



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**Reforzamiento de la red de abastecimiento de agua potable
en el sector Mutualista, correspondiente al sector 2 de la
planta El Cebollar, Cuenca**

Trabajo previo a la obtención del grado académico de Ingeniero Civil

Autores:

Peñañiel Ramón Juan Sebastián
Tola Moscoso Juan Sebastián

Director:

Ing. Josué Bernardo Larriva Vásquez

CUENCA - ECUADOR
2026

DEDICATORIA

Dedico primeramente este trabajo a Dios, quien me dio la sabiduría y la fortaleza necesarias para seguir adelante, incluso en los momentos en que el camino se tornó más difícil.

A mis queridos padres, Freddy y Silvia, quienes siempre estuvieron a mi lado sin importar las circunstancias. A pesar de mis tropiezos, nunca me dejaron solo y fueron mi apoyo incondicional a lo largo de cada etapa de este camino. Este logro es tan suyo como mío.

A mi hermano Freddy, mi compañero de vida y mi mayor admiración, quien de manera silenciosa pero constante estuvo presente en cada momento de este proceso.

A mi abuelita Ana, por su amor y su cariño inmenso e incondicional. Su afecto ha sido siempre una de las fuerzas que me impulsó a seguir adelante y llegar hasta aquí.

Una dedicatoria muy especial al cielo, a mi abuelita Luz. Aunque la distancia nos separó, nunca sentí que no estuvieras. Fuiste mi guía y mi compañía silenciosa en cada página de este trabajo. Este logro también es tuyo.

A toda mi familia y a mis amigos, cada uno de ustedes fue un pilar fundamental en mi vida durante este camino. Gracias por creer siempre en mí, incluso cuando yo mismo dudaba

Juan Sebastián Peñafiel Ramón

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, primeramente, a Dios, por acompañarme durante este camino, por darme la fuerza necesaria en cada etapa y por permitirme encontrar personas valiosas que han contribuido a mi crecimiento personal y profesional.

A mi padre, Marcelo, por ser mi pilar fundamental en este proceso de formación como Ingeniero Civil. Gracias por apoyarme siempre, por enseñarme que ser ingeniero va más allá de una profesión; es también ser un mejor ser humano, servir al prójimo y aportar, desde nuestras acciones, a construir un mundo mejor.

A mi madre, Diana, por inculcarme el valor de la perseverancia, por enseñarme a no rendirme aun cuando el camino se torna difícil, y por recordarme siempre que con esfuerzo, fe y dedicación todo es posible.

A mi hermana, Marcela, por sus consejos, su amor incondicional y su apoyo constante. Gracias por acompañarme durante esta etapa universitaria y por estar presente en cada momento en el que necesité ánimo, guía y confianza.

A mi familia, por sus oraciones, bendiciones y palabras de aliento, que me dieron la fortaleza necesaria para seguir adelante y culminar esta meta tan importante.

A mi Theito, por acompañarme en las largas noches de estudio y ser una presencia especial durante este proceso.

A mis compañeros, profesores y amigos, quienes caminaron junto a mí a lo largo de mi carrera universitaria. Gracias por cada enseñanza, cada experiencia compartida y cada momento vivido, porque este logro no solo representa el destino alcanzado, sino también el valor de todo el recorrido.

Finalmente, me agradezco a mí mismo, por no rendirme, por confiar en mis capacidades y por demostrarme que puedo alcanzar todo aquello que me proponga. Hoy comprendo que los sueños y las metas están hechos para cumplirse, siempre con esfuerzo, perseverancia, fe en Dios y confianza en uno mismo.

Juan Sebastián Tola Moscoso

AGRADECIMIENTOS

Al culminar esta etapa de nuestras vidas, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo.

A la Universidad del Azuay, por habernos formado no solo como profesionales sino como personas íntegras, brindándonos las herramientas académicas y humanas necesarias para enfrentar los desafíos de la vida profesional.

Al Ing. Josué Larriva, director de este trabajo de titulación, por su guía, su paciencia y su compromiso a lo largo de todo el proceso. Su orientación técnica y su disposición permanente fueron fundamentales para llevar este proyecto a buen término.

A la Ing. Belén Arévalo, miembro del tribunal, por su valioso aporte, sus observaciones precisas y la dedicación con la que revisó este trabajo. Sus comentarios contribuyeron significativamente a enriquecer y mejorar esta investigación.

A todos los docentes que formaron parte de nuestra formación universitaria, por compartir sus conocimientos y experiencias a lo largo de estos años. Cada uno dejó una huella en nuestra manera de pensar y de ejercer la ingeniería.

A nuestros amigos cercanos y compañeros de universidad, quienes compartieron con nosotros cada etapa de esta carrera. Por las horas de estudio, por el apoyo mutuo en los momentos difíciles y por hacer de estos años una experiencia inolvidable. Gracias por ser parte de este camino.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo evaluar el estado operativo de la red de abastecimiento de agua potable del sector Mutualista, correspondiente al sector 2 de la Planta de Agua Potable El Cebollar, administrada por ETAPA EP en la ciudad de Cuenca, y proponer un reforzamiento hidráulico orientado a garantizar un suministro eficiente ante la demanda actual y futura.

A partir de la información técnica proporcionada por ETAPA EP y mediante la construcción de un modelo hidráulico en el software WaterGEMS, se diagnosticó el comportamiento de la red en dos sectores de estudio (2.1 y 2.2) bajo condiciones de demanda correspondientes al año 2025 y proyectadas al año 2050. El análisis se enfocó en los parámetros normativos establecidos por la Norma CO 10.07-601: presiones dinámicas, pérdidas de carga y velocidades de flujo.

Los resultados evidenciaron que la red actual presenta falta de capacidad y presión dinámica mínima fuera de norma tanto en el escenario actual calculado para los consumos del año 2025, como para la proyección al 2050, con problemas de presión en la mayoría de nodos de la red. Con base en este diagnóstico, el Capítulo III desarrollará las propuestas de reforzamiento mediante modificación de diámetros en tramos críticos e implementación de válvulas reductoras de presión, con el fin de garantizar el cumplimiento normativo y la sostenibilidad del sistema ante el crecimiento poblacional proyectado.

Palabras clave: agua potable, red de distribución, modelación hidráulica, reforzamiento, WaterGEMS.

ABSTRACT

This thesis aimed to evaluate the operational condition of the potable water distribution network in the Mutualista sector, corresponding to sector 2 of the El Cebollar Water Treatment Plant managed by ETAPA EP in the city of Cuenca, Ecuador, and to propose a hydraulic reinforcement to ensure efficient water supply under current and future demand conditions.

Based on technical information provided by ETAPA EP and through the construction of a hydraulic model in the WaterGEMS software, the network's behavior was diagnosed in two study sectors (2.1 and 2.2) under demand conditions corresponding to the year 2025 and projected to the year 2050. The analysis focused on the regulatory parameters established by Standard CO 10.07-601: dynamic pressures, head losses, and flow velocities.

The results showed that the current network has insufficient capacity and minimum dynamic pressure that exceeds standards, both in the current scenario calculated for consumption in 2025 and in the projection to 2050, with pressure problems at most network nodes. Based on this diagnosis, Chapter III will develop reinforcement proposals through diameter modifications in critical sections and the implementation of pressure-reducing valves, in order to guarantee regulatory compliance and the sustainability of the system in the face of projected population growth..

Keywords: potable water, distribution network, hydraulic modeling, reinforcement, WaterGEMS.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	xii
INTRODUCCIÓN	13
Antecedentes	14
Justificación	15
Alcance	16
Objetivos	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos	17
Metodología	17
1. CAPÍTULO I: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA DE LA RED DE AGUA POTABLE BASADO EN DATOS DE ETAPA EP	19
1.1 Antecedentes Investigativos	19
1.1.1 Envejecimiento de la Infraestructura y la Pérdida de Energía	19
1.1.2 Importancia de la Calibración Campo-Modelo	20
1.1.3 Dinámica del Consumo en Sectores de Expansión	20
1.1.4 Estrategia de Sectorización y Control	21
1.2 Información preliminar	21
1.2.1 Ubicación	21
1.2.2 Zona de estudio	22
1.2.3 Levantamiento de información	24
1.2.4 Abastecimiento de la red.	27
1.3 Conceptos Generales	28
1.3.1 Periodo de diseño y vida útil	28
1.3.2 Caudales de diseño	28
1.3.3 Principio de conservación de la masa	29
1.3.4 Principio de conservación de la energía	29
1.3.5 Ecuaciones de pérdidas de carga	29
1.4 Marco Legal y Normativo	30
1.4.1 Marco legal	31
1.4.2 Marco técnico y reglamentario	32
2. CAPÍTULO II: MODELACIÓN HIDRÁULICA Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ACTUAL	33
2.1 Modelación Hidráulica de la Red	33

