

- Se debe ajustar la consigna de la válvula reguladora de nomenclatura 32035VC a 35 psi, ubicada en la entrada al conjunto bosques de la sierra (sector de la Av. Alberto Mendoza), para reducir la energía que llega al sector, como se muestra en la Figura 142.

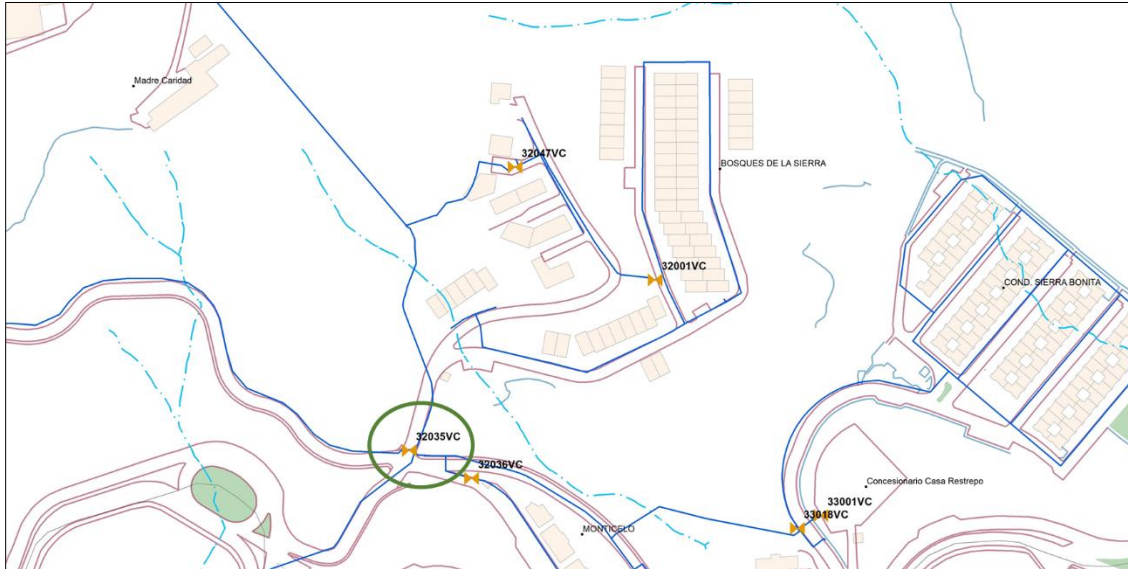


Figura 142. Ubicación de válvula 32035VC (Elaboración propia, 2017)

Elevación 2056 m.s.n.m.

- Se debe ajustar la consigna de las válvulas reguladoras de nomenclatura 33003VC - 33004VC que se encuentran en serie y las válvulas reguladoras de nomenclatura 33005VC - 33034VC que se encuentran en paralelo a 35 psi, ubicadas a la en la calle 83 con carrera 28 (sector de la Av. Alberto Mendoza), para reducir la energía que llega al sector, como se muestra en la Figura 143.

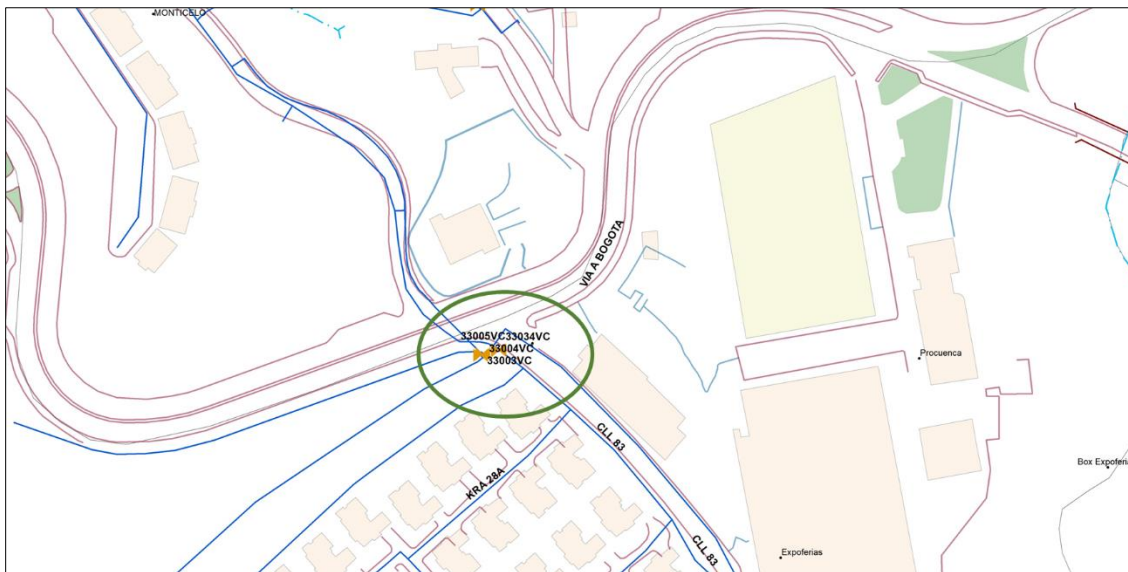


Figura 143. Ubicación de válvula 33003VC - 33004VC y 33005VC - 33034VC (Elaboración propia, 2017)

- Según el análisis geodésico definido se presenta un único conducto apto para la ubicación de la VRP, por lo anterior, no se aplica el criterio de PU, pero se define la instalación de una válvula reductora de 1" sobre la tubería ubicada en la urbanización Arboletes (P-1878), como se muestra en la Figura 144.

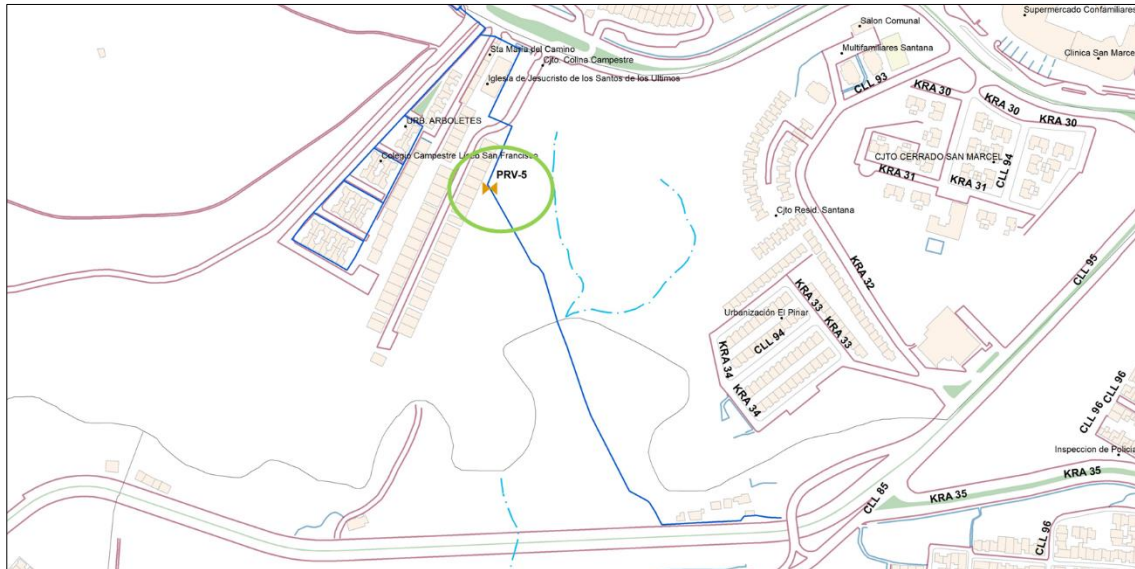


Figura 144. Ubicación óptima VRP en la urbanización Arboletes, sector de San Marcel para el circuito T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)

Elevación 2021 m.s.n.m.

- No es posible la instalación de regulación para el sector que se encuentra debajo de este rango de altura, puesto que el sector que abastece se encuentra ubicado en una elevación mayor, como se presenta en el sector de la Av. Alberto Mendoza (sector de Chachafrutos), pasando por expo ferias y abasteciendo los conjuntos Sierra Verde y Monteverde ubicados en el barrio San Marcel, por lo anterior solo es posible la instalación de dos VRP de 1" en tramos puntuales ubicados en el barrio El Trébol como se muestra en la Figura 145.



Figura 145. Ubicación óptima VRP en el barrio El Trébol para el circuito T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)

Finalmente, los resultados obtenidos por medio de aplicar esta metodología se presentan en la Figura 146, donde se muestran las presiones obtenidas, considerando una reducción importante en la energía excesiva que tenía el sistema y logrando tener una homogeneidad de acuerdo con los rangos establecidos de presión, de 21 psi a 85 psi, a su vez en la Figura 147 se presenta que las velocidades del sector son aceptables, dada las conexiones realizadas para evitar las pérdidas en las redes y permite considerar que es un sector con alta capacidad hidráulica para futuros proyectos de expansión.

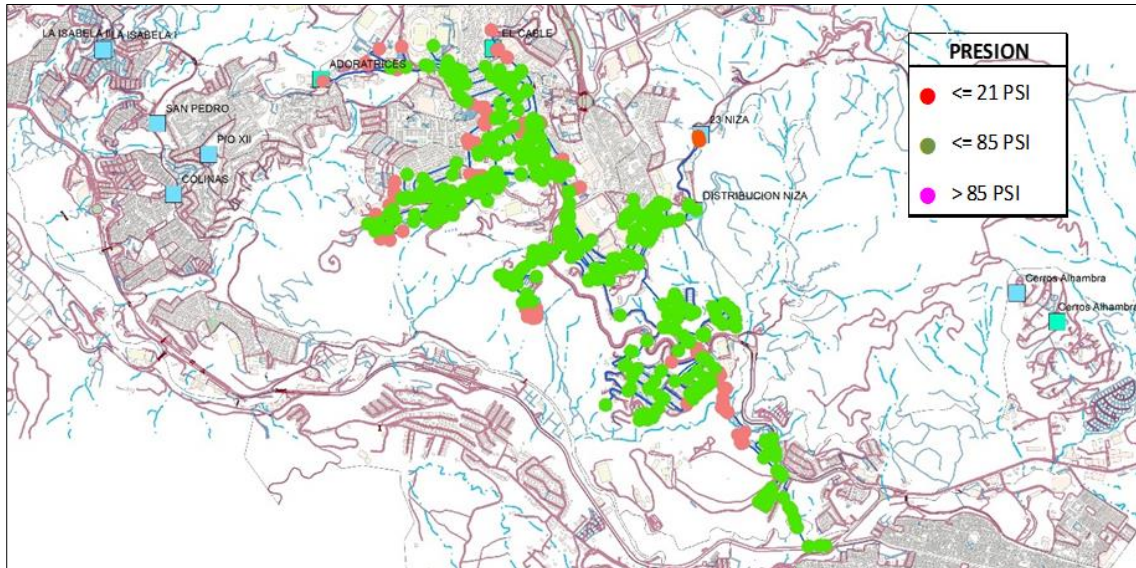


Figura 146. Presiones en el circuito optimizado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)

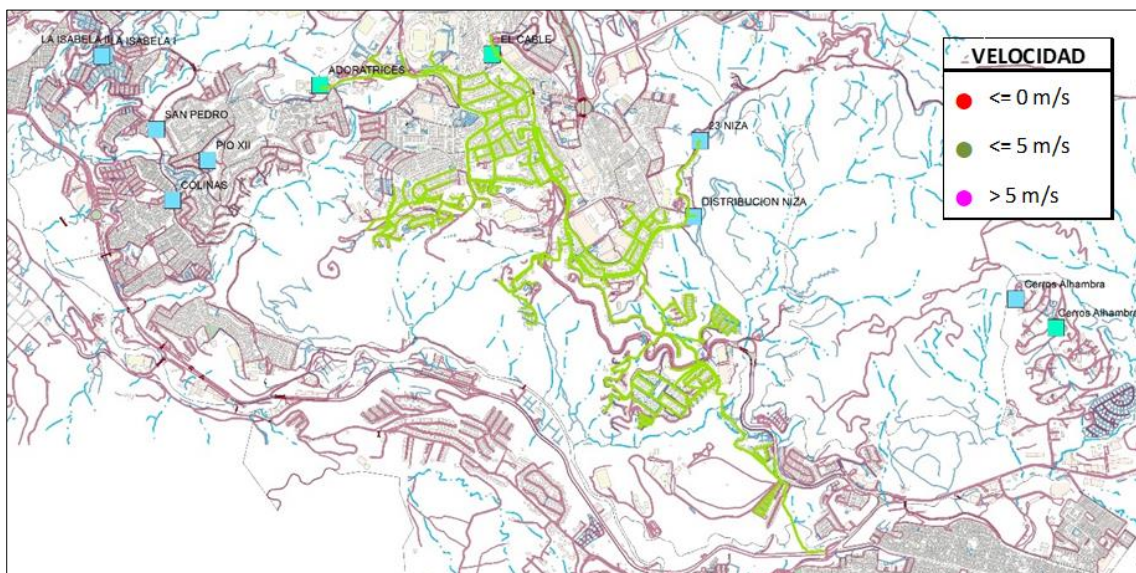


Figura 147. Velocidades en el circuito optimizado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)

Finalmente, en la Figura 148 se presenta el estado de las válvulas de cierre/apertura considerando la necesidad de cerrar algunos tramos de tubería para ser ideal el paso del flujo de agua hacia el sector por los conductos regulados y así cumplir con el objetivo propuesto.

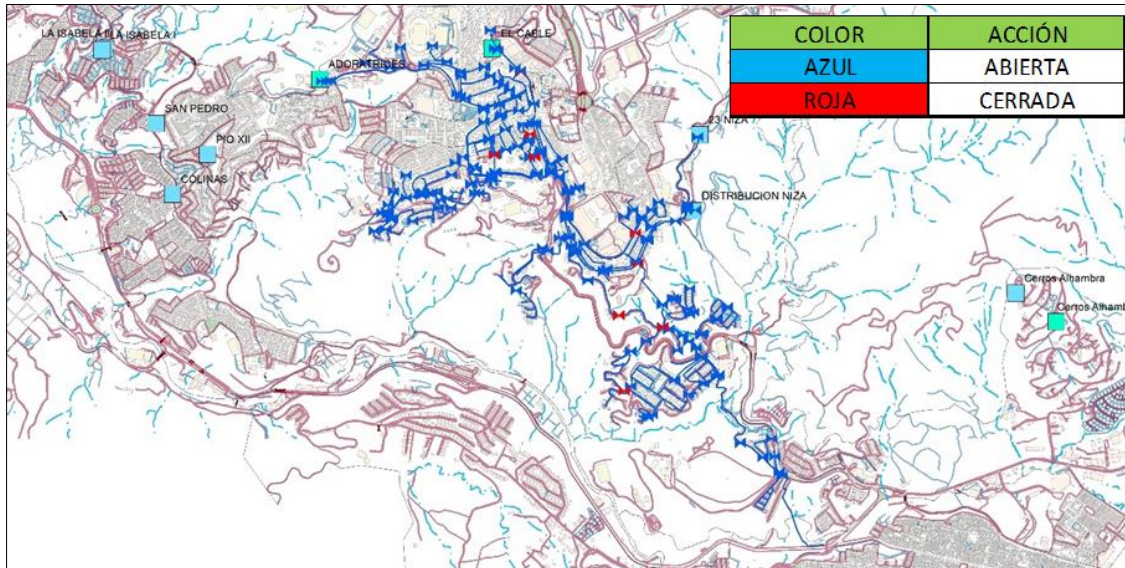


Figura 148. Estado válvulas de cierre/apertura en el circuito optimizado T23B derivación de 14 HF (Elaboración propia, 2017)

En respeto, con la función objetivo se tiene que el sector hidráulico maximizó las presiones apropiadas según los rangos estipulados como se observa en la Figura 149, teniendo en cuenta que se pasó de tener un 56,01% de presiones apropiadas a lograr un 83,43% de presiones apropiadas, lo cual indica un aumento de aproximadamente el 30% de las mismas y se considera una medida eficiente para mejorar el comportamiento y el control de los cambios bruscos que se presentan en el sistema.