2.1.1 Diagnóstico topológico del modelo base	33
2.1.2 Proyección poblacional y estimación de caudales de diseño	36
2.1.3 Actualización de demandas	37
2.2 Evaluación Operativa y Diagnóstico del Escenario Actual	38
2.2.1 Capacidad de conducción y pérdidas de carga	38
2.2.2 Presiones dinámicas	40
2.3 Evaluación Operativa y Diagnóstico del Escenario Proyectado	41
2.3.1 Capacidad de conducción y pérdidas de carga	42
2.3.2 Presiones dinámicas	43
2.4 Análisis comparativo de la operatividad hidráulica (2025-2050)	44
2.4.1 Evaluación comparativa del Sector 2.1	44
2.4.2 Evaluación comparativa del Sector 2.2	45
2.5 Conclusión del diagnóstico y justificación técnica de la intervención	46
3. CAPÍTULO III: PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN Y REFUERZOS PARA MEJORAR EL ABASTECIMIENTO DE LA RED	48
3.1 Identificación de tramos con deficiencias hidráulicas	48
3.2 Criterios técnicos para la optimización del modelo hidráulico	50
3.2.1 Criterio de pérdidas de carga unitarias	51
3.2.2 Criterio de velocidades de flujo	52
3.2.3 Criterio de presiones dinámicas	52
3.2.4 Asignación del coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams	52
3.2.5 Metodología iterativa de rediseño	53
3.3 Optimización de diámetros, Sector 2.1	54
3.4 Optimización de diámetros, Sector 2.2	58
3.5 Control de presiones mediante válvulas reductoras de presión (PRV), Sector 2.1	59
3.5.1 Metodología de selección de puntos de instalación	59
3.5.2 Configuración de las PRV en el Sector 2.1	60
3.5.3 Verificación del régimen operativo de las PRV críticas	61
3.6 Control de presiones mediante válvulas reductoras de presión (PRV), Sector 2.2	62
3.7 Resultados del modelo hidráulico optimizado	64
3.7.1 Resultados Sector 2.1	64
3.7.2 Resultados Sector 2.2	66
3.8 Propuesta técnica de reforzamiento de la red	68
3.8.1 Sustitución de tuberías	68
3.8.2 Instalación de válvulas reductoras de presión (PRV)	69
3.9 Refinamiento posterior de diámetros para el control residual de pérdidas en el Sector 2.1	71
3.9.1 Identificación de los tramos críticos remanentes	72
3.9.2 Criterio técnico para el redimensionamiento de los tramos críticos	73
3.9.3 Resultados del modelo después del refinamiento	74
3.9.4 Análisis de los nodos con presión superior a 50 m.c.a.	75
3.9.5 Consideración final del refinamiento	77
3.10 Validación técnica y viabilidad de la propuesta	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79

Conclusiones	79
Recomendaciones	80
<i>Lista de Referencias</i>	83
<i>ANEXOS</i>	86

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1-1: Levantamiento de información comercial y de servicios, Sector 2.1</i>	25
<i>Tabla 1-2: Levantamiento de información comercial y de servicios, Sector 2.2</i>	26
<i>Tabla 2-1: Cuantificación de redes existentes según material y diámetro nominal, Sector 2.1</i>	35
<i>Tabla 2-2: Cuantificación de redes existentes según material y diámetro nominal, Sector 2.2</i>	36
<i>Tabla 2-3: Factores utilizados por Etapa EP</i>	37
<i>Tabla 2-4: Proyección ETAPA – Sector Mutualista, Sector 2.1</i>	37
<i>Tabla 2-5: Proyección ETAPA – Sector Mutualista, Sector 2.2</i>	37
<i>Tabla 2-6: Comparación de resultados de la evaluación operativa 2025-2050, Sector 2.1</i>	45
<i>Tabla 2-7: Comparación de resultados de la evaluación operativa 2025-2050, Sector 2.2</i>	46
<i>Tabla 3-1: Tuberías del Sector 2.1 con pérdidas de carga superiores a 10 m/km, escenario 2050 sin optimizar</i>	50
<i>Tabla 3-2: Ubicaciones de tramos con diámetros optimizados, Sector 2.1</i>	55
<i>Tabla 3-3: Tramos de tubería modificados en el Sector 2.1, diámetros originales y propuestos</i>	56
<i>Tabla 3-4: Resumen de tuberías a reemplazar por diámetro y longitud, Sector 2.1</i>	56
<i>Tabla 3-5: Ubicaciones de tramos con diámetros optimizados, Sector 2.2</i>	58
<i>Tabla 3-6: Tramos de tubería modificados en el Sector 2.2, diámetros originales y propuestos</i>	59
<i>Tabla 3-7: Válvulas reductoras de presión (PRV) instaladas en el Sector 2.1, parámetros hidráulicos</i>	61
<i>Tabla 3-8: Verificación del régimen operativo de las PRV críticas, Sector 2.1</i>	62
<i>Tabla 3-9: Válvulas reductoras de presión (PRV) instaladas en el Sector 2.2, parámetros hidráulicos</i>	63
<i>Tabla 3-10: Comparación de resultados operativos antes y después del reforzamiento, Sector 2.1</i>	66
<i>Tabla 3-11: Comparación de resultados operativos antes y después del reforzamiento, Sector 2.2</i>	68
<i>Tabla 3-12: Resumen general de tuberías a reemplazar — Sectores 2.1 y 2.2 por diámetro y longitud</i>	69
<i>Tabla 3-13: Tramos del Sector 2.1 con gradiente hidráulico superior a 10 m/km tras la instalación de las PRV</i>	72
<i>Tabla 3-14: Comparación de diámetros y parámetros hidráulicos antes y después del refinamiento</i>	73
<i>Tabla 3-15: Distribución de presiones nodales en el Sector 2.1 después del refinamiento (escenario 2050)</i>	75
<i>Tabla 3-16: Nodos con mayor presión en el modelo final del Sector 2.1</i>	76

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1-1: Plano de la red de distribución - Sector 2.1 del sector Mutualista</i>	23
<i>Ilustración 1-2: Plano de la red de distribución - Sector 2.2 del sector Mutualista.</i>	24
<i>Ilustración 2-1: Distribución de diámetros de la red del Sector 2.1.</i>	34
<i>Ilustración 2-2: Distribución de diámetros en la red del Sector 2.2.</i>	35
<i>Ilustración 2-3: Pérdidas de gradiente en el Sector 2.1 (2025)</i>	39
<i>Ilustración 2-4: Pérdidas de gradiente en el Sector 2.2 (2025).</i>	39
<i>Ilustración 2-5: Presiones dinámicas el Sector 2.1 (2025).</i>	40
<i>Ilustración 2-6: Presiones dinámicas en el Sector 2.2 (2025).</i>	41
<i>Ilustración 2-7: Pérdidas de gradiente en el Sector 2.1 (2050)</i>	42
<i>Ilustración 2-8: Pérdidas de gradiente en el Sector 2.2 (2050)</i>	42
<i>Ilustración 2-9: Presiones dinámicas en el Sector 2.1 (2050).</i>	43
<i>Ilustración 2-10: Presiones dinámicas en el Sector 2.2 (2050).</i>	44
<i>Ilustración 3-1: Distribución de diámetros de la red optimizada, Sector 2.1</i>	57
<i>Ilustración 3-2: Pérdidas de gradiente hidráulico del modelo optimizado, Sector 2.1</i>	57
<i>Ilustración 3-3: Ubicación de las PRV en el modelo hidráulico, Sector 2.1</i>	61
<i>Ilustración 3-4: Ubicación de las PRV en el modelo hidráulico, Sector 2.2</i>	64
<i>Ilustración 3-5: Comparación de pérdidas de gradiente antes y después de la optimización, Sector 2.1 (2050)</i>	65
<i>Ilustración 3-6: Presiones dinámicas del modelo optimizado, Sector 2.1 (2050)</i>	66
<i>Ilustración 3-7: Comparación de pérdidas de gradiente antes y después de la optimización, Sector 2.2 (2050)</i>	67
<i>Ilustración 3-8: Presiones dinámicas del modelo optimizado, Sector 2.2 (2050)</i>	67
<i>Ilustración 3-9: Red con gradientes críticos tras la instalación de PRVs, Sector 2.1</i>	72

INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua potable es un componente esencial para el desarrollo urbano y el bienestar de la población. Su adecuada gestión garantiza condiciones de vida dignas y sostenibles, especialmente en ciudades en constante crecimiento como Cuenca, donde la expansión urbana y el aumento de la demanda han impuesto nuevos desafíos a las infraestructuras de distribución existentes.

En este contexto, el presente trabajo de titulación se enfoca en el reforzamiento de la red de abastecimiento de agua potable del sector Mutualista, correspondiente al sector 2 de la Planta de Agua Potable El Cebollar, administrada por ETAPA EP. Este sector ha experimentado, en los últimos años, caídas de presión y discontinuidades en el servicio, evidenciando que la red actual no cuenta con la capacidad hidráulica suficiente para cubrir los requerimientos actuales de la población.