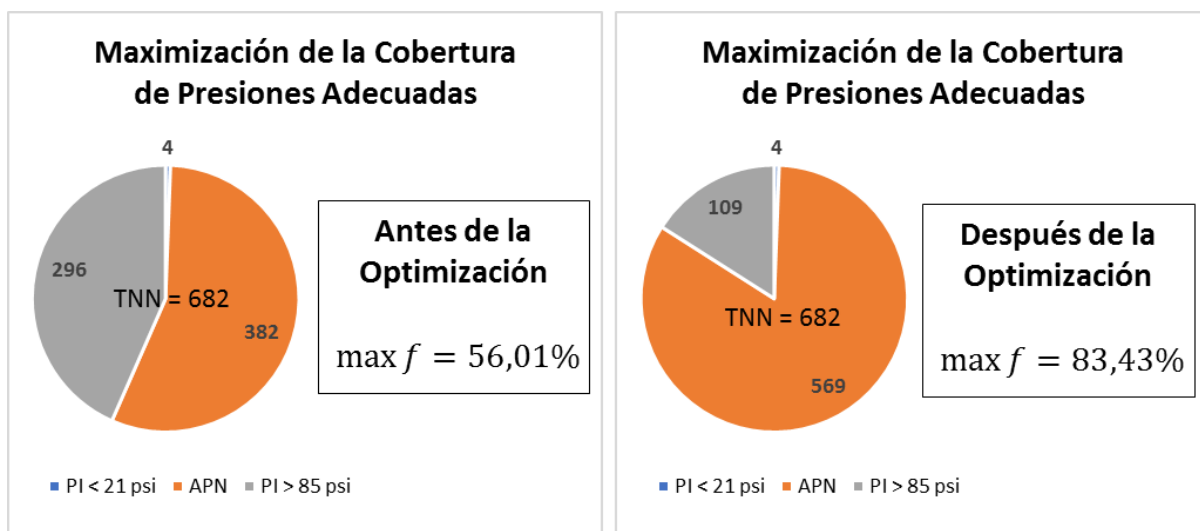


Figura 149. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito T23B derivación de 14 HF, antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017)

T23 SALIDA DE 12 ALTA SUIZA - T23 SALIDA DE 8

Por medio del planteamiento de la optimización de los sectores T23 salida de 8 y T23 salida de 12 Alta Suiza, se considera factible la unificación de los mismos en búsqueda de una mayor confiabilidad del sistema, teniendo en cuenta, la posibilidad de liberar las conducciones y así evitar afectaciones a mayor escala. El proceso utilizado fue el siguiente.

Mediante la instalación de una tubería en 6 pulgadas que permita abastecer el barrio Alta Suiza, desde la tubería que alimenta el sector T23 salida de 8 como se muestra en la Figura 150, es posible desconectar el sector hidráulico T23 salida de 12 Alta Suiza de las redes consideradas como conducciones.

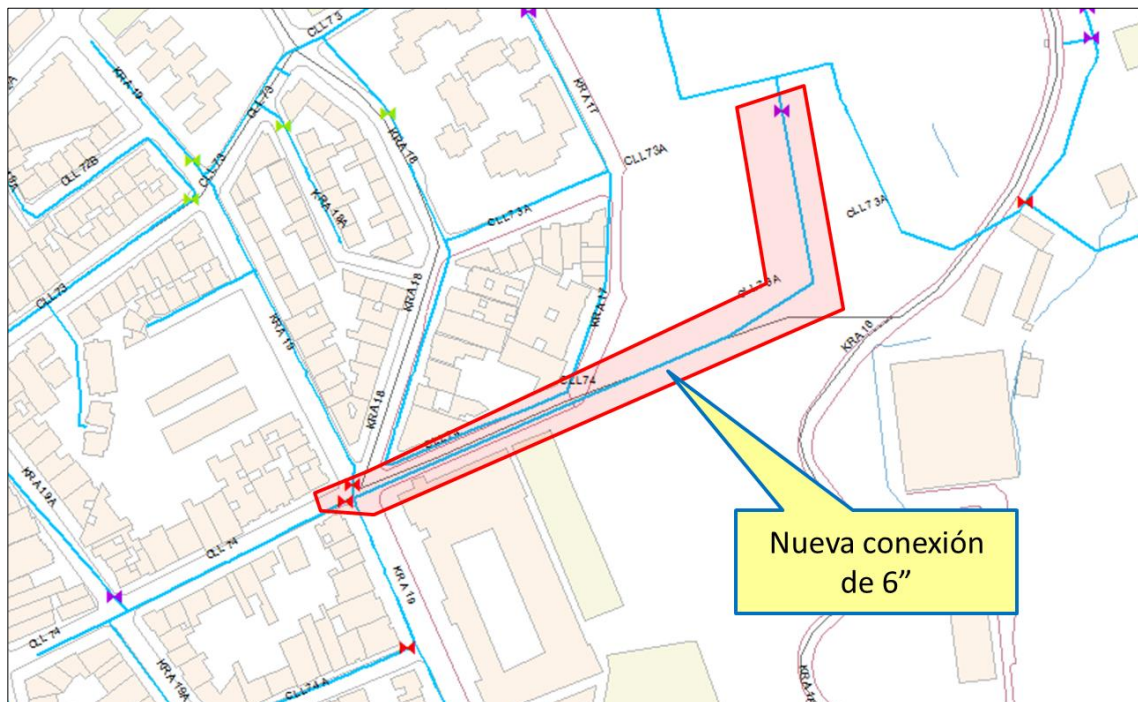


Figura 150. Nueva alimentación para el barrio Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)

Para la determinación de la localización óptima de las válvulas reguladoras se analizaron los sectores de forma independiente para luego realizar su unión, considerando que los sectores serán derivados de la misma red matriz, pero con diferentes comportamientos hidráulicos, por lo anterior, es necesario la ubicación del punto crítico de cada sector (lugar

de máxima o mínima presión). De acuerdo con las características de la zona, es de mayor importancia conocer la máxima presión, puesto que la tubería matriz es expresa hasta llegar al perímetro urbano de cada barrio y tiene una menor probabilidad de ocurrencia de daños.

En búsqueda de definir la tubería más viable para la ubicación de la válvula reguladora, se requiere validar topológicamente la ubicación de la elevación correspondiente a la cota crítica dada como la 2140 m.s.n.m., y el rango de presión de 35 metros, ubicando la cota para la instalación de la válvula en la 2176 m.s.n.m., seleccionando los conductos que se encuentran próximos a la cota, en este caso el conducto ubicado en la carrera 16A (P-2452) y el conducto ubicado en la calle 72 (P-2425) como se muestra en la Figura 151.

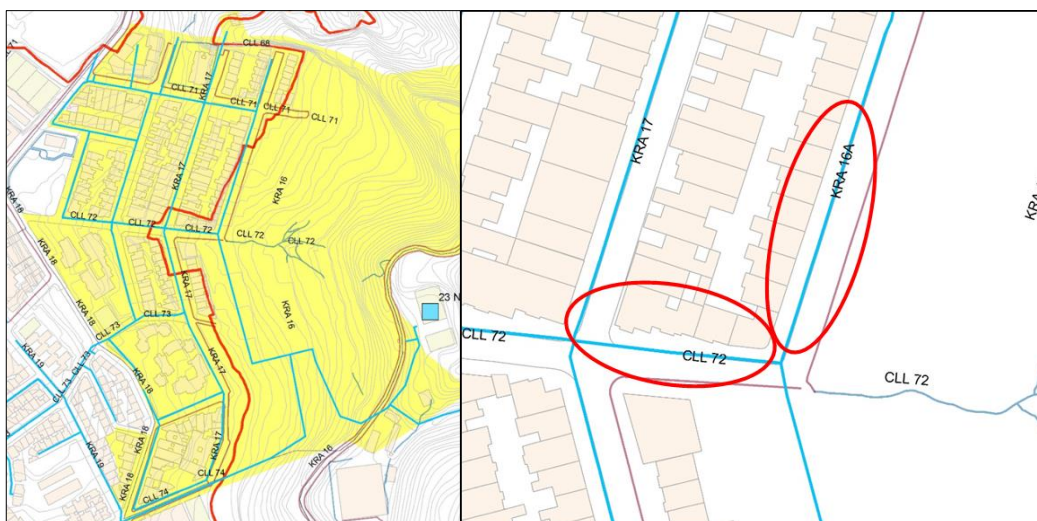


Figura 151. Determinación de las redes para la instalación de VRP en el barrio Colseguros por medio de la topología del sector (Elaboración propia, 2017)

Por medio de la aplicación de la potencia unitaria en horas de baja demanda y máxima presión, se determina que la tubería P-2452 es la óptima para la ubicación de la VRP, por tener un mayor valor de la PU y una amplia importancia dentro del sistema, en búsqueda del control del exceso de energía (Tabla 22).

Tabla 22. Análisis de la Potencia Unitaria de las redes para la instalación de VRP en el barrio Colseguros (Elaboración propia, 2017)

Cota Critica Sector Colseguros (m)		2140,74	CÁLCULO PU SEGÚN LIMITES NATURALES		
Rango entre regulación de presión (m)		35			
Cota Instalación Válvula (m)		2176			
Tubería	Presiones	Caudales		PU	
P-2452	Rango de presiones (psi)	85,35	Q (lps)	0,42	8,40
		65,35			
P-2425	Rango de presiones (psi)	77,21	Q (lps)	0,39	4,44
		65,83			

En la definición del sector se determinó la instalación de una válvula reductora de 2" sobre la tubería P-2452 en la Carrera 16A entre calles 72 y 73 con la consigna de 35 psi, adicional se requiere cerrar la válvula ubicada en la calle 72 entre carrera 17 y 16A, como se observa en la Figura 152.



Figura 152. Ubicación óptima de VRP en el barrio Colseguros (Elaboración propia, 2017)

En el barrio Alta Suiza se realiza el procedimiento utilizado en el barrio Colseguros para la ubicación de la válvula reguladora sobre la tubería más apropiada, por lo mismo, se debe validar topológicamente la ubicación de la elevación correspondiente a la cota crítica dada como la 2132 m.s.n.m., y el rango de presión de 35 metros, ubicando la cota para la instalación de la válvula en la 2167 m.s.n.m., seleccionando los conductos que se encuentran próximos a la cota, en este caso los conductos seleccionados son el P-2381, P-2384 y P-2362 ubicadas en la calle 74, calle 74A y transversal 72 respectivamente como se muestra en la Figura 153.

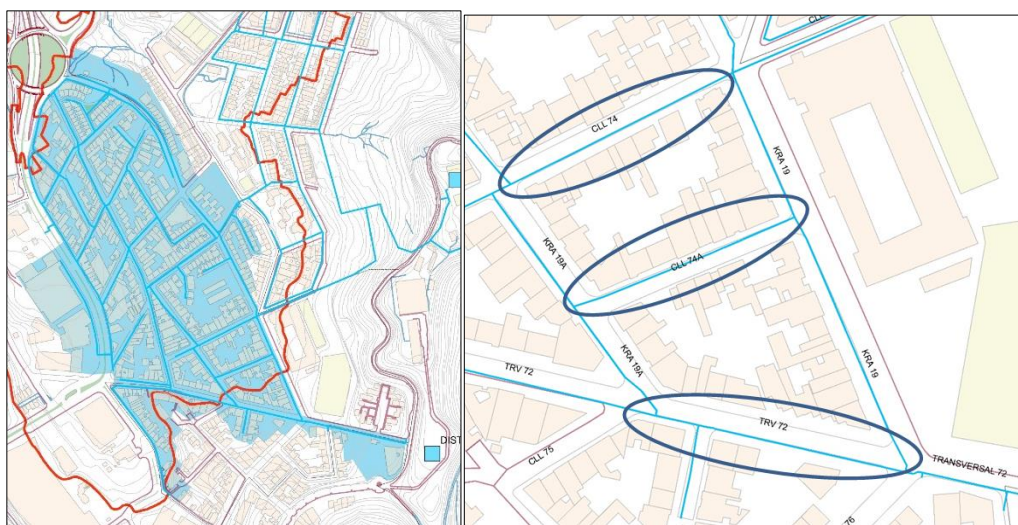


Figura 153. Determinación de las redes para la instalación de VRP en el barrio Alta Suiza por medio de la topología del sector (Elaboración propia, 2017)

Por medio de la aplicación de la potencia unitaria en horas de baja demanda y máxima presión, se determina que la tubería P-2362 es la óptima para la ubicación de la VRP, por tener un mayor valor de la PU y una amplia importancia dentro del sistema, en búsqueda del control del exceso de energía (Tabla 23).

Tabla 23. Análisis de la Potencia Unitaria de las redes para la instalación de VRP en el barrio Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)

Cota Crítica Sector Alta Suiza (m)	2131,67	CÁLCULO PU SEGÚN LIMITES NATURALES
Rango entre regulación de presión (m)	35	
Cota Instalación Válvula	2167	

Tubería	Presiones	Caudales		PU	
P-2381	Rango de presiones (psi)	93,58	Q (lps)	0,36	0,02
		93,53			
P-2384	Rango de presiones (psi)	88,58	Q (lps)	0,32	0,02
		88,51			
P-2362	Rango de presiones (psi)	83,52	Q (lps)	1,16	6,41
		77,99			

En la definición del sector se determinó la instalación de una válvula reductora de 2" sobre la tubería P-2362 en la transversal 72 entre carreras 19 y 19A con la consigna de 35 psi, adicional se requiere cerrar la válvula 27120V en la calle 74 entre carreras 19 y 19A e instalar otra válvula de cierre/apertura en la calle 74A entre carreras 19 y 19A, como se observa en la Figura 154.

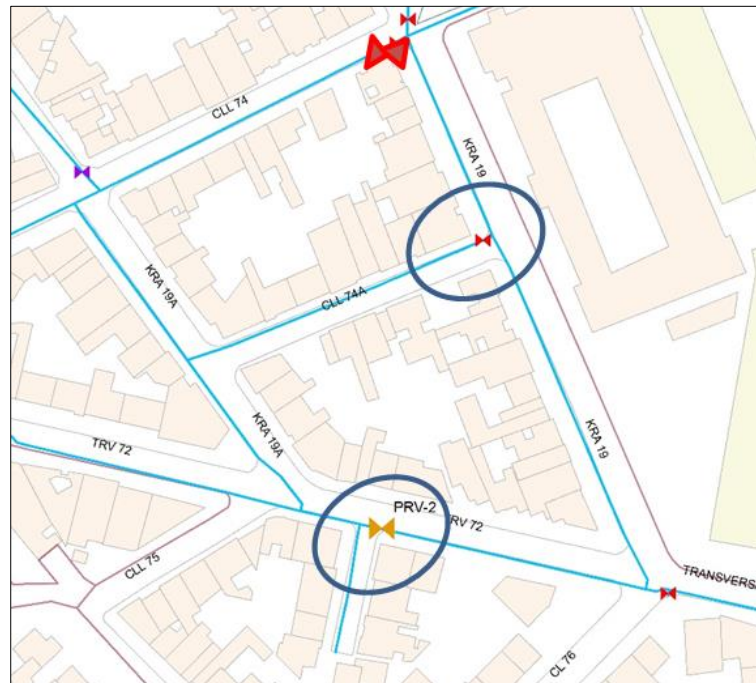


Figura 154. Ubicación óptima de VRP en el barrio Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)

Finalmente, para evitar la instalación de una reductora se debe realizar la conexión entre los nodos J-2132 y J-2197 antes de llegar al CEDER, ubicados en la carrera 18 con calle 73 como se observa en la Figura 155.

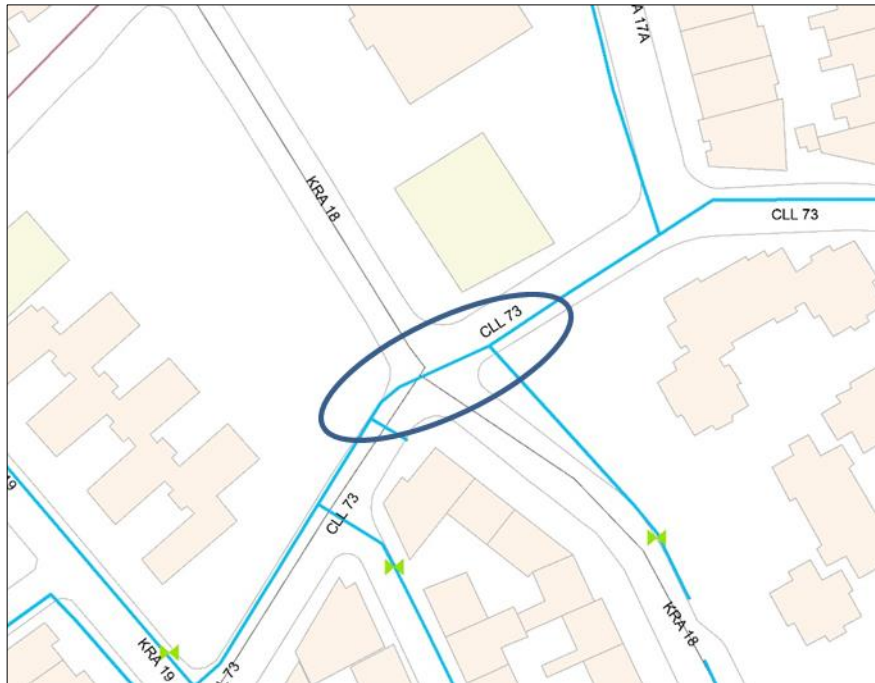


Figura 155. Conexión entre el barrio Colseguros y Alta Suiza sobre la calle 73 con carrera 18 (Elaboración propia, 2017)

Los resultados obtenidos por medio de aplicar esta metodología se presentan en la Figura 156, donde se muestran las presiones obtenidas, considerando una reducción importante en la energía excesiva que tenía el sistema y logrando tener una homogeneidad de acuerdo con los rangos establecidos de presión, de 21 psi a 85 psi, a su vez en la Figura 157 se presenta que las velocidades del sector son aceptables, dada las conexiones realizadas para evitar las pérdidas en las redes y permite considerar que es un sector con alta capacidad hidráulica para futuros proyectos de expansión.

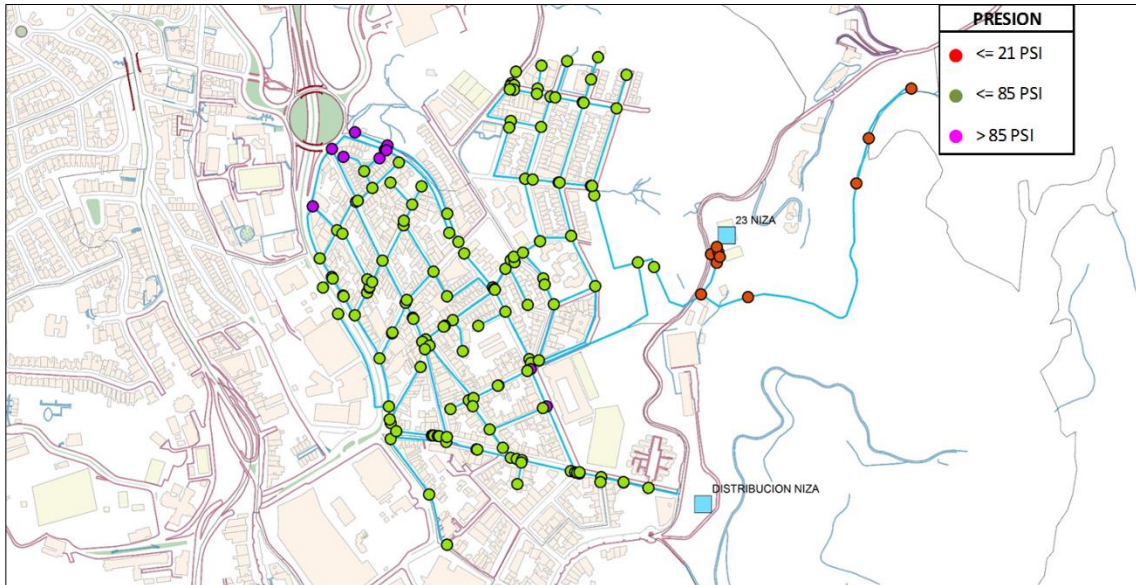


Figura 156. Presiones en el circuito optimizado T23 salida de 8 y T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)

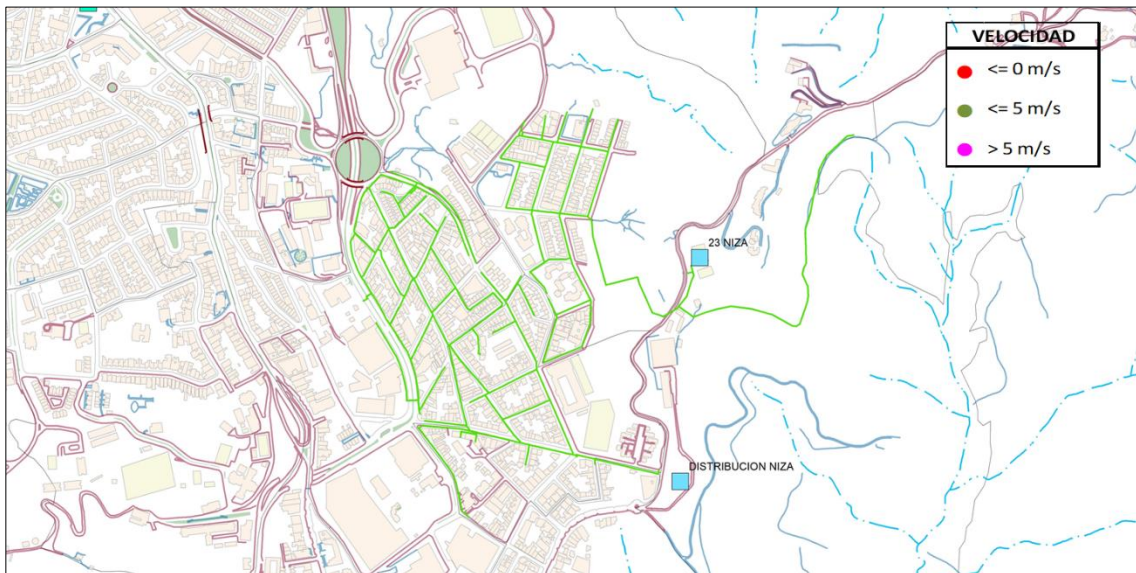


Figura 157. Velocidades en el circuito optimizado T23 salida de 8 y T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)

Finalmente, en la Figura 158 se presenta el estado de las válvulas de cierre/apertura considerando la necesidad de cerrar algunos tramos de tubería para ser ideal el paso del flujo de agua hacia el sector por los conductos regulados y así cumplir con el objetivo propuesto.

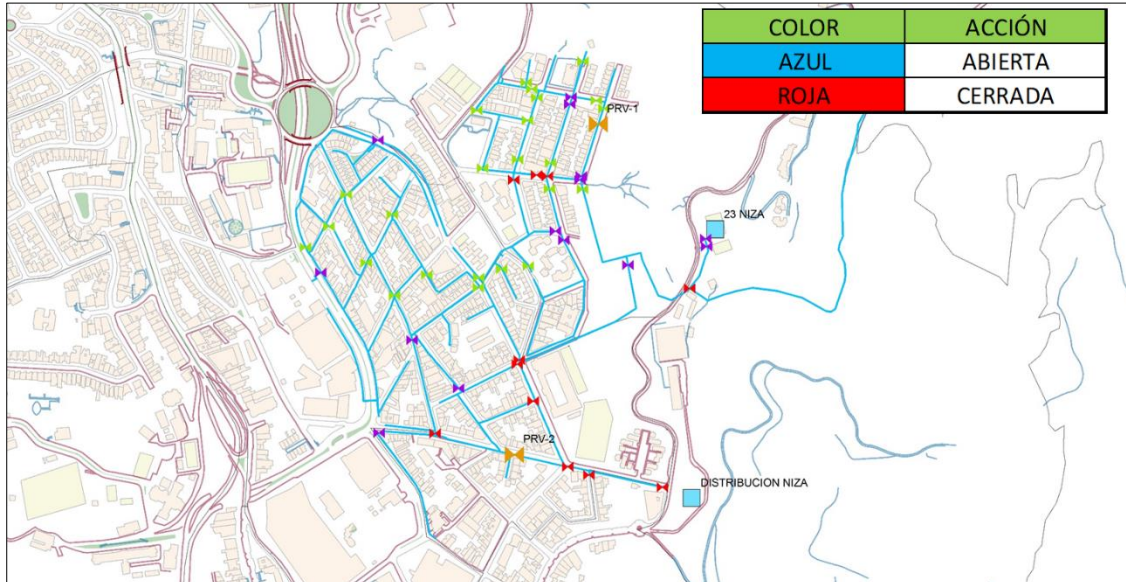


Figura 158. Estado válvulas de cierre/apertura en el circuito optimizado T23 salida de 8 y T23 salida de 12 Alta Suiza (Elaboración propia, 2017)

En respeto, con la función objetivo se tiene que el sector hidráulico maximizó las presiones apropiadas según los rangos estipulados como se observa en la Figura 159, teniendo en cuenta que se pasó de tener un 13,75% de presiones apropiadas a lograr un 88,75% de presiones apropiadas, lo cual indica un aumento de aproximadamente el 75% de las mismas y se considera una medida eficiente para mejorar el comportamiento del sistema.

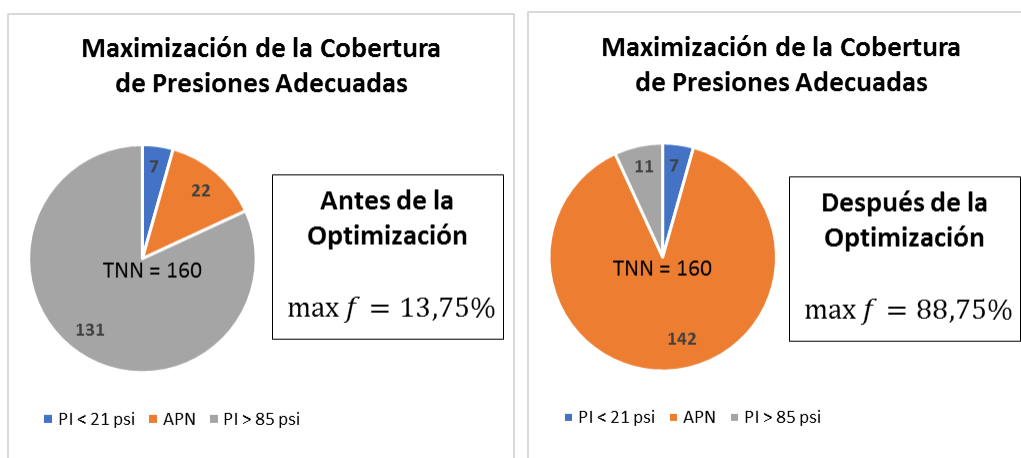


Figura 159. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito T23 salida de 8 y T23 salida de 12 Alta Suiza, antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017)

TANQUE ENEA III

El sector inicialmente tiene presiones superiores a las estipuladas, por lo anterior se enfoca la optimización en la reducción de la energía en el sistema, por medio de la instalación de válvulas reguladoras y la unificación del abastecimiento de las zonas. El procedimiento planteado para lograr los objetivos es el siguiente.

Según la estructura del sector se presenta que existen varios rangos de presión definidos cada 35 metros de desnivel, teniendo en cuenta que el sector es demasiado variable, se define como cota crítica la de mínima presión dada como la 2262 m.s.n.m., y generando los rangos de presión como se muestra en la Figura 160.

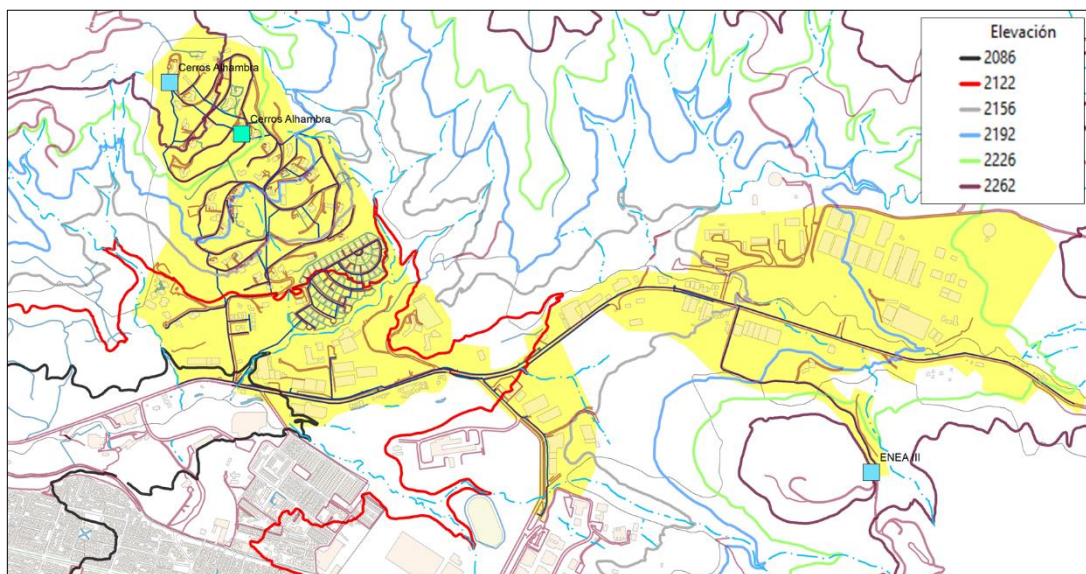


Figura 160. Determinación de las ubicaciones de las VRP para el sector Tanque Enea III por medio de límites naturales (Elaboración propia, 2017)

Por los bastos cambios de nivel el sector presenta la particularidad que tiene que abastecer zonas localizadas en las elevaciones bajas o de máxima presión, pero al mismo tiempo se tiene que abastecer sectores localizados en elevaciones altas o de mínima presión ubicadas en el mismo nivel del tanque Enea III, como se presenta la ubicación de del barrio Cerros de la Alhambra, donde es necesario mantener la presión original del sistemas para garantizar la mínima presión admisible, por consiguiente, el proceso está dado por la

regulación particular de cada gran consumidor y la necesidad de garantizar una presión adecuada para el funcionamiento de sus instalaciones y procedimientos, ya que constituyen en su mayoría el sector como se muestra en la Figura 161 y Figura 162.