El estudio aborda un diagnóstico técnico y operativo del sistema mediante modelación hidráulica computacional, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la red ante la demanda actual y futura, identificando los tramos críticos y proponiendo soluciones orientadas a optimizar su funcionamiento. El proyecto se fundamenta en las Normas Codificadas CO 10.07-601 y 602 del MIDUVI, que establecen los parámetros técnicos y constructivos aplicables a los sistemas de abastecimiento de agua potable en el Ecuador.

El alcance de este trabajo no solo considera los aspectos hidráulicos del sistema, sino también su impacto social y operativo, buscando contribuir al fortalecimiento de la infraestructura urbana de Cuenca. En este sentido, el reforzamiento de la red permitirá mejorar la continuidad y calidad del servicio, garantizar presiones adecuadas, reducir pérdidas y optimizar la distribución del recurso hídrico, asegurando la sostenibilidad del sistema ante el crecimiento poblacional proyectado.

El documento se estructura en tres capítulos principales. El Capítulo I aborda la recopilación de información técnica del sistema de abastecimiento con base en datos de ETAPA EP. El Capítulo II desarrolla la modelación hidráulica y la evaluación operativa del sistema actual, mientras que el Capítulo III presenta la propuesta de reforzamiento y optimización que permita mejorar las condiciones del servicio. Finalmente, se incluyen las conclusiones y recomendaciones derivadas del análisis realizado.

Antecedentes

El acceso a un servicio de agua potable de calidad es un derecho humano fundamental, reconocido por organismos internacionales como las Naciones Unidas a través del Objetivo de Desarrollo Sostenible N.º 6, que establece la meta de garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (ONU, 2015).

En Cuenca, el sistema de agua potable es administrado por la Empresa Pública de Telecomunicaciones, Agua Potable y Alcantarillado (ETAPA EP), la cual opera varias plantas de tratamiento y redes de distribución que cubren la mayor parte del área urbana. Una de estas instalaciones es la Planta de Agua Potable El Cebollar, que abastece a distintos sectores, entre ellos el Mutualista (Sector 2).

Sin embargo, con el crecimiento demográfico, la densificación urbana y el incremento en la actividad comercial de la zona, la red original diseñada para una población menor y condiciones de consumo diferentes ha empezado a presentar caídas de presión en horas pico, cortes temporales y reducción en la eficiencia operativa. Estas deficiencias afectan tanto a los hogares como a establecimientos que dependen directamente del agua potable para sus actividades diarias, como restaurantes, lavanderías, centros educativos y comercios.

La falta de una evaluación hidráulica actualizada impide conocer con precisión el estado operativo de la red, por lo que se hace necesario realizar un diagnóstico técnico

que permita identificar los puntos críticos, cuantificar las pérdidas de carga y proponer un reforzamiento que asegure un servicio continuo y eficiente.

La problemática identificada en el sector Mutualista responde a un patrón recurrente en el contexto nacional. Investigaciones como la de (Preciado & Cabrera, 2021) han evidenciado que el deterioro progresivo de la infraestructura, combinado con el incremento poblacional no previsto en el diseño original, produce un aumento significativo en las pérdidas de carga, comprometiendo la eficiencia del sistema de distribución.

Esta realidad también la describe (Vélez, 2024) en sus estudios sobre expansiones urbanas, quien señala que la ausencia de sectorización de la red genera un ciclo de fallas y fugas de difícil control. Esta experiencia refuerza la necesidad de intervenir técnicamente el sector Mutualista mediante un reforzamiento hidráulico fundamentado en modelación computacional, con el fin de garantizar la continuidad y calidad del servicio ante el incremento sostenido de la demanda.

Justificación

El presente estudio se justifica por la necesidad urgente de mejorar el rendimiento hidráulico del sistema de distribución en el sector Mutualista, garantizando la continuidad del servicio y el cumplimiento de las presiones mínimas establecidas por la normativa ecuatoriana.

Desde el punto de vista técnico, la red actual presenta limitaciones que afectan su funcionamiento durante los periodos de mayor consumo. Evaluar y optimizar esta infraestructura permitirá incrementar su capacidad de conducción, reducir pérdidas por fricción y mejorar la eficiencia operativa del sistema.

En el ámbito social, las deficiencias en el suministro repercuten directamente en la calidad de vida de los habitantes, dificultando el acceso a un recurso básico indispensable para la salud y las actividades cotidianas.

Finalmente, en el aspecto económico y de gestión, la optimización del sistema representará un mejor aprovechamiento del recurso hídrico, una reducción de costos por mantenimiento y un aumento de la confiabilidad del servicio, contribuyendo a la sostenibilidad de la infraestructura de abastecimiento de Cuenca.

Alcance

El proyecto se desarrollará en el sector Mutualista, correspondiente al Sector 2 de la Planta El Cebollar, al norte de la ciudad de Cuenca. El estudio comprende el análisis de la red de distribución existente, considerando los parámetros hidráulicos fundamentales: presión, velocidad y pérdidas de carga, bajo condiciones actuales y proyectadas a futuro.

El alcance incluye la recopilación de información técnica proporcionada por ETAPA EP, el levantamiento de datos complementarios, la simulación hidráulica mediante el software WaterGEMS y la formulación de alternativas de reforzamiento.

La base técnica del estudio, que incluye el catastro de la red y los datos operativos iniciales, fue facilitada por ETAPA EP. Con base en una proyección poblacional, se realiza una comparación directa entre el comportamiento hidráulico actual del año 2025 y el escenario proyectado al año 2050. Este análisis comparativo permite cuantificar la degradación del servicio a lo largo de 25 años y determinar los refuerzos necesarios para cumplir con la demanda futura.

Este trabajo no contempla la ejecución física de las obras propuestas, sino el diseño técnico preliminar y la evaluación de escenarios hidráulicos que sirvan como base para futuras intervenciones de optimización de la red.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la capacidad de la red de abastecimiento de agua potable en el sector Mutualista del sector 2 de la planta del Cebollar acorde a las demandas actuales, y proponer un reforzamiento a futuro con el fin de garantizar un suministro eficiente y adecuado.

Objetivos específicos

- Recopilar información técnica del estado actual de la red de agua potable proporcionado por ETAPA EP
- Elaborar la modelación hidráulica con la información obtenida y evaluar la condición en que se encuentra la red de agua potable para identificar su condición operativa.
- Plantear posibles optimizaciones y refuerzos en el modelo hidráulico con el fin de mejorar el abastecimiento de la red.

Metodología

El proyecto se llevará a cabo mediante una serie de actividades que se realizarán en secuencia, lo que permitirá cumplir con los objetivos específicos planteados. La información necesaria sobre la red de agua potable del sector de estudio, como planos, datos de caudales, presiones y antigüedad de la red, será solicitada a ETAPA EP. Estos

datos servirán como base para conocer la situación actual de la red y para realizar la modelación hidráulica.

Para un control de la información, el procesamiento de los datos catastrales dentro de las 235,4 hectáreas del proyecto se organizará en dos sectores de estudio 2.1 y 2.2. Con la información recopilada se desarrollará la simulación hidráulica de la red en un software especializado, considerando las condiciones actuales de operación. En esta etapa se analizarán parámetros como caudales, presiones, diámetros y longitudes de las tuberías, con el fin de comprender cómo está funcionando el sistema frente a la demanda del sector.

A partir de los resultados de la simulación se identificarán las zonas que presentan problemas en el suministro o deficiencias en el servicio. Estas áreas se evaluarán con el propósito de detectar oportunidades de mejora. En este punto se integra la proyección de demanda para contrastar el funcionamiento de la red entre los años 2025 y 2050, evaluando la diferencia de las pérdidas de carga y el cumplimiento de las presiones mínimas normativas en ambos periodos.

Finalmente, se ajustarán los parámetros del modelo hidráulico y se propondrán cambios en la red, como modificaciones en tuberías y otros elementos. Las alternativas planteadas se compararán entre sí, con el objetivo de asegurar un buen funcionamiento del sistema que permita abastecer de manera adecuada la demanda actual y futura.

1. CAPÍTULO I: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA DE LA RED DE AGUA POTABLE BASADO EN DATOS DE ETAPA EP

1.1 Antecedentes Investigativos

La optimización de sistemas de agua potable en zonas urbanas consolidadas representa uno de los mayores desafíos para la ingeniería sanitaria en el Ecuador. A diferencia del diseño de redes nuevas, donde las condiciones son ideales, intervenir en una red existente implica enfrentarse a incertidumbres operativas. Por ello, esta investigación no parte de cero, sino que se fundamenta en experiencias previas que han logrado resolver problemáticas similares mediante el uso de tecnología de simulación.