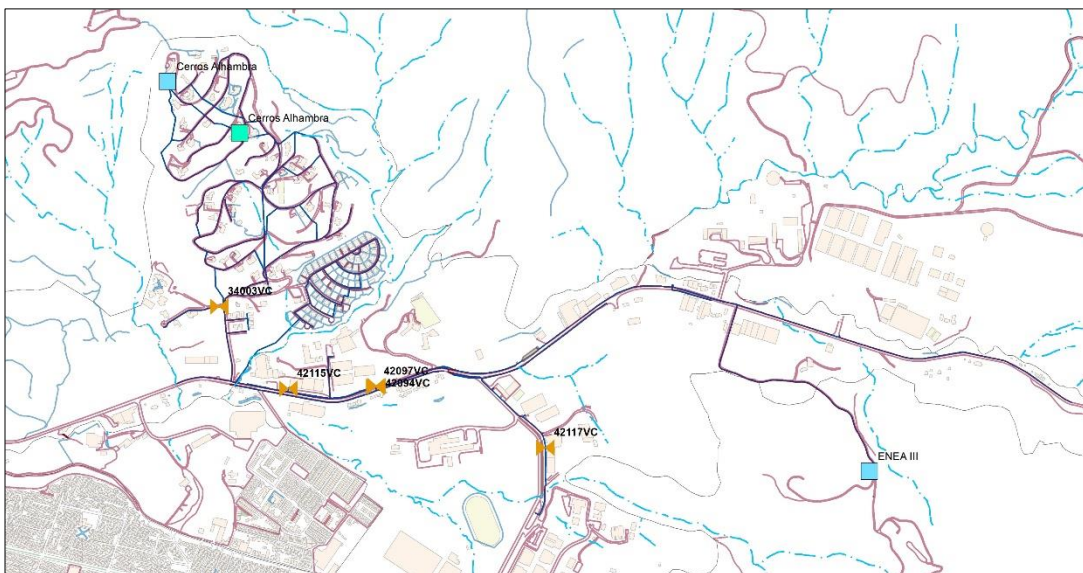


Figura 161. Localización VRP en el circuito optimizado Tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)

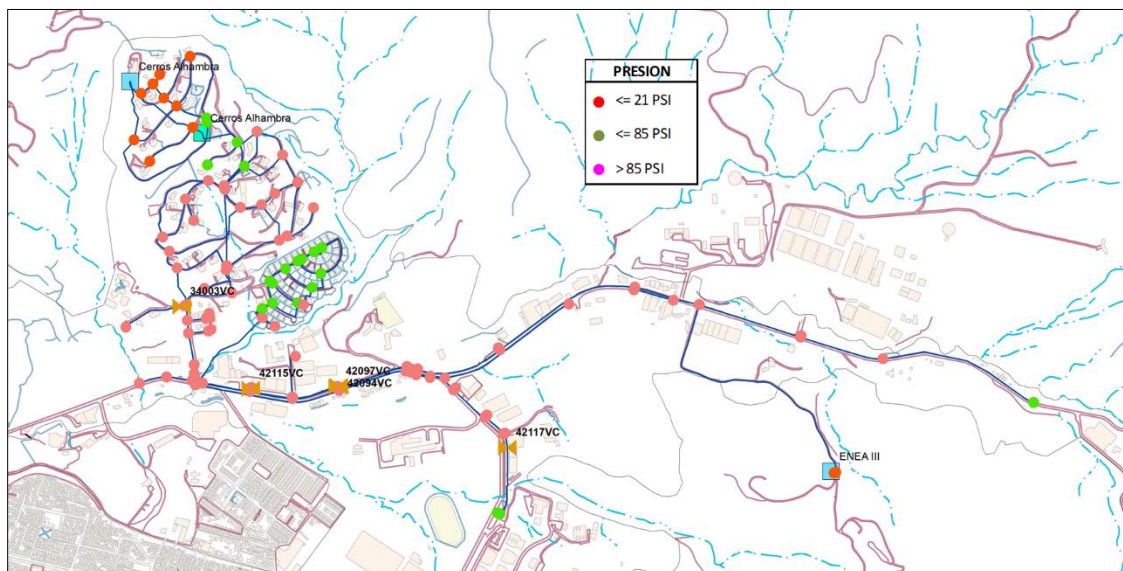


Figura 162. Estado de las presiones por medio de las VRP ubicadas en el circuito optimizado Tanque Enea III (Elaboración propia, 2017)

Por lo expresado anteriormente, se define que la variación del comportamiento de la energía en este sector hidráulico es compleja, considerando que cada gran consumidor se encuentra regulado dependiendo de sus necesidades y el sector residencial requiere una presión que se garantiza de forma mínima llegando directo. En conclusión, se determina que la estructura del sector no permite realizar una variación al comportamiento hidráulico del mismo, acotando que el funcionamiento es el adecuado para las necesidades de los usuarios.

En respeto, con la función objetivo se tiene que el sector hidráulico tiene unas presiones superiores a las apropiadas según los rangos estipulados como se observa en la Figura 163, teniendo en cuenta que presenta un 16,41% de presiones apropiadas, lo cual indica que el sector es heterogéneo en su comportamiento, pero como se explicó anteriormente es la forma ideal de funcionar el sector hidráulico por sus necesidades.

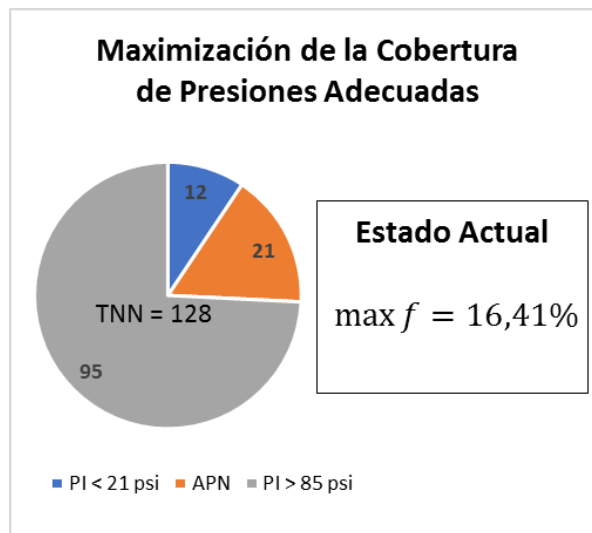


Figura 163. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito Tanque Enea III, antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017)

T33 ENEA I

El sector inicialmente tiene presiones superiores a las estipuladas, por lo anterior se enfoca la optimización en la reducción de la energía en el sistema, por medio de la instalación de válvulas reguladoras y la unificación del abastecimiento de las zonas. El procedimiento planteado para lograr los objetivos es el siguiente.

Según la estructura del sector se presenta que existen varios rangos de presión definidos cada 35 metros de desnivel, teniendo en cuenta que el sector es demasiado largo y variable, se define como cota crítica la de mínima presión dada como la 2134 m.s.n.m., y generando los rangos de presión como se muestra en la Figura 164. Adicional, es importante considerar la amplia existencia de VRP en el sector que permiten ajustar su consigna y hacer más eficiente el aprovechamiento de los recursos.

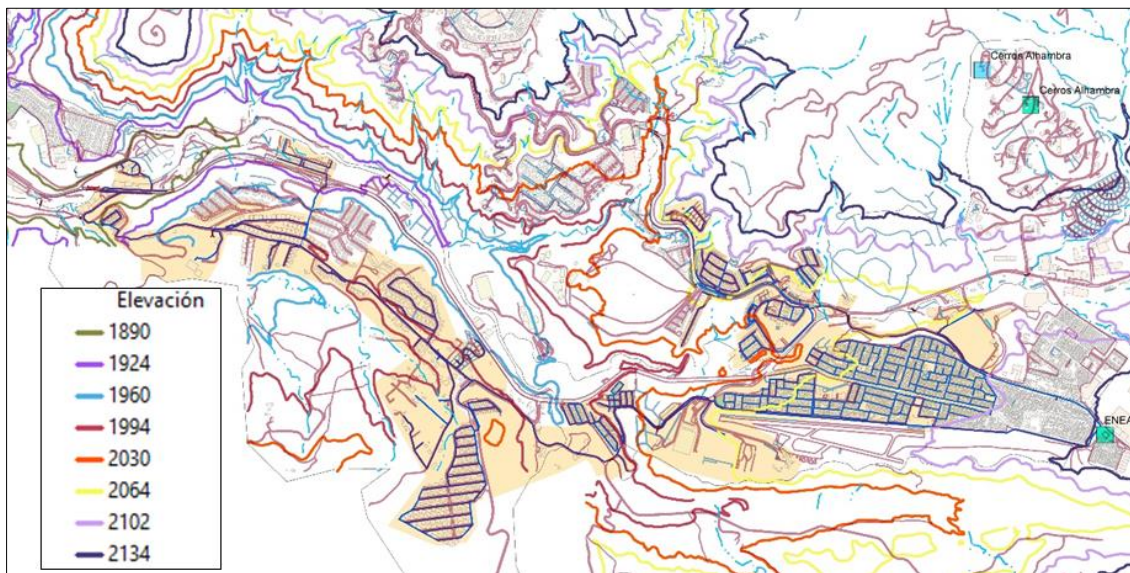


Figura 164. Determinación de las ubicaciones de las VRP para el sector T33 Enea I por medio de límites naturales (Elaboración propia, 2017)

Por los bastos cambios de nivel, es necesario analizar la ubicación de válvulas por medio de los rangos de presión, por consiguiente, el proceso se define de acuerdo con las cotas posibles para la ubicación de las VRP.

Elevación 2100 m.s.n.m.

- En esta ubicación no es necesario la instalación de VRP, considerando que el inicio del sector es un tanque que genera el quiebre de las presiones.

Elevación 2064 m.s.n.m.

- En esta ubicación para el barrio La Enea, no se considera necesaria la instalación de VRP, puesto que la presión máxima presente en la zona es de 90 psi, y se encuentra ubicada en la parte final del barrio (Figura 165).

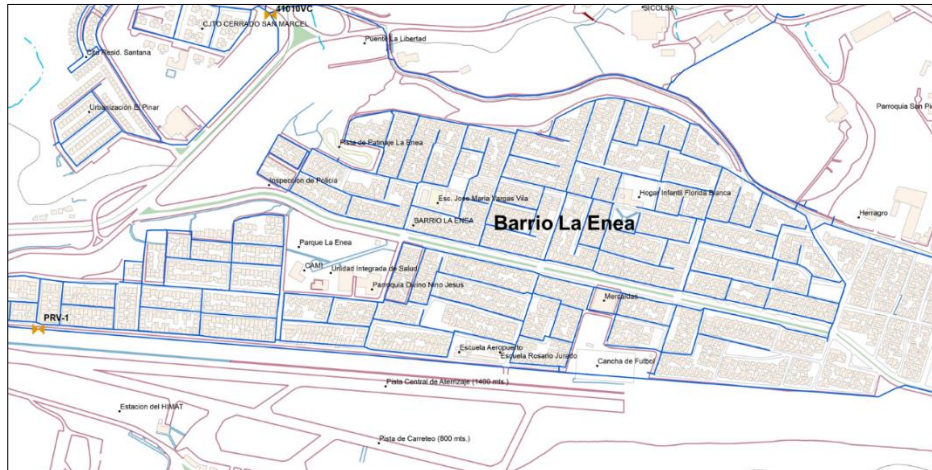


Figura 165. Redes de acueducto en el barrio La Enea (Elaboración propia, 2017)

- En esta ubicación para el conducto que abastece el barrio San Marcel, no es posible la instalación de regulación, puesto que la parte alta del barrio, como lo es los conjuntos Colinas del viento y Portal del bosque, entre otros, se encuentran ubicados en una elevación mayor, siendo indispensable garantizar las presiones mínimas para el sector y en análisis de futuros proyecto de expansión (Figura 166).

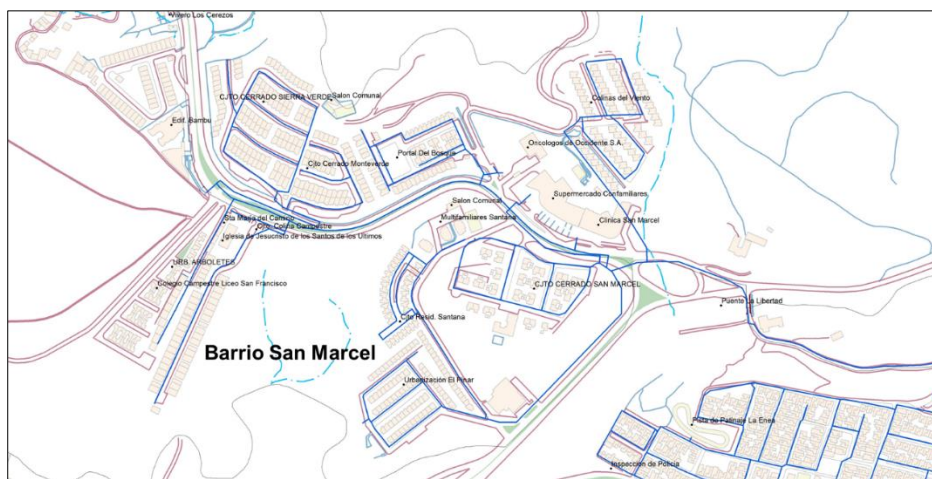


Figura 166. Redes de acueducto en el barrio San Marcel (Elaboración propia, 2017)

- Se Según el análisis geodésico definido se presenta un único conducto apto para la ubicación de la VRP en este sector, por lo anterior, no se aplica el criterio de PU, pero se define la instalación de una válvula reductora de reductora de 3" sobre la tubería ubicada en la carrera 37 entre calles 95 y 94B, con una consigna inicial de 35 psi (P-2989), como se muestra en la Figura 167.

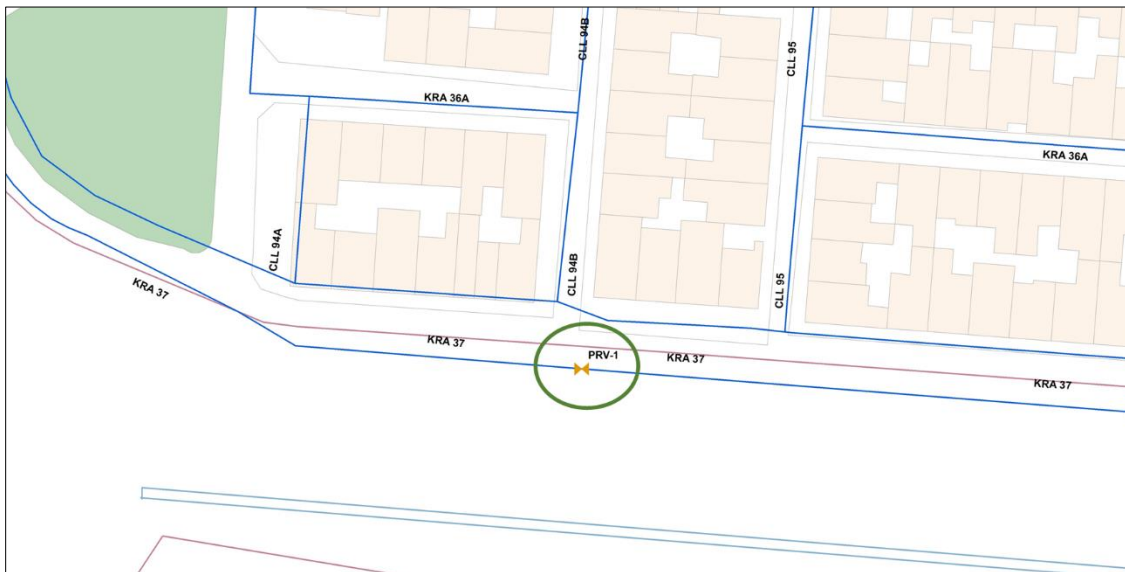


Figura 167. Ubicación óptima VRP en la carrera 37 entre calles 95 y 94B, sector de La Enea para el circuito T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)

Elevación 2030 m.s.n.m.

- Se debe ajustar la consigna de la válvula reguladora de nomenclatura 41010VC a 35 psi, ubicada en la entrada al conjunto cerrado San Marcel en la carrera 39 con calle 95 para reducir la energía que llega al sector, como se muestra en la Figura 168.

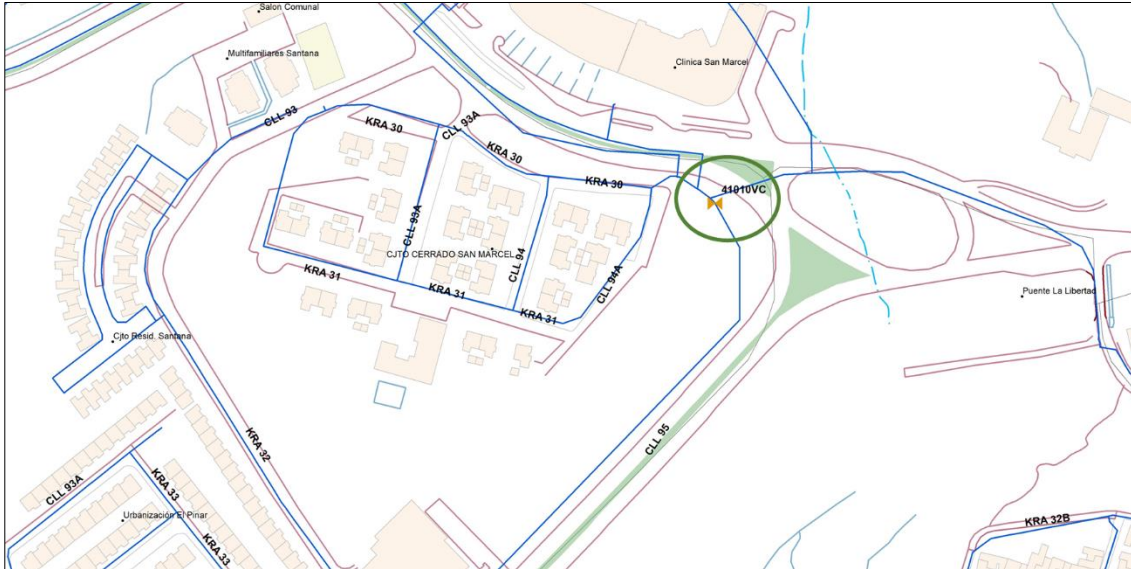


Figura 168. Ubicación de válvula 41010VC (Elaboración propia, 2017)

- Se debe ajustar la consigna de la válvula reguladora de nomenclatura 41009VC a 35 psi, ubicada en la carrera 37 entre calles 83D y 83E (barrio Lusitania) para reducir la energía que llega al sector, como se muestra en la Figura 169.

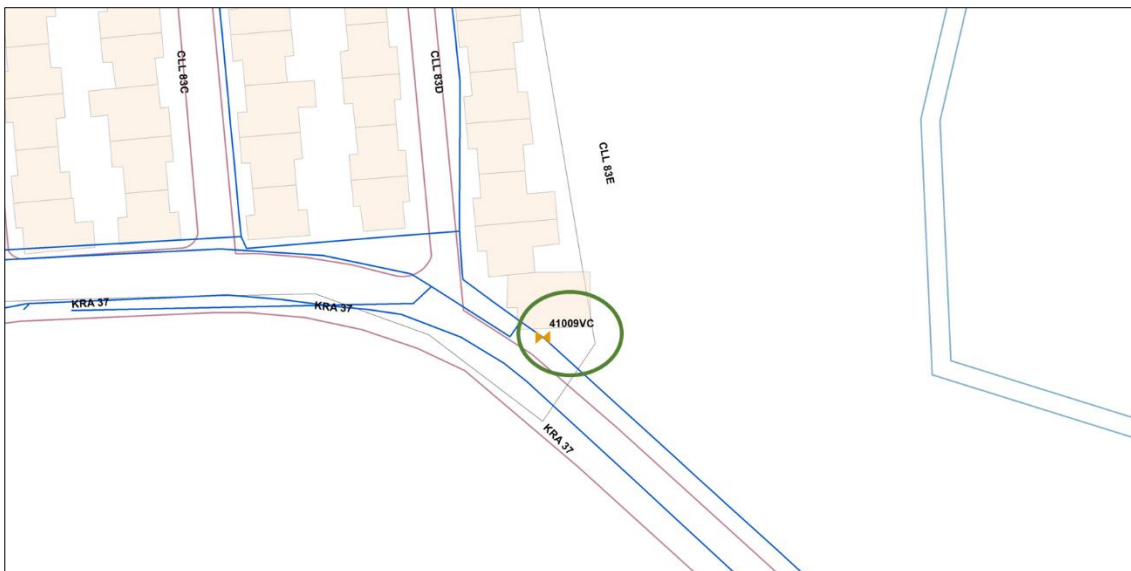


Figura 169. Ubicación de válvula 41009VC (Elaboración propia, 2017)

Elevación 1994 m.s.n.m.

- Se debe ajustar la consigna de la válvula reguladora de nomenclatura 41003VC a 35 psi, ubicada en la carrera 37A entre calles 82A y 82B (barrio Lusitania) para reducir la energía que llega al sector, como se muestra en la Figura 170.

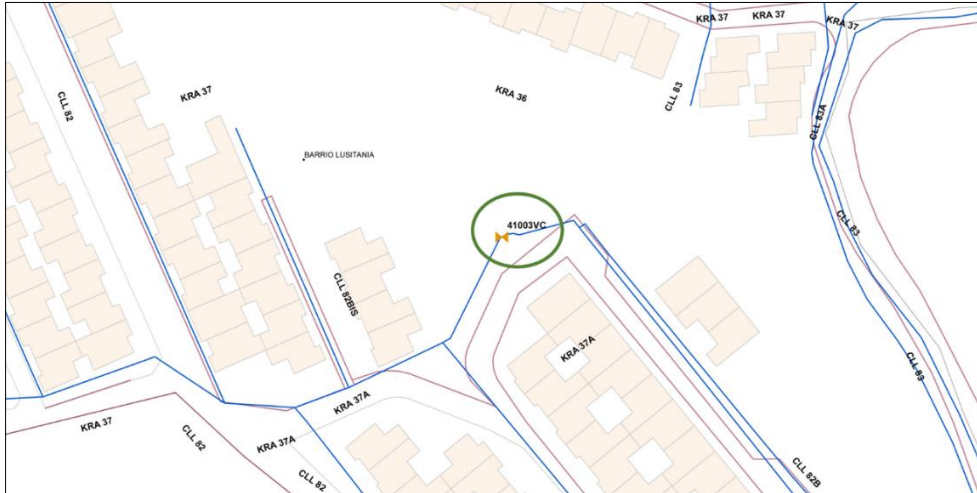


Figura 170 Ubicación de válvula 41003VC (Elaboración propia, 2017)

- Se debe ajustar la consigna de la válvula reguladora de nomenclatura 40005VC a 35 psi, ubicada en la entrada al conjunto cerrado Florida del campo para reducir la energía que llega al sector, como se muestra en la Figura 171.

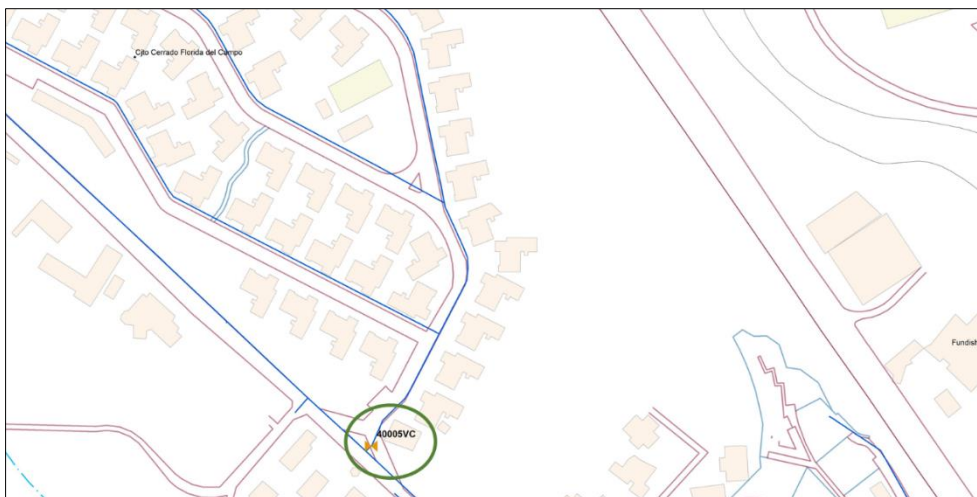


Figura 171. Ubicación de válvula 40005VC (Elaboración propia, 2017)

- En la carrera 38 con calle 83 existe una VRP de nomenclatura 41008VC, considerando que su consigna inicial cumple para la correcta alimentación de los sectores que se encuentra ubicados en una elevación mayor en el barrio La Florida, no es posible la regulación de la misma (Figura 172).

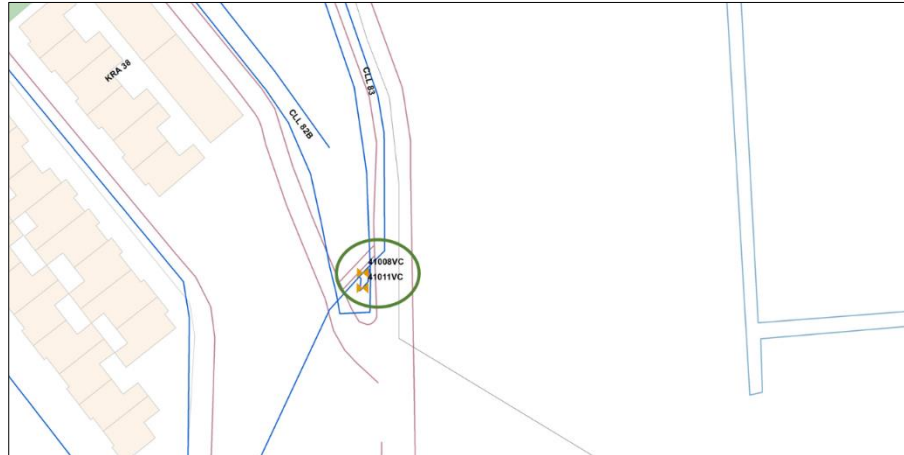


Figura 172. Ubicación de válvula 41008VC (Elaboración propia, 2017)

Elevación 1960 m.s.n.m.

- En el sector de La Florida existe una VRP de nomenclatura 32002VC para la alimentación de parque centro localizado en la Panamericana, considerando que su consigna inicial cumple los criterios de presiones admisibles, no es necesario la regulación de la misma (Figura 173).

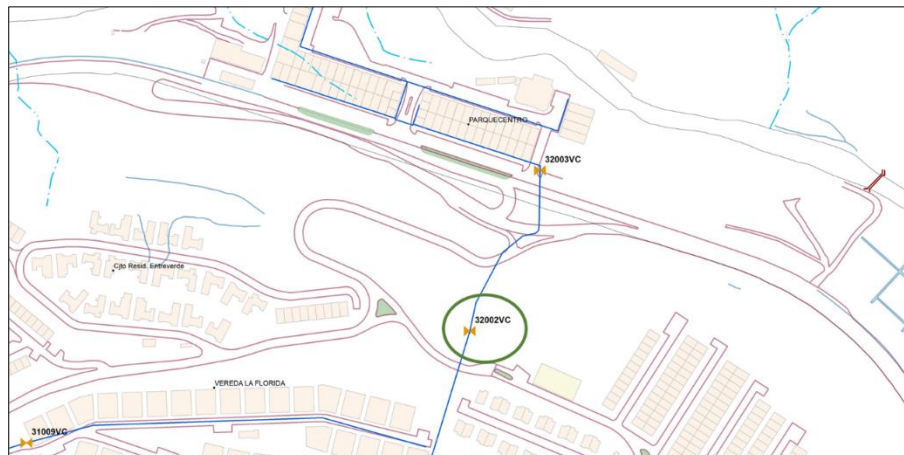


Figura 173. Ubicación de válvula 32002VC (Elaboración propia, 2017)

- Se debe ajustar la consigna de la válvula reguladora de nomenclatura 31007VC a 35 psi, ubicada en la vía principal de la Florida (Caserío el alto de la virgen), para reducir la energía que llega al sector, como se muestra en la Figura 174.

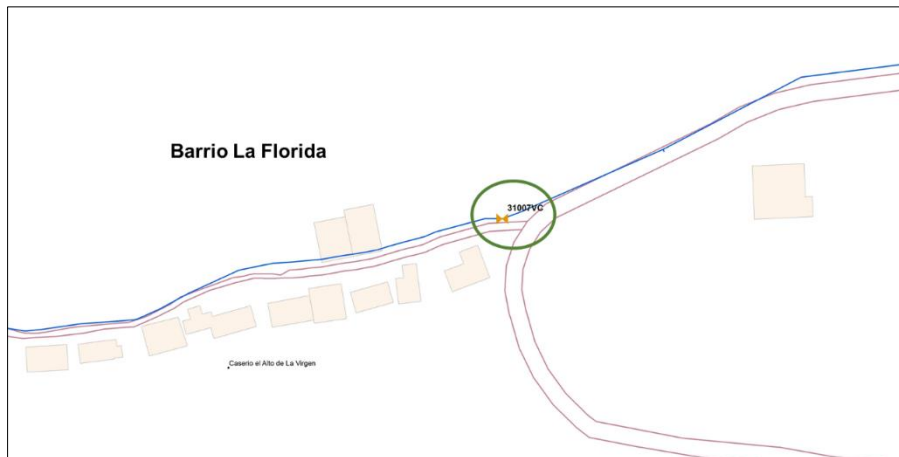


Figura 174. Ubicación de válvula 31007VC (Elaboración propia, 2017)

Elevación 1924 m.s.n.m.