1.1.1 Envejecimiento de la Infraestructura y la Pérdida de Energía

Otro factor determinante es el deterioro físico de los materiales. Con el paso de los años, las paredes internas de las tuberías sufren incrustaciones o desgaste que aumentan la fricción, actuando como un "freno" para el flujo del agua. Esta pérdida de capacidad conductiva suele ser subestimada en los cálculos tradicionales. Investigaciones como la de (Preciado & Cabrera, 2021) han puesto en evidencia que utilizar coeficientes de rugosidad de tubería nueva para evaluar redes antiguas conlleva a diseños deficientes que no resuelven el problema de fondo.

En el presente estudio se adoptó un criterio conservador fundamentado en estos hallazgos. La red del sector Mutualista ha experimentado un deterioro natural a lo largo de los años; por lo tanto, la solución técnica no necesariamente implica la sustitución total de la infraestructura, lo cual resulta económicamente inviable, sino la identificación y priorización de los tramos que han perdido capacidad hidráulica, orientando la inversión hacia las intervenciones de mayor impacto operativo.

1.1.2 Importancia de la Calibración Campo-Modelo

Uno de los errores más comunes en la ingeniería hidráulica es confiar ciegamente en los resultados que arroja el software sin contrastarlos con la realidad. Un modelo digital puede ser matemáticamente perfecto, pero si no se alimenta con datos reales, sus predicciones son inútiles. Al respecto, el estudio realizado por (Vélez, 2024) marca una pauta metodológica relevante para el presente trabajo. En su análisis, el autor demuestra que existe una brecha significativa entre la presión teórica calculada y la presión real registrada en los puntos de consumo cuando no se realiza una campaña de monitoreo con manómetros.

Para el caso del sector Mutualista, esto implica que el diagnóstico no puede limitarse a la construcción del modelo computacional. Siguiendo los lineamientos metodológicos de Vélez (2024), resulta indispensable realizar mediciones in situ en horas de máxima y mínima demanda, de modo que las variables del modelo sean ajustadas para representar el comportamiento real de la red antes de formular cualquier propuesta de mejora.

1.1.3 Dinámica del Consumo en Sectores de Expansión

El comportamiento de los usuarios también ha cambiado. Las zonas que antes eran puramente residenciales ahora albergan comercios y edificios multifamiliares, lo que altera los patrones de consumo de agua. (Yoza & Lluilema, 2023) analizan este fenómeno en profundidad, concluyendo que los picos de demanda son cada vez más agresivos en sectores de expansión urbana.

Este antecedente resulta determinante para el diseño del reforzamiento del sector Mutualista. Si los caudales de diseño se calculan a partir de consumos históricos desactualizados, el sistema presentará nuevamente deficiencias en el corto plazo. En concordancia con los planteamientos de Yoza y Lluilema (2023), en el presente estudio

la red fue proyectada para soportar escenarios de estrés hidráulico, verificando el cumplimiento de las presiones mínimas normativas incluso bajo condiciones de Caudal Máximo Horario.

1.1.4 Estrategia de Sectorización y Control

Finalmente, es necesario abordar la gestión operativa de la red. Una red abierta y sin control es difícil de operar y mantener. La experiencia documentada por (Chiquito, 2020) resalta que la sectorización, es decir, dividir la red en circuitos independientes, es la estrategia más efectiva para mejorar la continuidad del servicio y el control de presiones. Este principio técnico justifica la decisión de subdividir el área de estudio de 235,4 hectáreas en el Sector 2.1 y el Sector 2.2, permitiendo un diagnóstico hidráulico mucho más preciso y una operación controlada.

1.2 Información preliminar

El análisis del sistema de distribución en el sector Mutualista resulta relevante debido al crecimiento urbano progresivo de la zona y al incremento proyectado de la demanda de agua potable. Estas condiciones hacen necesario evaluar el comportamiento hidráulico actual de la red y verificar su capacidad de respuesta frente a escenarios futuros, considerando variables como presión, velocidad y pérdidas de carga.

1.2.1 Ubicación

El presente estudio se desarrolla en el sector Mutualista, correspondiente al sector 2 de la Planta de Agua Potable El Cebollar, ubicado al noroeste de la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay. Este sector forma parte del área urbana consolidada y presenta una topografía moderadamente irregular, lo que influye directamente en las condiciones de presión y conducción del sistema de distribución.

El sistema de abastecimiento del sector se encuentra conectado a la Planta de Agua Potable El Cebollar, la cual suministra agua tratada a través de una red primaria que se ramifica en diversas zonas del cantón.

El abastecimiento hacia el sector Mutualista se realiza a través de líneas de conducción provenientes del tanque de reserva Cebollar N.º 2, que alimenta directamente la red secundaria de distribución de la zona.

1.2.2 Zona de estudio

La delimitación del proyecto es el primer paso para entender la demanda hídrica a la que está sometida la infraestructura. El área de estudio se encuentra delimitada por los siguientes sectores:

Norte: Barrial Blanco

Sur: De la Verbena

Este: Av. de las Américas

Oeste: San Miguel del Cebollar

Esta zona abarca una superficie total de 235,4 hectáreas, una extensión que representa un desafío importante debido a su consolidación urbana. Al tratarse de un área con una alta densidad de edificaciones residenciales y una actividad comercial en constante expansión, el consumo de agua no es uniforme, lo que genera variaciones en los caudales que la red debe transportar en diferentes horas del día.

Dada la magnitud de este territorio y con el objetivo de realizar un análisis hidráulico con el mayor rigor posible, se ha determinado que la representación y el diagnóstico de la red se realicen mediante la división del área total en dos sectores estratégicos: el Sector 2.1 y el Sector 2.2.

Ambos sectores juntos forman una sola unidad integrada que depende directamente del tanque de reserva de la planta del Cebollar. Esta fragmentación facilita

la identificación de nodos, válvulas y tramos de tuberías específicos, los cuales se perderían si lo realizáramos contemplando un solo sector general.

Un factor determinante que vuelve más compleja a esta zona es su topografía. El terreno presenta variaciones altitudinales que rondan entre los 2 530 y 2 560 m.s.n.m. En términos de ingeniería hidráulica, estos 30 metros de diferencia de nivel son fundamentales, ya que influyen directamente en la presión y dinámica de la red. Un manejo inadecuado de estas pendientes, sumado a la extensión del área, es lo que suele derivar en las caídas de presión registradas en los puntos más alejados o elevados del sector Mutualista.

A continuación, se presentan los levantamientos planimétricos detallados de cada sección para visualizar la configuración actual de la red de distribución; tal como se detalla en las Ilustraciones 1-1 y 1-2:

Ilustración 1-1: Plano de la red de distribución - Sector 2.1 del sector Mutualista



Fuente: Elaboración propia basada en información técnica de ETAPA EP

Tabla 1-1: Levantamiento de información comercial y de servicios, Sector 2.1

ESTABLECIMIENTOS DE ALIMENTACIÓN	COMERCIO Y SERVICIOS DIARIOS	SERVICIOS PERSONALES Y BIENESTAR	ATENCIÓN MÉDICA (CONSULTORIOS)	ESPACIOS PUBLICOS E INSTITUCIONALES
Viko restaurante	Indumesa Cía Ltda	Gimnasio Massgym	Farmacia Cruz Azul	Pre universitario Galileo Galilei
Hiroshi Sushi Cuenca	Moblime fábrica de muebles	Gimnasio Dorian	Mimos Vet	Comunidad Educativa Particular Carlos Crespi II
Pollos de la Remigio	Ecuamueble	Lion Titanium Gym	Crom Centro de Radiología Oral	Iglesia Adventista del Séptimo Día
	Talleres Mendez	Lavanderia YR	Hospital Mariano Estrella Lazareto	Parque Carlos Crespi
	Cardoctor autos de lujo			Parque de la Luz
	Infertec herramientas y maquinaria			Universidad Católica de Cuenca
	Distribuidora de Huevos El Cisne			Campus Basílica Universidad de Cuenca
	Talleres Leon y Uwishin			Parque la Floresta II
	Servi Actros			Iglesia Católica de Lazareto
	Taller automotriz Tecnibus			Hostal Queen Love
				Centro Educativo Arco Iris
				Parque Zenon

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1-2: Levantamiento de información comercial y de servicios, Sector 2.2

ESTABLECIMIENTOS DE ALIMENTACIÓN	COMERCIO Y SERVICIOS DIARIOS	SERVICIOS PERSONALES Y BIENESTAR	ATENCIÓN MÉDICA (CONSULTORIOS)	ESPACIOS PUBLICOS E INSTITUCIONALES
Family Wings	VicelVid, Espejos y Vidrios	VL Gym Funcional	LI Farmacéutica Imhopet Cía. Ltda.	Subestación 17 Los Cerezos – Centrosur
Ceviches Express Manabí	Metalcon, Metales y Aluminio	Innovaciones Eventos y Catering	Centro Gerontológico Nueva Esperanza	Escuela Ulises Chacón
BuonGelatte Heladería	Persianas Gold			Datacenter ETAPA oficinas
Lácteos Casa Blanca	Casa Luna Recepción			Iglesia Evangélica Torre Fuente
Pastelería Dulce Tentación	Segurcromsig Cía. Ltda.			Planta de Agua El Cebollar
Just Eat It Restaurante	Aventura Tour Van S.A.			
Manía Pizza				

Fuente: Elaboración propia

1.2.4 Abastecimiento de la red.

El suministro de agua para el sector Mutualista forma parte del sistema general de la ciudad de Cuenca y depende de la Planta de Agua Potable El Cebollar. Esta planta capta el recurso hídrico del Río Tomebamba, el cual pertenece a la cuenca que recibe aportes del Río Culebrillas en su parte alta. El agua es conducida hasta la planta para su tratamiento y, una vez potabilizada, se distribuye hacia los distintos sectores de la ciudad mediante los tanques de almacenamiento y la red de conducción correspondiente.