- Según el análisis geodésico definido se presenta un único conducto apto para la ubicación de la VRP, por lo anterior, no se aplica el criterio de PU, pero se define la instalación de una válvula reductora de 2" sobre la tubería ubicada en la vía principal de la Florida (Caserío el alto de la virgen), como se muestra en la Figura 175.



Figura 175. Ubicación óptima VRP en el caserío el alto de la virgen, sector de La Florida para el circuito T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)

Elevación 1889 m.s.n.m.

- Se debe ajustar la consigna de la válvula reguladora de nomenclatura 31006VC y 31010VC a 35 psi, ubicadas en la vía principal de la Florida (sector conjunto los molinos), para reducir la energía que llega al sector, como se muestra en la Figura 176.

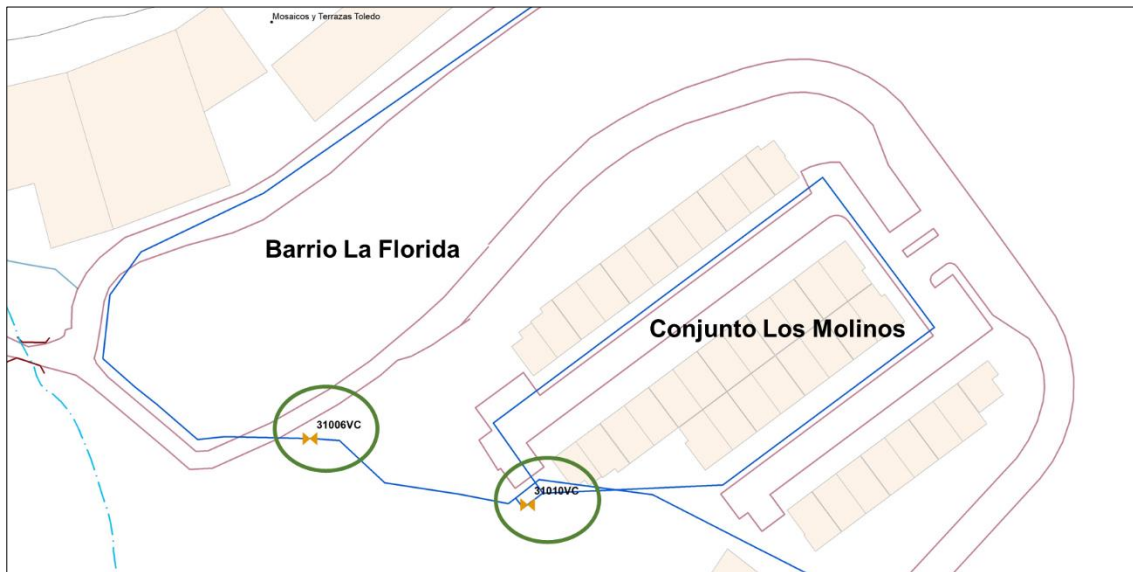


Figura 176. Ubicación de válvula 31006VC y 31010VC (Elaboración propia, 2017)

Finalmente, los resultados obtenidos por medio de aplicar esta metodología se presentan en la Figura 177, donde se muestran las presiones obtenidas, considerando una reducción importante en la energía excesiva que tenía el sistema y logrando tener una homogeneidad de acuerdo con los rangos establecidos de presión, de 21 psi a 85 psi, a su vez en la Figura 178 se presenta que las velocidades del sector son aceptables, dada las conexiones realizadas para evitar las pérdidas en las redes y permite considerar que es un sector con alta capacidad hidráulica para futuros proyectos de expansión.

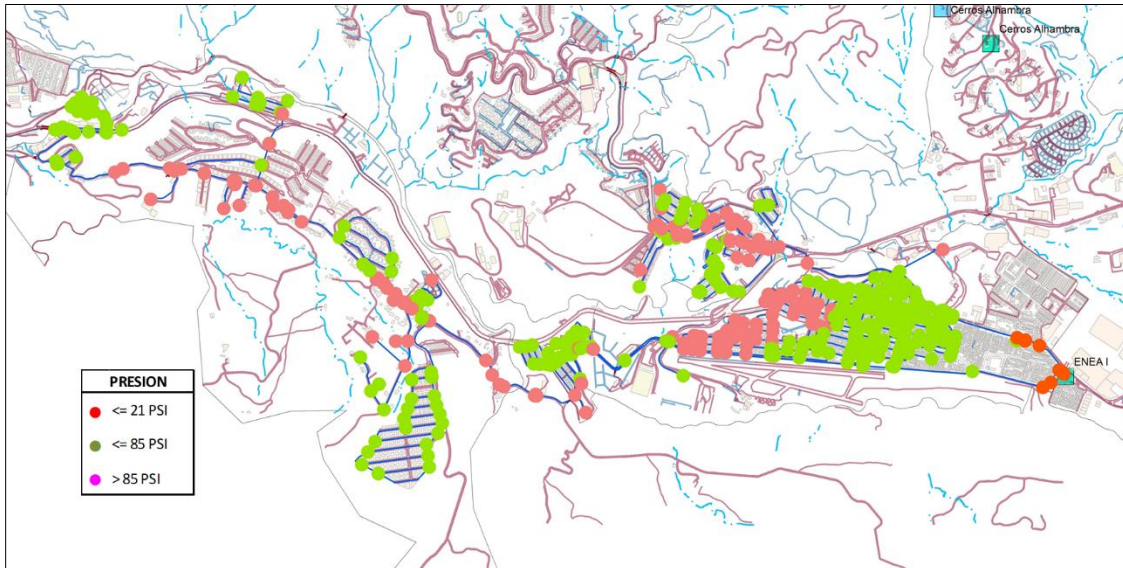


Figura 177. Presiones en el circuito optimizado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)

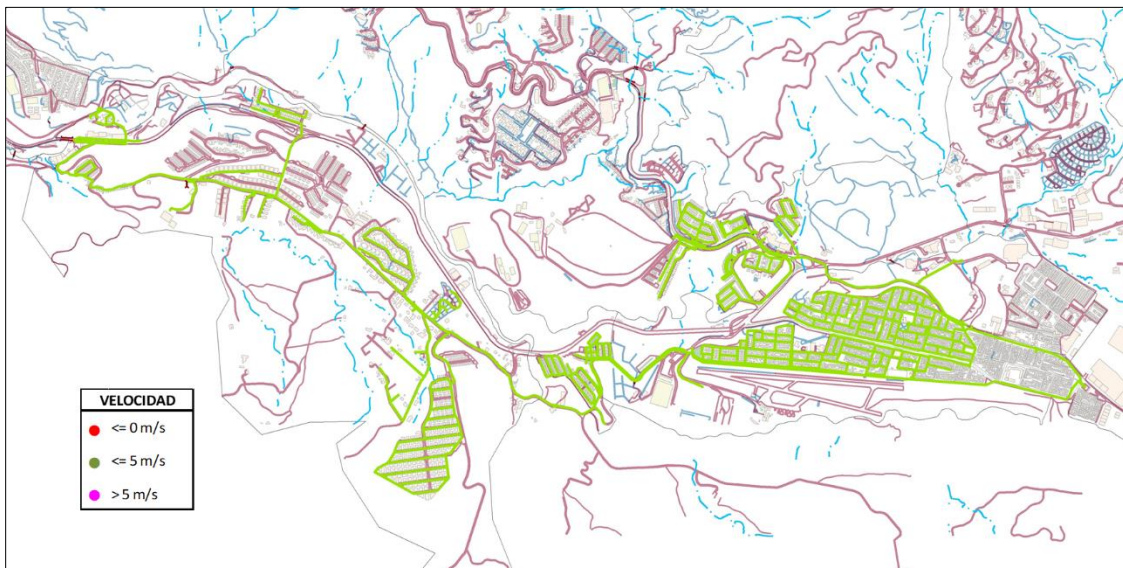


Figura 178. Velocidades en el circuito optimizado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)

Finalmente, en la Figura 179 se presenta el estado de las válvulas de cierre/apertura considerando la necesidad de cerrar algunos tramos de tubería para ser ideal el paso del flujo de agua hacia el sector por los conductos regulados y así cumplir con el objetivo propuesto.

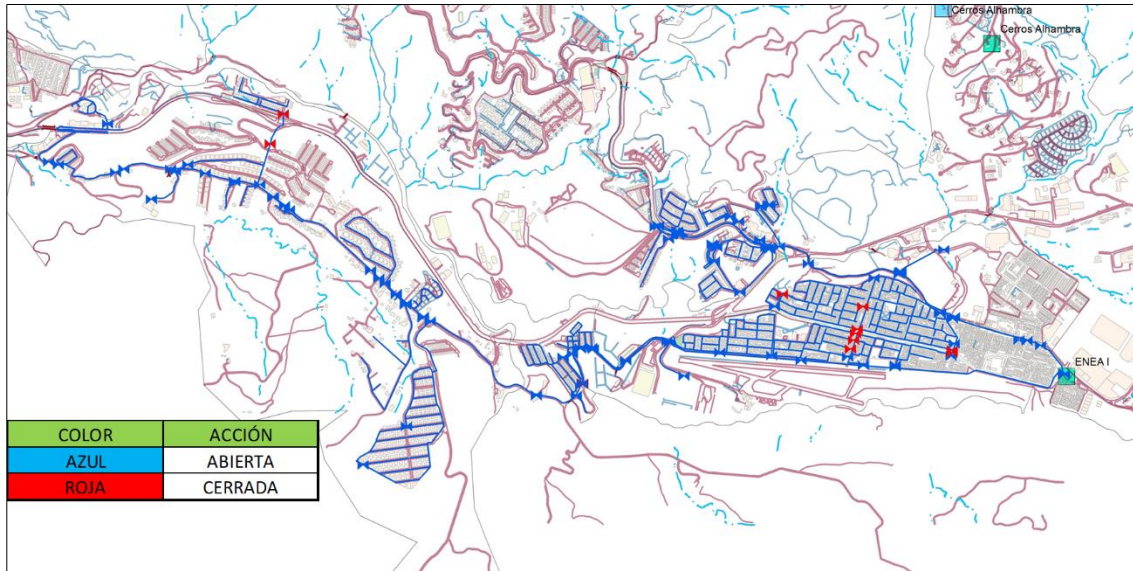


Figura 179. Estado válvulas de cierre/apertura en el circuito optimizado T33 Enea I (Elaboración propia, 2017)

En respeto, con la función objetivo se tiene que el sector hidráulico maximizó las presiones apropiadas según los rangos estipulados como se observa en la Figura 180, teniendo en cuenta que se pasó de tener un 51,04% de presiones apropiadas a lograr un 61,84% de presiones apropiadas, lo cual indica un aumento de aproximadamente el 10% de las mismas, por lo anterior se determina que el sector tiene un comportamiento adecuado inicial y es complejo mejorar las condiciones, puesto que los cambios bruscos que se presentan en el sistema requieren presiones superiores a las estipuladas para su correcto funcionamiento.

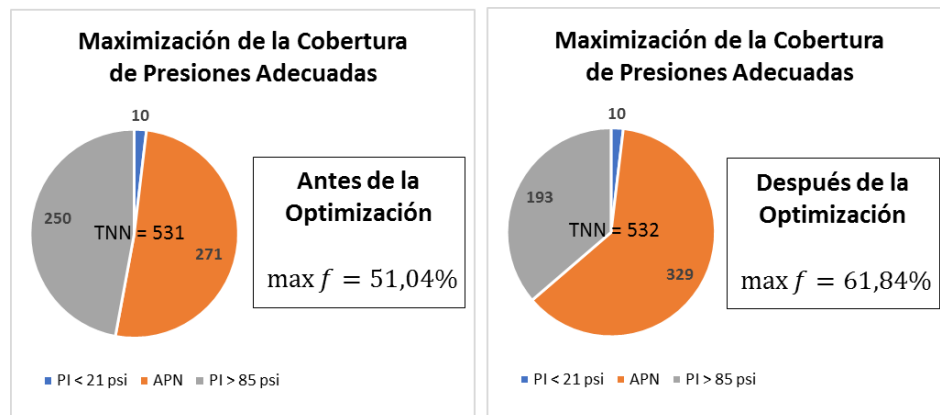


Figura 180. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito T33 Enea I, antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017)

T34 ENEA II

El sector inicialmente tiene presiones superiores a las estipuladas, por lo anterior se enfoca la optimización en la reducción de la energía en el sistema, por medio de la instalación de válvulas reguladoras y la unificación del abastecimiento de las zonas. El procedimiento planteado para lograr los objetivos es el siguiente.

Según la estructura del sector se presenta que existen varios rangos de presión definidos cada 35 metros de desnivel, teniendo en cuenta que el sector es demasiado largo y variable, se define como cota crítica la de mínima presión dada como la 2164 m.s.n.m., y generando los rangos de presión como se muestra en la Figura 181.



Figura 181. Determinación de las ubicaciones de las VRP para el sector T34 Enea II por medio de límites naturales (Elaboración propia, 2017)

Por los bastos cambios de nivel, es necesario analizar la ubicación de válvulas por medio de los rangos de presión, por consiguiente, el proceso se define de acuerdo con las cotas posibles para la ubicación de las VRP.

Elevación 2136 m.s.n.m.

- En esta ubicación no es necesario la instalación de VRP, considerando que el inicio del sector es un tanque que genera el quiebre de las presiones.

Elevación 2101 m.s.n.m.

- Según el análisis geodésico definido se presenta un único conducto apto para la ubicación de la VRP en este sector, por lo anterior, no se aplica el criterio de PU, pero se define la instalación de una válvula reductora de 2" sobre la tubería ubicada en la carrera 37 entre calles 101 y 101B, con una consigna inicial de 35 psi (P-3447), como se muestra en la Figura 182.

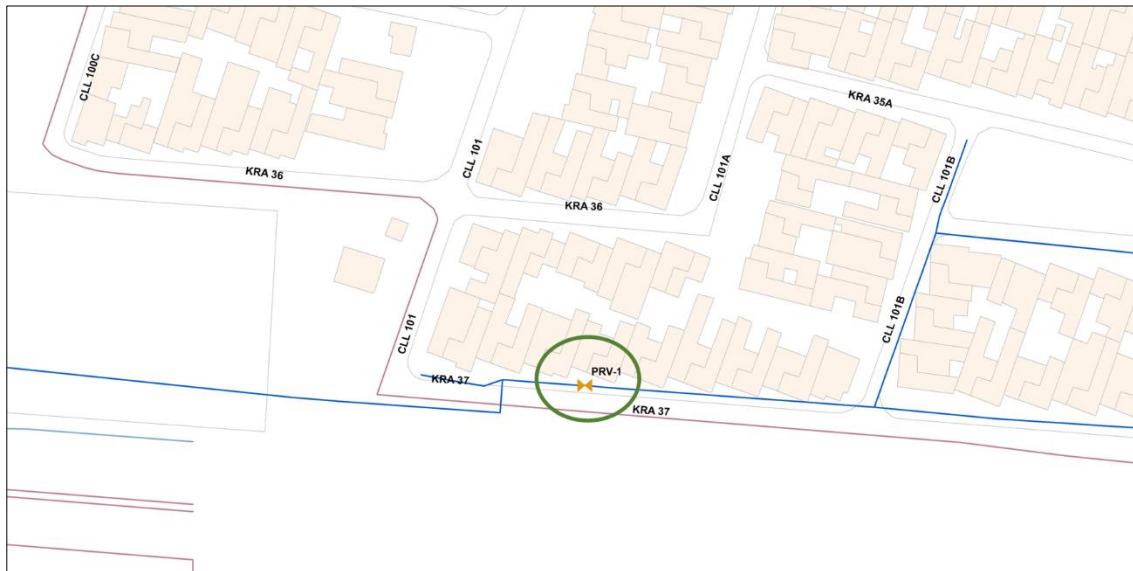


Figura 182. Ubicación óptima VRP en la carrera 37 entre calles 101 y 101B, sector de La Enea para el circuito T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)

- Según el análisis geodésico definido se presenta un único conducto apto para la ubicación de la VRP en este sector, por lo anterior, no se aplica el criterio de PU, pero se define la instalación de una válvula reductora de 1" sobre la alimentación para el aeropuerto La Nubia (P-3521), como se muestra en la Figura 183.

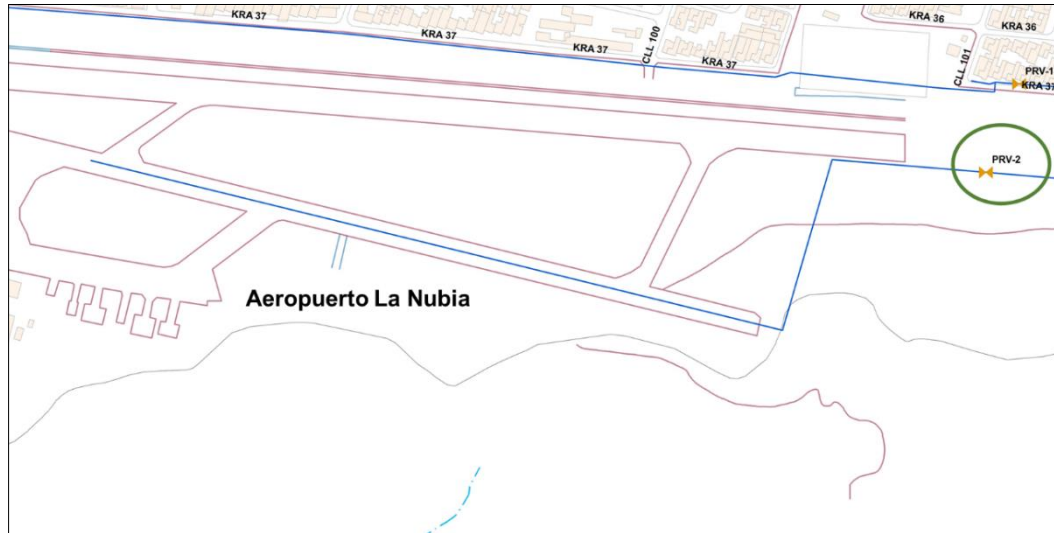


Figura 183. Ubicación óptima VRP en la alimentación para el aeropuerto La Nubia, sector de La Enea para el circuito T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)

Elevación 2066 m.s.n.m.

- Según el análisis geodésico definido se presenta un único conducto apto para la ubicación de la VRP en este sector, por lo anterior, no se aplica el criterio de PU, pero se define la instalación de una válvula reductora de 2" sobre la tubería ubicada en la carrera 37 entre calles 95B y 95D, con una consigna inicial de 35 psi (P-3489), como se muestra en la Figura 184.

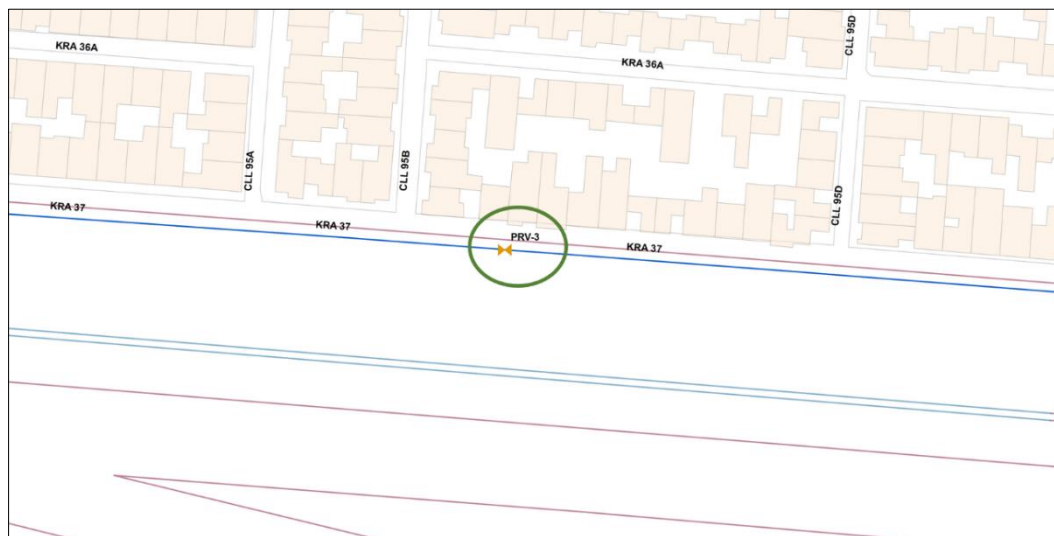


Figura 184. Ubicación óptima VRP en la carrera 37 entre calles 95B y 95D, sector de La Enea para el circuito T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)

Elevación 2031 m.s.n.m.

- No es posible la instalación de regulación para el sector que se encuentra debajo de este rango de altura, puesto que el sector que abastece se encuentra ubicado en una elevación mayor, como se presenta en el sector de La Florida y abasteciendo el colegio San Pio ubicado en la parte alta de La Florida. Adicional, es importante garantizar las presiones mínimas para futuros proyecto de expansión en esta zona.

Finalmente, los resultados obtenidos por medio de aplicar esta metodología se presentan en la Figura 185, donde se muestran las presiones obtenidas, considerando una reducción importante en la energía excesiva que tenía el sistema y logrando tener una homogeneidad de acuerdo con los rangos establecidos de presión, de 21 psi a 85 psi, a su vez en la Figura 186 se presenta que las velocidades del sector son aceptables, dada las conexiones realizadas para evitar las pérdidas en las redes y permite considerar que es un sector con alta capacidad hidráulica para futuros proyectos de expansión.

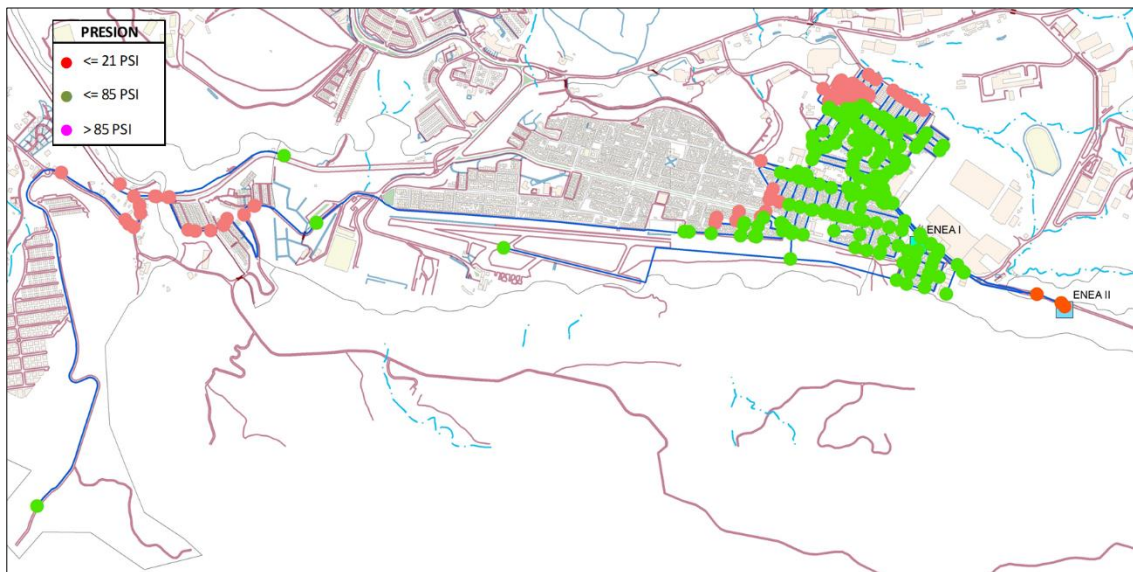


Figura 185. Presiones en el circuito optimizado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)

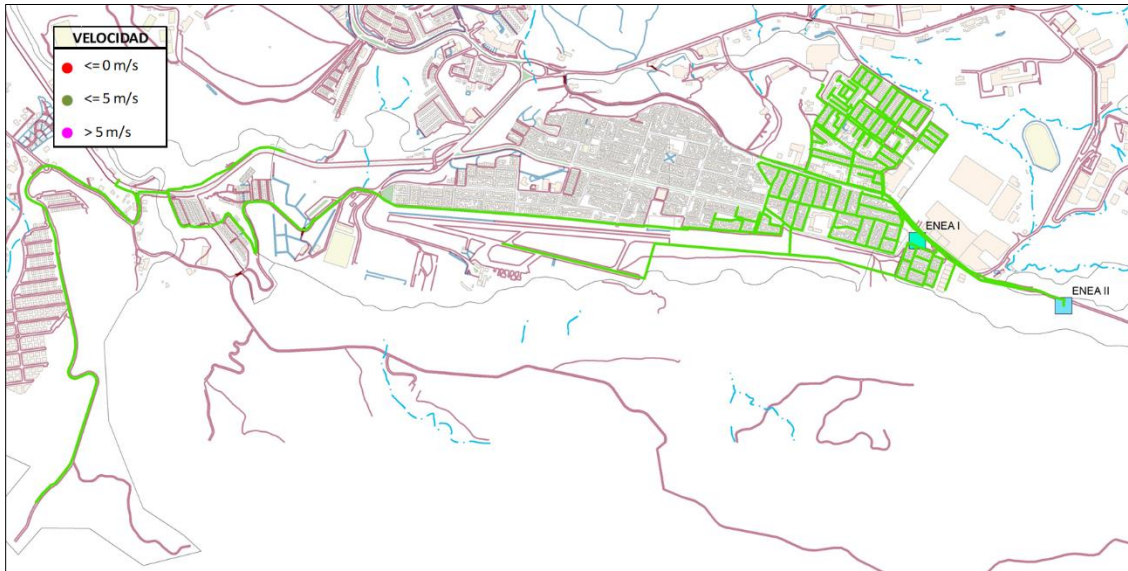


Figura 186. Velocidades en el circuito optimizado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)

Finalmente, en la Figura 187 se presenta el estado de las válvulas de cierre/apertura considerando la necesidad de cerrar algunos tramos de tubería para ser ideal el paso del flujo de agua hacia el sector por los conductos regulados y así cumplir con el objetivo propuesto.

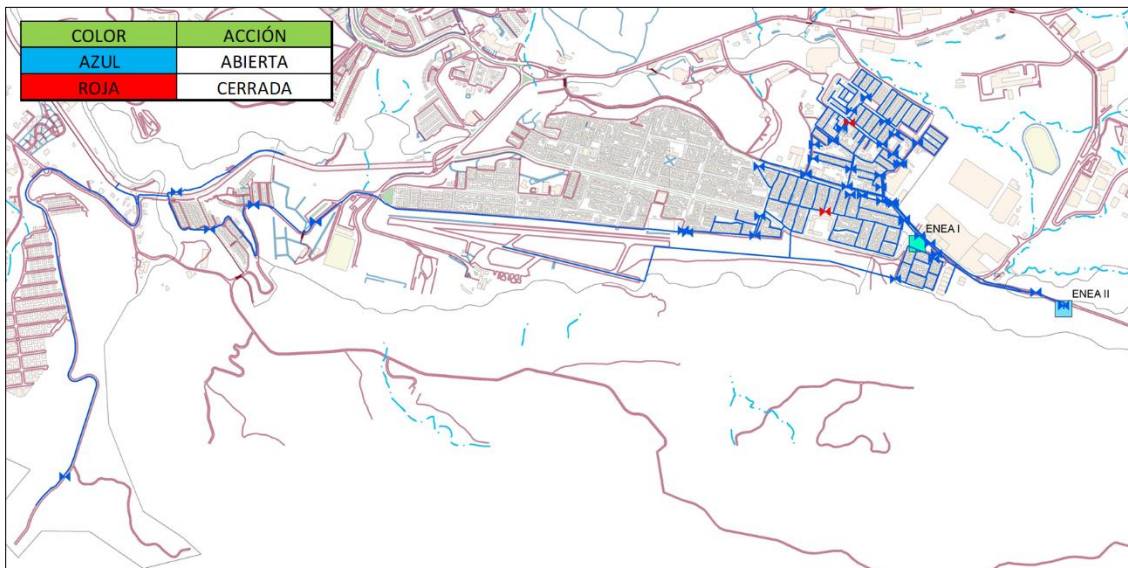


Figura 187. Estado válvulas de cierre/apertura en el circuito optimizado T34 Enea II (Elaboración propia, 2017)

En respeto, con la función objetivo se tiene que el sector hidráulico maximizó las presiones apropiadas según los rangos estipulados como se observa en la Figura 188, teniendo en cuenta que se pasó de tener un 73,94% de presiones apropiadas a lograr un 76,06% de presiones apropiadas, lo cual indica un aumento de aproximadamente el 3% de las mismas, por lo anterior se determina que el sector tiene un comportamiento adecuado inicial y es complejo mejorar las condiciones, puesto que los cambios bruscos que se presentan en el sistema requieren presiones superiores a las estipuladas para su correcto funcionamiento.