En el sector Mutualista, la red de distribución está conformada mayoritariamente por tuberías de PVC, existiendo únicamente tramos puntuales de asbesto-cemento que corresponden a instalaciones más antiguas. Los diámetros presentes en la red varían entre ≤ 50 mm y 300 mm, dependiendo de la jerarquía de cada conducción dentro del sistema.

Esta configuración responde a ampliaciones ejecutadas en diferentes periodos, lo que ha generado una red con características físicas variadas en cuanto a material y sección hidráulica. Estas diferencias deben considerarse dentro del modelo hidráulico, ya que influyen directamente en las pérdidas de carga, velocidades de flujo y presiones disponibles en cada tramo.

Para el desarrollo de la simulación, se realizó el mapeo de la red utilizando una codificación por colores según los diámetros nominales. Esto permitió identificar claramente las tuberías de menor diámetro, que corresponden principalmente a redes secundarias, y las tuberías de mayor diámetro, que funcionan como conducciones principales de transporte de caudal.

La variación de diámetros es un aspecto clave en el análisis, ya que tanto la velocidad del flujo como las pérdidas de carga dependen directamente de la sección de la tubería. La identificación de estos tramos permite detectar posibles puntos críticos del sistema, especialmente al comparar el escenario base del año 2025 con la proyección de

demanda planteada para el año 2050, donde podrían presentarse caídas de presión en los sectores más alejados del punto de alimentación.

1.3 Conceptos Generales

El diseño de redes de distribución de agua potable se fundamenta en los principios de la hidráulica de los fluidos, los cuales describen el comportamiento del agua en movimiento y permiten garantizar que el sistema funcione de manera segura y eficiente. Estos principios se traducen en ecuaciones que representan la conservación de la masa, energía y pérdidas de carga por fricción, los cuales son elementos esenciales en el análisis hidráulico.

1.3.1 Periodo de diseño y vida útil

El periodo de diseño es el tiempo proyectado para el cual la red trabajará de manera eficiente antes de requerir una ampliación, basándose en el crecimiento poblacional (Mays, 2000; Saldarriaga, 2016). Está estrechamente ligado a la vida útil, que es el tiempo durante el cual las tuberías y accesorios funcionan de manera segura antes de necesitar reemplazo por desgaste o deterioro.

1.3.2 Caudales de diseño

- **Caudal Medio Diario:** Volumen promedio de agua consumido por la población en un día, analizado a lo largo de un año.
- **Caudal Máximo Diario:** Volumen máximo de agua consumido durante el día de mayor demanda del año.
- **Caudal Máximo Horario:** Volumen de agua consumido durante la hora de mayor demanda del día crítico. Es el escenario principal de estrés utilizado para evaluar las presiones y pérdidas en el modelo.

- **Dotación:** Cantidad promedio de agua que consume cada habitante por día, expresada en litros/habitante/día.

1.3.3 Principio de conservación de la masa

Establece que el caudal que entra en un sistema debe ser igual al que sale, sin acumulación de fluido en el interior (Mays, 2000). De este principio se deriva la ecuación de continuidad.

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

1.3.4 Principio de conservación de la energía

Establece que la suma de las energías de presión, de posición y cinética de un fluido se mantiene constante entre dos puntos del sistema, descontando las pérdidas ocasionadas por la fricción (Saldarriaga, 2016) y los accesorios. Su fórmula se conoce como la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

P = Presión

γ = Peso específico del fluido

V = Velocidad del fluido

g = Gravedad

z = altura respecto al nivel de referencia

1.3.5 Ecuaciones de pérdidas de carga

Las pérdidas de carga se originan por la resistencia que ofrece la tubería al paso del fluido (Saldarriaga, 2016) y por los accesorios hidráulicos presentes en el sistema. Para su cálculo pueden emplearse dos fórmulas principales:

- Ecuación de Darcy-Weisbach:

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

hf = Pérdida de carga por fricción

f = Factor de rugosidad

L = Longitud de la tubería

v = Velocidad del agua en la tubería

D = Diámetro de la tubería

g = Gravedad

- Ecuación de Hazen-Williams

$$hf = \frac{10.67 \cdot L \cdot Q^{1.852}}{C^{1.852} \cdot D^{4.87}}$$

hf = Pérdida de carga

L = Longitud de la tubería

Q = Caudal

D = Diámetro interno de la tubería

C = Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams

Para redes cerradas o malladas se aplican métodos iterativos como Hardy Cross o Newton-Raphson (Mays, 2000; Saldarriaga, 2016), que permite equilibrar las pérdidas y caudales en cada lazo de la red hasta lograr un estado hidráulico estable.

El conocimiento y correcta aplicación de estos principios y ecuaciones permiten diseñar redes de distribución eficientes, asegurando presiones adecuadas, velocidades controladas y un suministro continuo en toda la zona de servicio.

1.4 Marco Legal y Normativo

Toda intervención en infraestructura pública debe regirse estrictamente por el ordenamiento jurídico y técnico del país. El cumplimiento de estas normas no es solo un

requisito burocrático, sino la garantía de que el diseño protegerá la salud pública y la seguridad de las edificaciones:

1.4.1 Marco legal

El sustento legal del proyecto garantiza que la optimización del sistema cumpla con los derechos ciudadanos y las competencias institucionales.

1. Constitución de la República del Ecuador (2008):

- **Art. 12:** Reconoce que el derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable.
- **Art. 314:** Establece que el Estado es responsable de la provisión de los servicios públicos de agua potable, debiendo garantizar su calidad, eficiencia y continuidad.

2. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos del Agua (LORHUAA):

Esta ley regula la gestión integral de los recursos hídricos. Establece como máxima prioridad el uso del agua para consumo humano, obligando a las prestadoras de servicios a garantizar la sostenibilidad de la infraestructura para satisfacer la demanda poblacional.

3. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD):

En su Artículo 55, literal d, consagra que es competencia exclusiva de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) municipales prestar los servicios públicos de agua potable. En el

cantón Cuenca, esta competencia es ejecutada y administrada por la Empresa Publica ETAPA EP.

1.4.2 Marco técnico y reglamentario

1. Normas de Diseño de Sistemas de Agua Potable (CO 10.07-601 – Ministerio del Ambiente y Energía):

Constituyen el principal documento rector para el diseño hidráulico en el país. De esta normativa se extraen los límites restrictivos obligatorios para el modelo computacional, tales como presiones dinámicas mínimas, velocidad de flujo, pérdidas de carga máximas tolerables. Además, los periodos de diseño para la proyección de la población futura.

2. Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11):

Capítulo Norma Hidrosanitaria (NHE): Dicta los lineamientos técnicos obligatorios para las instalaciones interiores. Su cumplimiento es complementario al diseño de la red pública, ya que garantiza que las presiones de servicio entregadas por la matriz, las cuales están reguladas entre 20 y 50 m.c.a., sean compatibles y seguras para el correcto funcionamiento de los aparatos sanitarios dentro de las edificaciones.

3. Normativa del servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN):

Regula la calidad y las especificaciones de los materiales de construcción. Para este proyecto, destacan las normas NTE INEN 1373 y NTE INEN 1744, las cuales certifican las propiedades físicas, espesores y presiones nominales de las tuberías de PVC y PEAD, asegurando que soporten las presiones de la red.

4. Especificaciones Técnicas de ETAPA EP:

Al ser ETAPA EP la entidad administradora de la red del sector Mutualista, el diseño de reforzamiento debe alinearse con sus manuales internos

de diseño y construcción, los cuales adaptan las normativas nacionales a las condiciones topográficas y operativas específicas de la ciudad.

2. CAPÍTULO II: MODELACIÓN HIDRÁULICA Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ACTUAL

2.1 Modelación Hidráulica de la Red

Para evaluar el comportamiento de la red de abastecimiento de agua potable del sector Mutualista, tanto en sus condiciones de servicio en el año 2025, como en su proyección para el año 2050, se desarrolló un análisis hidráulico detallado. La metodología empleada se basó en la actualización de un modelo calibrado previamente, lo que permitió someter la red a escenarios de máximo estrés hídrico bajo condiciones realistas. El procesamiento de los datos y la simulación se ejecutaron mediante el software especializado WaterGEMS.

2.1.1 Diagnóstico topológico del modelo base

Para iniciar la modelación, se partió de la información planimétrica y del modelo hidráulico base correspondiente al año 2015, facilitados por la Empresa Pública ETAPA EP (ETAPA EP, 2024). Esta información contenía el catastro físico original de los sectores 2.1 y 2.2, el cual sirvió como esqueleto estructural para las proyecciones futuras, asegurando que el análisis parta de la infraestructura real instalada.

La topología de este modelo base integraba los siguientes componentes fundamentales (Saldarriaga, 2016; Mays, 2000):

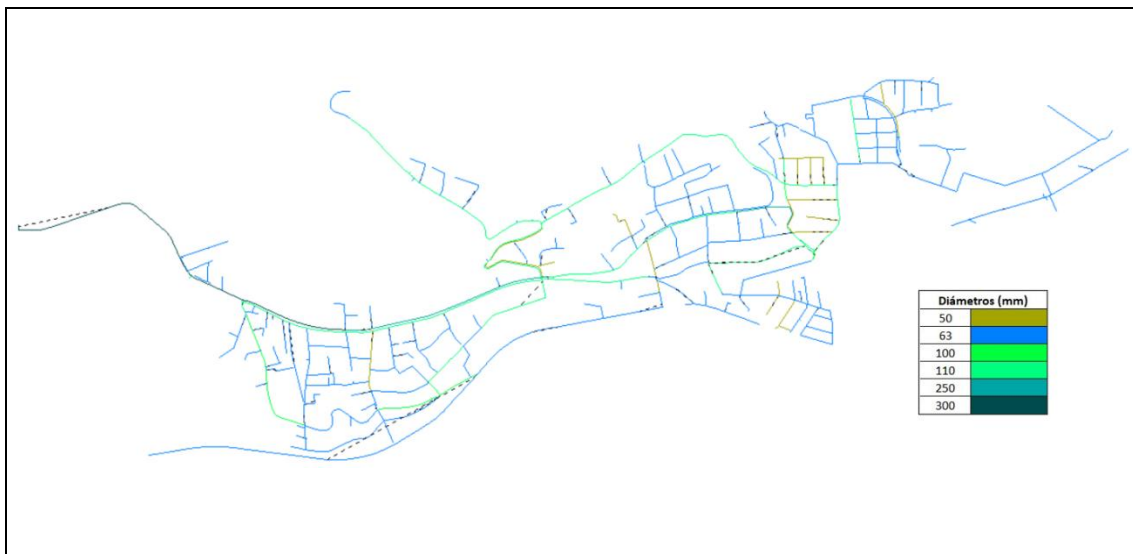
- **Fuente de alimentación:** Representada por el tanque de reserva Cebollar N.º 2, del cual se extrajeron las cotas de fondo y los niveles máximos de operación para establecer la carga piezométrica inicial del sistema.
- **Nodos de consumo:** Se validó la altimetría de cada unión, registrando variaciones topográficas significativas en el terreno, con elevaciones que

oscilan entre los 2 530 y 2 560 m.s.n.m. Esta diferencia de nivel incide directamente en las presiones estáticas de la red.

- **Red de conducción:** Se verificaron las longitudes de los tramos y los diámetros instalados. El material predominante en el modelo es el Policloruro de Vinilo (PVC), con diámetros que van desde las redes de distribución menor hasta las matrices principales
- **Demandas base:** El modelo original contemplaba las extracciones nodales calibradas para la población y el consumo comercial del año 2015.

Para visualizar la distribución espacial de la infraestructura, se mapeo la red base codificando las tuberías según sus diámetros nominales. La siguiente ilustración detalla esta configuración para el Sector 2.1.

Ilustración 2-1: Distribución de diámetros de la red del Sector 2.1.



Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, el Sector 2.2 presenta una configuración de materiales y diámetros similar, aunque con variaciones en la densidad de las redes secundarias debido a la lotización de los predios, tal como se detalla a continuación.

Ilustración 2-2: Distribución de diámetros en la red del Sector 2.2.



Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en las ilustraciones 2-1 y 2-2, los diámetros instalados varían desde los 50 mm hasta los 300 mm, respondiendo a las distintas etapas de expansión del sector. Para cuantificar de forma precisa esta infraestructura, se extrajo del modelo la longitud total de tubería agrupada por su diámetro comercial, cuyos valores se resumen en las siguientes tablas 2-1 y 2-2.

Tabla 2-1: Cuantificación de redes existentes según material y diámetro nominal, Sector 2.1

Diámetro (mm)	Material	Longitud (m)
50	AC	651.35
	PVC	1801.88
63	PVC	20126.61
100	AC	323.37
	PVC	697.74
110	PVC	6160.84
250	PVC	973.84
300	PVC	1627.87

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-2: Cuantificación de redes existentes según material y diámetro nominal, Sector 2.2

Diámetro (mm)	Material	Longitud (m)
50	PVC	86.36
63	PVC	10240.89
110	PVC	1897.71
160	PVC	694.07
200	PVC	800.42
250	PVC	1718.81
300	PVC	20.33

Fuente: Elaboración propia

2.1.2 Proyección poblacional y estimación de caudales de diseño

Debido a que la red base representaba un escenario desactualizado, fue necesario actualizar las demandas del sistema para realizar el diagnóstico hidráulico. El sector Mutualista ha experimentado un crecimiento demográfico y comercial importante, por lo que los caudales de diseño considerados en el año 2015 ya no representan adecuadamente las condiciones actuales de operación. Para ello, se utilizaron los datos proporcionados por ETAPA EP sobre población servida, caudal medio y caudal medio horario, con el fin de generar el modelo actualizado correspondiente al año 2025.

De igual manera, se consideraron las proyecciones proporcionadas por ETAPA EP para analizar el comportamiento de la red a un horizonte de 25 años, correspondiente al año 2050. Con base en esta información se realizó una proyección poblacional para estimar el número de habitantes en ambos escenarios. A partir de estos datos y aplicando las dotaciones normativas, se calcularon los caudales característicos de la red, enfocando el análisis en el caudal máximo horario (QMH), que representa la condición más crítica de operación del sistema, como se muestran en las tablas 2-3, 2-4 y 2-5.

Tabla 2-3: Factores utilizados por Etapa EP

Factores utilizados por ETAPA EP – Sector Mutualista		
Año	2025	2050
Pérdidas	36%	30%
Dotación (l/s)		150
KMD		1.8

Fuente: Elaboración propia adaptado de datos proporcionados por ETAPA (2025)

Tabla 2-4: Proyección ETAPA – Sector Mutualista, Sector 2.1

Proyección ETAPA – Sector Mutualista, Sector 2.1						
Año	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Población (habs)	14562	15217	15740	16138	16385	16471
Qm (l/s)	38.89	40.03	40.79	41.20	41.23	40.85
QMH (l/s)	70.79	72.85	74.23	74.99	75.03	74.35

Fuente: Elaboración propia adaptado de datos proporcionados por ETAPA (2025)

Tabla 2-5: Proyección ETAPA – Sector Mutualista, Sector 2.2

Proyección ETAPA – Sector Mutualista, Sector 2.2						
Año	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Población (habs)	4814	5081	5312	5508	5657	5756
Qm (l/s)	12.86	13.37	13.76	14.06	14.23	14.28
QMH (l/s)	23.40	24.33	25.05	25.59	25.91	25.98

Fuente: Elaboración propia adaptado de datos proporcionados por ETAPA (2025)

2.1.3 Actualización de demandas

Una vez definidos los caudales máximos horarios para los años 2025 y 2050, se procedió a actualizar el modelo en WaterGEMS (Mays, 2000). Para evitar la reasignación manual de caudales nodo por nodo y conservar la distribución espacial del consumo original, se optó por una metodología de escalado proporcional.

Se calculó un factor de multiplicación global para cada sector, relacionando el Caudal Máximo Horario proyectado con el caudal total registrado en el modelo base de 2015. La relación matemática empleada fue la siguiente:

$$F_m = \frac{QMH_{proyectado}}{QMH_{2015}}$$

Este factor de crecimiento fue introducido en el modelo a través de la herramienta *Demand Control Center* del software WaterGEMS. La aplicación de este multiplicador permitió escalar automáticamente las extracciones base de cada nodo, actualizando toda la red a las condiciones de estrés hidráulico correspondientes a los escenarios 2025 y 2050, preparando así el modelo para la ejecución de la simulación y el posterior diagnóstico de presiones.