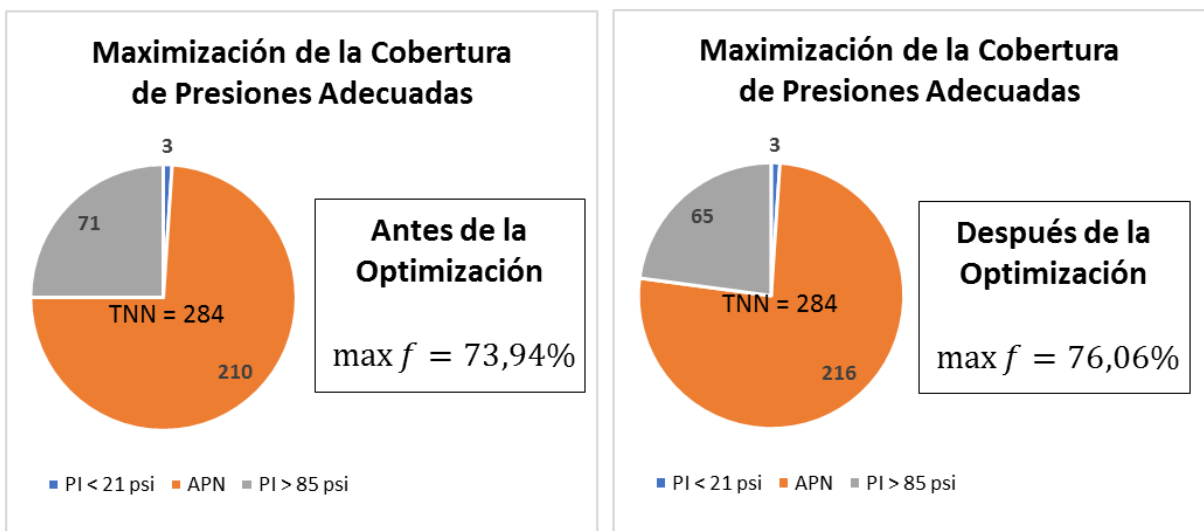


Figura 188. Resultados comparativos de la función objetivo del circuito T34 Enea II, antes y después de la optimización (Elaboración propia, 2017)

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Durante el proceso de modelación, es importante conocer las características topológicas de la zona, puesto que la hidráulica del sistema depende de la forma del territorio y genera una mayor precisión en los resultados obtenidos.

Dentro de un proceso de calibración es esencial la elaboración y/o revisión del modelo hidráulico inicial; éste debe contener la mayor cantidad de información topográfica y topológica comprobada, de tal manera que permita el cálculo acertado de las variables hidráulicas.

En el proceso de calibración del modelo hidráulico es fundamental contar con la mayor cantidad de información relacionada con la conservación de la energía y la masa, por medio de los datos tomados en campo de presiones y caudales respectivamente.

De acuerdo con la metodología aplicada del CIACUA, en la cual se definen que los parámetros calibrables son las demandas desconocidas y las fugas como la conservación de la masa determinados con los valores del IANC y diámetros, rugosidades y pérdidas menores como la conservación de la energía definidos según el tiempo de vida útil que tiene los elementos.

El análisis de sensibilidad genera un mayor acercamiento a los valores que pueden llegar a afectar más el comportamiento del sistema, así es posible identificar que las fugas y los diámetros ejercen los mayores rangos de variación con respecto al caudal y las presiones.

La obtención de los modelos hidráulicos permite gestionar la operación del sistema de distribución de agua potable, dada la oportunidad de conocer el estado actual de las redes, conexiones y posibles zonas de abastecimiento en casos de daños, adicionalmente, las ubicaciones de zonas de alta presión, consideradas como puntos donde pueden existir fugas y futuras fallas por un mayor desgaste.

Las presiones en los sectores hidráulicos modelados en un promedio del 70% de las zonas estudias, están en rangos superiores a los establecidos por los entes regulatorios, definidos como ubicaciones potenciales de rupturas de tuberías y fugas del sistema: En este análisis es indispensable considerar que en algunas zonas existen puntos de inflexión en el terreno generando disminuciones de energía que generan una reducción de presión importante para lograr abastecer partes altas, por lo mismo se debe establecer planos de presiones que permitan controlar las presiones en zonas bajas como garantizar el servicio en zonas altas.

En la búsqueda por disipar la energía en exceso presente en la zona de estudio, se considera que la alternativa más viable es la regulación de las presiones por medio de válvulas que faciliten la operación de las redes y minimicen las fugas en el sistema.

La metodología de optimización puede variar de sector hidráulico, puesto que cada uno tiene características particulares que generan necesidades diferentes, como es cambios bruscos de presión por presencia de desniveles, sistemas regulados con posibilidad de mejorar su funcionamiento, entre otros factores que requieren condiciones especiales para su correcta operación.

En el proceso de optimización se encuentra que existen sectores donde, como lo es Enea III donde se debe evitar la regulación, dada la necesidad de abastecer zonas ubicadas en puntos altos, por lo mismo, es importante considerar la optimización en función de la rehabilitación de redes, en búsqueda de cambiar el material de los conductos hacia uno de mayor resistencia que permita evitar la ocurrencia de daños por las altas presiones.

Por medio de la optimización enfocada en la regulación de presiones se presenta que se logró una reducción de la energía en los sectores hidráulicos de más del 50%, teniendo en

cuenta los limitantes de algunas zonas donde no es factible el control de presiones por su necesidad de abastecer zonas elevadas topográficamente.

6.2 Recomendaciones

Dentro del proceso de modelación es ideal tener el acompañamiento del personal técnico de la empresa prestadora del servicio de acueducto, considerando que tienen los conocimientos del funcionamiento y operación del sistema.

Es importante para la toma de datos en campo realizar una calibración de los equipos, antes de su instalación y después de un periodo de uso, considerando que los equipos para medición de caudal y presión son susceptibles a alterar sus valores, puesto que se encuentran sometidos a esfuerzos muy altos.

Las mediciones en campo deben ser en periodos largos de lectura, como mínimo la instalación durante 24 horas donde sea posible conocer el comportamiento en horas de bajo y alto consumo.

Es necesario tener claridad que los programas para la modelación hidráulica de redes de distribución, permiten una mayor facilidad en la estructuración del escenario, pero, para la definición de los parámetros hidráulicos y sus respectivos valores, se debe poseer con la experticia de una persona capacitada para estas decisiones trascendentales para la obtención de los resultados.

Los resultados y metodologías aplicadas para el proceso de optimización de los sistemas de distribución de agua potable, dependen de los conocimientos que se llegan a tener de los mismos, puesto que, cada sistema es independiente y estructurada según las características topológicas de la zona y las necesidades actuales y futuras que se tengan, por lo mismo, los resultados obtenidos pueden variar por medio de las disposiciones requeridas y su veracidad está sujeta a mejorar la prestación del servicio.

7. Bibliografía

- Alhimiary, A., & Alsuhaily, S. (2007). Minimizing Leakage Rates In Water Distribution Networks Through Optimal Valves Settings. *World Environmental and Water Resources Congress*, 1-13.
- ALTAG. (30 de Abril de 2013). Obtenido de Ideas Prácticas Para Reducir Costos: <http://www.altag.net/ideas-practicas-para-reducir-costos/>
- Arcila Bonilla, L. Y. (2000). *Simulacion hidraulica de las conducciones principales del acueducto de la ciudad de Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Arena, Fortunato, & Mazzola. (2009). Simulation versus optimization in the assessment of the resource opportunity cost in complex water resources systems – the case of Agri-Sinni in southern Italy. *18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia*, 3237.
- Aristizabal Valencia, J. A. (2000). *Simulacion hidraulica de los circuitos : Tanque las colinas, tanque Belen, Enea parte alta, Ondas del otun, fundadores y salida tanque 1 del acueducto de la Ciudad de Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- BENTLEY SYSTEMS INC. (2006). *Presentaciones Corporativas Bentley*. Manizales: BENTLEY SYSTEMS INC - LATIN AMERICA.
- BERMAD. (s.f.). *BERMAD*. Obtenido de Válvulas Reductororas de Presión: <http://www.bfschile.com/category/soluciones/control-de-fluido/valvulas-reductoras-de-presion>
- Berzal, F. (2016). *Algoritmos Genéticos*. Granda (España): Universidad de Granada.
- Boggiano, M. A. (16 de Noviembre de 2013). *Carta Financiera*. Obtenido de <http://www.cartafinanciera.com>
- Capsa México. (s.f.). Obtenido de QMP portatil: <http://www.capsamexico.com/gpi.html>
- Castro Castrillon, N. (2004). *Diagnostico de agua no contabilizada y simulacion hidraulica del acueducto urbano del municipio de San Jose, el corregimiento de Aracua (Palestina) y la vereda Km 41 (Manizales)- Caldas*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Ciama. (1992). *Conferencia internacional sobre el agua y el medio ambiente el desarrollo en la perspectiva de siglo XXI: declaracion de dublin e informe de la conferencia*. Dublin: Ciama.

-
- CIVILAX. (23 de Agosto de 2015). Obtenido de WaterCAD Tutorial: Extended Period Simulation, Running Water Models over Time: <https://www.civilax.org/watercad-tutorial-extended-period-simulation-running-water-models-over-time/>
- CLA-VAL. (20 de 04 de 2017). *CLA-VAL AMERICA LATINA*. Obtenido de Control activo de presiones: <http://www.cla-val-latinamerica.com>
- DESIGN, EXPANSION AND REHABILITATION OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS AIMED AT REDUCING WATER LOSSES. WHERE ARE WE? (2008). *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference*. Kruger National Park, South Africa.
- Duque, G. (2014). *Elementos para la construcción de una visión estructurada del desarrollo de Caldas*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- ENCICLOPEDIA COLOMBIANA. (2010). Obtenido de <http://www.encyclopediacolombiana.com/encyclopediacolombiana/departamentos/departamentos.php>
- ESRI. (2014). Obtenido de Los modelos hidráulicos y el GIS: unidos para siempre: <http://es.slideshare.net/ESRI/los-modelos-hidraulicos-y-el-gis-unidos-para-siempre>
- Flechas, R. A. (2012). EFECTO DEL USO DE LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH VS LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS EN EL DISEÑO DE REDES MATRICES. *XX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA- BARRANQUILLA, COLOMBIA*.
- Frontera Informativa. (03 de Diciembre de 2013). Decretan la alerta roja en Manizales y se amplía declaratoria de calamidad pública. Manizales, Caldas, Colombia.
- Generalidades Tecnológicas Ltd. (2016). *getec.cl*. Obtenido de Fuji Portaflow C: <http://getec.cl>
- Giraldo Diaz, M. A. (2004). *Diagnostico de agua no contabilizada y simulacion hidraulica del acueducto urbano del municipio de Neira Caldas*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- GRUPO BANCO MUNDIAL. (3 de Septiembre de 2013). *GRUPO BANCO MUNDIAL BIRF-AIF-IFC-MIGA-CIADI*. Obtenido de América Latina: ¿Por qué las empresas de agua y saneamiento intentan ahorrar energía?: <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2013/09/03/latin-america-water-loss-energy-efficiency>
- Haestad, M., Walski, T., Chase, D., Savic, D., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2002). *ADVANCED WATER DISTRIBUTION MODELING AND MANAGEMENT*. Waterbury, CT USA: HAESTAD PRESS.
- Hernan. (25 de febrero de 2014). *megadatosgratis*. Obtenido de Increibles Ejemplos De Carta Para Felicitar Logro En El Trabajo : <http://www.megadatosgratis.com/author/soyelhijodetony/>
- INGENIERIA DE FLUIDOS. (2016). *INGENIERIA DE FLUIDOS*. Obtenido de VÁLVULA REDUCTORA DE PRESIÓN: www.ingenieriadefluidos.com

- Jimenez Aldana, M. (2002). *La Sectorización hidráulica como Estrategia de Control de Perdidas en Sistemas de Acueducto*. Bogotá: ACueducto de Bogotá.
- KELLER AG. (2016). *keller-druck*. Obtenido de LEO Record (Ei): <http://www.kellerdruck.es>
- Khalafallah, A. (2014). Assessing the Performance of the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm in Optimizing Construction Site Planning. *COMPUTING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING*, 1254-1261.
- LA PATRIA. (09 de Septiembre de 2014). Daño de tubería tiene sin agua a El Carmen . *La patria*.
- LA PATRIA. (26 de Agosto de 2014). Daño de una tubería en la Avenida Paralela afecta 4 mil usuarios. *La Patria*.
- Lansey, K., L. N., & Tung, e.-K. (1989). WATER DISTRIBUTION SYSTEM DESIGN UNDER UNCERTAINTIES. *ASCE*, 630-645.
- Llano, J. (11 de Agosto de 2016). Mapa Comunas de Manizales. Manizales, Caldas, Colombia: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.
- Mahdavi, M., & Hosseini, K. (2010). LEAKAGE CONTROL IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS BY USING OPTIMAL PRESSURE MANAGEMENT: A CASE STUDY. *Water Distribution Systems Analysis*, 1110-1123.
- Management Science Consulting. (2012). *MSC Management Science Consulting*. Obtenido de www.managementscience.c
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. (2010). *Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico*. BOGOTÁ D.C.: REPÚBLICA DE COLOMBIA.
- Muraca, A., & Magalini, E. (2015). The case study of Vilanculos (Mozambique) water network: criticalities and solutions. *Advances in Environmental and Geological Science and Engineering*, 434.
- Nicolini, M., & Zovatto, L. (2009). Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves in Water Networks. *JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT*, 178-187.
- Quintero, J. (2013). *DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES EN RÍOS URBANOS DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS*. Manizales: Universidad Católica de Manizales.
- Salcedo Ballesteros, C. A. (2014). *Localización y ajustes óptimos de válvulas reductoras de presión (VRP) en RDAP para minimizar el índice de agua no contabilizada (IANC)*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías - Abastecimiento de agua, redes, riegos*. Bogotá, D.C.: Alfaomega.

-
- Saldarriaga, J. (2008). *Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable*. Bogotá: XVIII Seminario Nacional de hidráulica e hidrología .
- Saldarriaga, J., & Jurado, C. M. (2008). Metodología de calibración de las redes de distribución de agua potable. *XVIII Seminario nacional de hidraulica e hidrologia*.
- Saldarriaga, J., & Salcedo, C. A. (2015). Determination of optimal location and settings of Pressure Reducing Valves in Water Distribution Networks for minimizing water losses. *Procedia Engineering*, 973-983.
- Saldarriaga, J., Ochoa, S., Moreno, M., Romero, N., & Cortés, O. (2010). Prioritised rehabilitation of water distribution networks using dissipated power concept to reduce non-revenue water. *Urban Water Journal*, 121-140.
- Sánchez M., W. (7 de mayo de 2014). Sistemas Comerciales Inteligentes: Decisión efectiva para gestionar agua no contabilizada. *Perusmart*.
- Sierra Largo, J. A. (2001). *Simulación hidráulica de unos circuitos de acueducto de la ciudad de Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Simpson, A. R., Dandy, G. C., & Murphy, L. J. (1994). GENETIC ALGORITHMS COMPARED TO OTHER TECHNIQUES FOR PIPE OPTIMIZATION. *ASCE*, 423.
- Solano López, C. S. (2012). *Recopilación, Análisis y Evaluación de las metodologías de calibración de modelos de RDAP empleadas en algunas ciudades de Colombia*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 115-122.
- UNICEF. (2014). *Progress on sanitation and drinking-water - 2014 update*. Switzerland: World Health Organization.
- Vairavamoorthy, K., & Ali, M. (2005). Pipe Index Vector: A Method to Improve Genetic-Algorithm-Based Pipe Optimization. *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING*, 1117-1125.
- Villarreal Marroquín, M. G. (2015). *Taller de Optimización Multi-objetivo*. CIMAT-Monterrey: Escuela de Modelación y Métodos Numéricos 2015.
- Walski, T. M. (2000). Model Calibration Data: The Good, the Bad, and the Useless. *American Water Works Association*, 94-99.