2.2 Evaluación Operativa y Diagnóstico del Escenario Actual

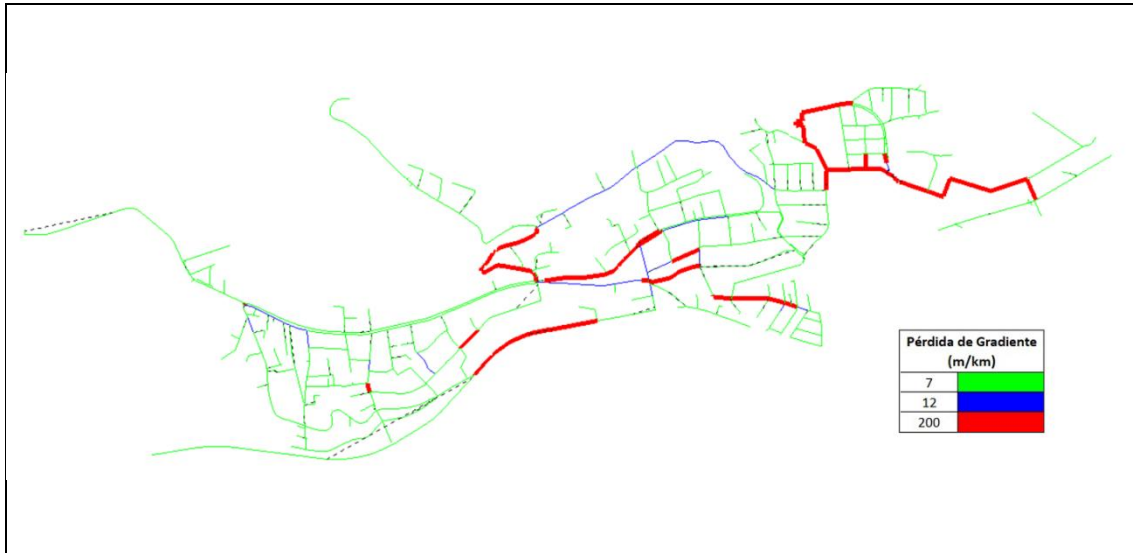
Una vez configurado el modelo base y actualizadas las demandas mediante el factor de multiplicación para el año 2025, se ejecutó la simulación hidráulica bajo la condición más crítica de operación: el Caudal Máximo Horario. El objetivo de esta fase es diagnosticar el estado real de la red existente en los sectores 2.1 y 2.2, identificando las deficiencias en el servicio mediante el análisis de dos parámetros restrictivos dictaminados por la Norma CO 10.07-601: las presiones dinámicas y las pérdidas de carga.

2.2.1 Capacidad de conducción y pérdidas de carga

En la evaluación hidráulica la relación entre velocidad del flujo y fricción es directa, cuando el diámetro de una tubería resulta insuficiente para el volumen de agua transportado, el flujo se acelera irremediablemente. Operativamente, estas altas velocidades incrementan de forma exponencial la disipación de energía y el desgaste progresivo del material. Al analizar el escenario del año 2025, el principal indicador cuantitativo de que la red está operando al límite de su capacidad es precisamente el gradiente hidráulico. El modelo computacional detectó múltiples tramos donde la pérdida

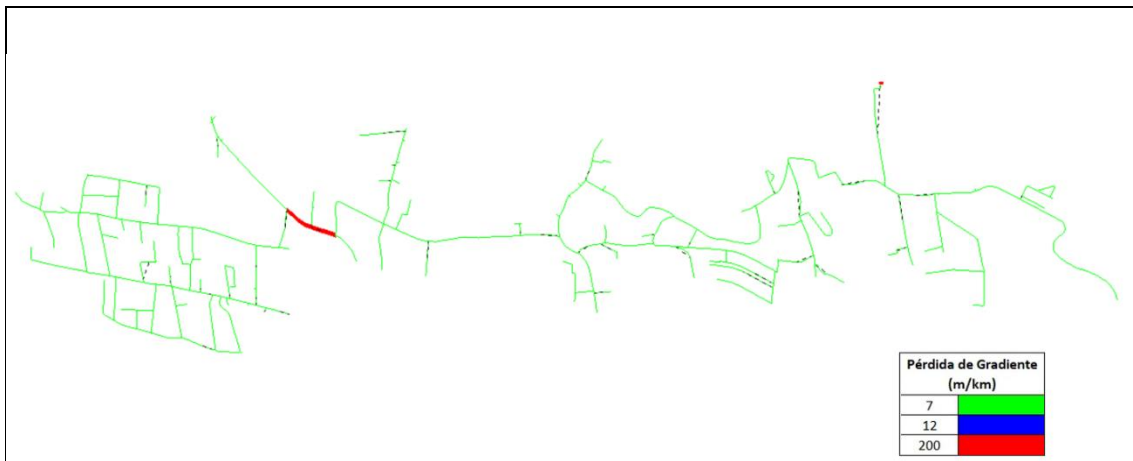
de carga sobrepasa con creces el límite máximo permitido de 12 m/km, lo que evidencia una restricción física severa en la conducción. La distribución espacial de esta fricción excesiva se detalla a continuación en los mapas correspondientes a ambos sectores.

Ilustración 2-3: Pérdidas de gradiente en el Sector 2.1 (2025)



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 2-4: Pérdidas de gradiente en el Sector 2.2 (2025).



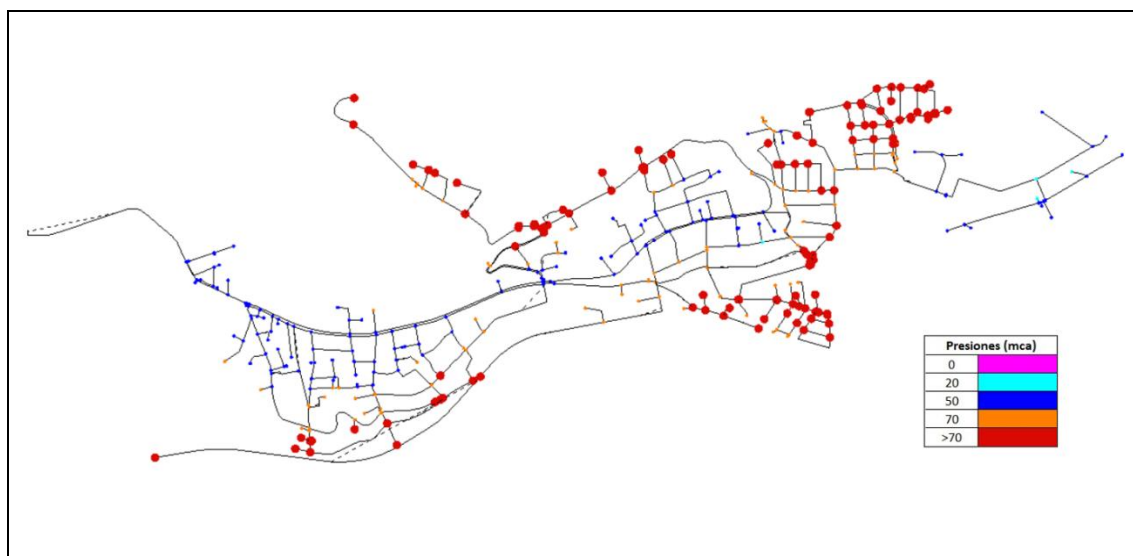
Fuente: Elaboración propia.

Como se expone en las coloraciones críticas señaladas en la leyenda de los mapas, estas tuberías actúan como verdaderos cuellos de botella dentro de la red de distribución. Esta pérdida de energía dificulta enormemente el transporte eficiente del volumen de agua hacia los ramales secundarios, lo que en la práctica diaria disminuye drásticamente la capacidad operativa del sistema en los puntos de consumo más alejados de la fuente de alimentación principal, el tanque Cebollar N.º 2.

2.2.2 Presiones dinámicas

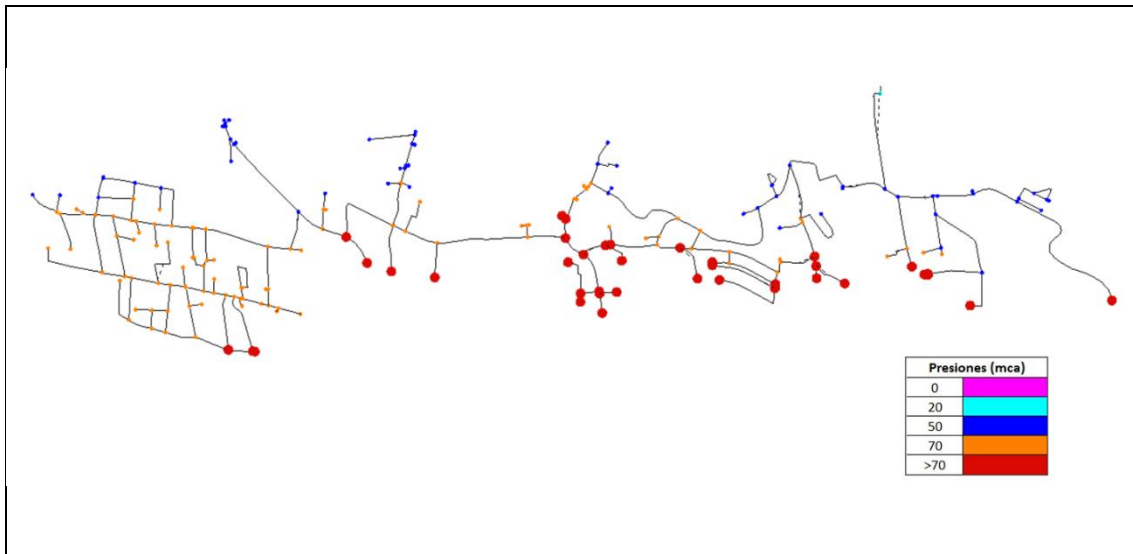
Las deficiencias evidenciadas en la capacidad de conducción y la fricción excesiva en las tuberías matrices terminan afectando de manera directa y negativa la presión dinámica disponible para el usuario final. Al respecto, la normativa nacional exige garantizar una presión mínima de 20 m.c.a. durante la hora de máximo consumo, asegurando así que el servicio llegue de manera óptima a las edificaciones sin requerir sistemas de bombeo adicionales, como se muestra en las ilustraciones 2-5 y 2-6.

Ilustración 2-5: Presiones dinámicas el Sector 2.1 (2025)



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 2-6: Presiones dinámicas en el Sector 2.2 (2025)



Fuente: Elaboración propia.

Los mapas de isopresiones generados por el simulador revelan una vulnerabilidad evidente en la red actual. Al analizar detenidamente los resultados, se observa que varios nodos, ubicados principalmente en las zonas topográficamente más altas y en los ramales terminales del sistema, no logran alcanzar este valor mínimo de servicio exigido por la norma. Este déficit de carga piezométrica confirma técnicamente que el sistema, bajo las condiciones del año 2025, ya presenta problemas sustanciales para cubrir la demanda poblacional de manera adecuada.

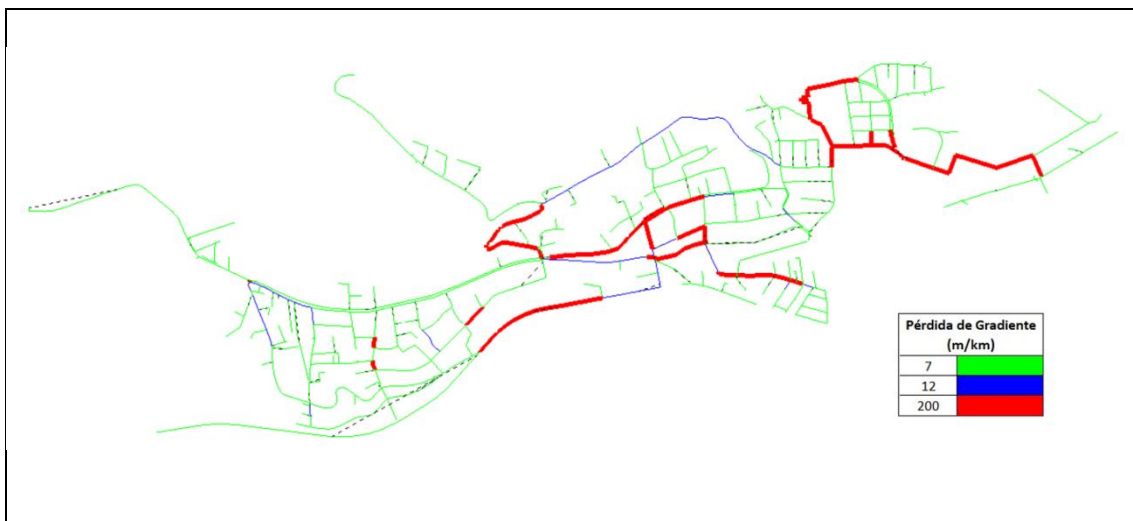
2.3 Evaluación Operativa y Diagnóstico del Escenario Proyectado

Para comprobar la viabilidad operativa del sistema a largo plazo y anticipar su comportamiento, la red fue simulada bajo las demandas proyectadas para el horizonte de diseño en el año 2050. Este escenario futuro de estrés hidráulico se configuró aplicando el nuevo factor de multiplicación poblacional directamente en el entorno de simulación del software.

2.3.1 Capacidad de conducción y pérdidas de carga

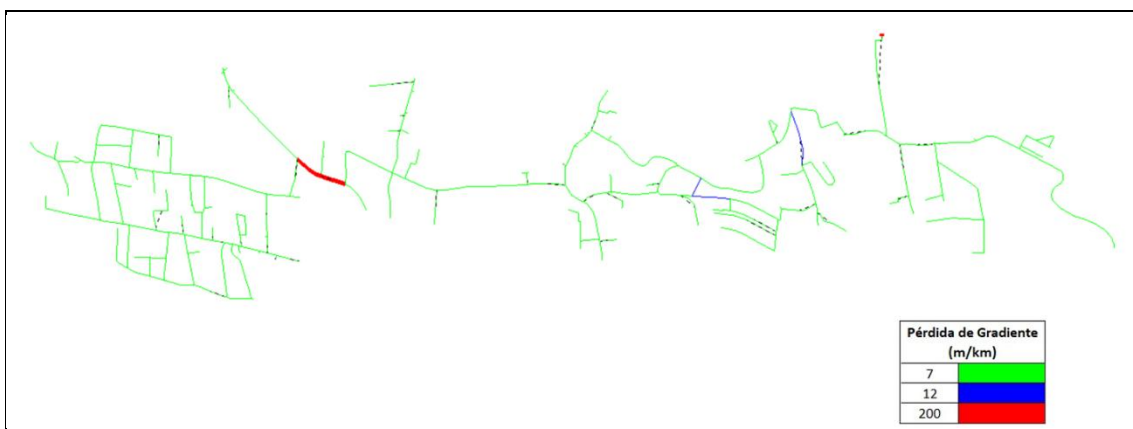
El caudal proyectado para el año 2050 sobrepasa en su totalidad la capacidad de transporte para la cual fueron diseñadas y construidas las tuberías existentes. El impacto directo de este déficit geométrico se refleja en un incremento sustancial y generalizado de las fuerzas de fricción a lo largo de toda la red, lo cual se evidencia claramente en los esquemas de gradiente hidráulico presentados a continuación.

Ilustración 2-7: Pérdidas de gradiente en el Sector 2.1 (2050)



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 2-8: Pérdidas de gradiente en el Sector 2.2 (2050)



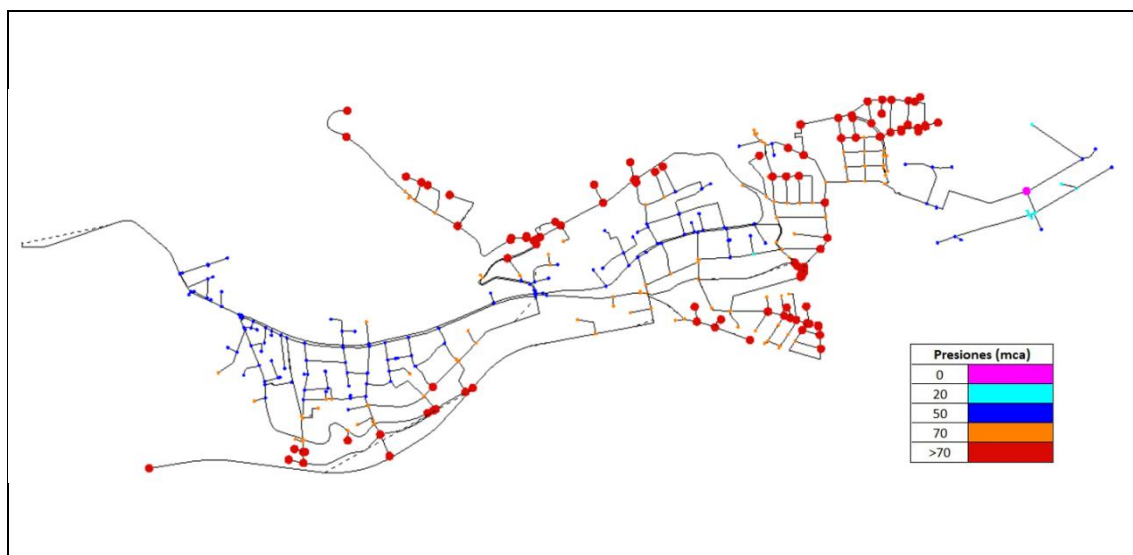
Fuente: Elaboración propia.

La modelación para este horizonte de diseño arroja resultados concluyentes: la mayor parte de la conducción matriz supera ampliamente el límite normativo de 12 m/km. Bajo estas condiciones extremas, las tuberías principales agotan la energía disponible en los primeros tramos de su recorrido. Al disipar la totalidad de la carga piezométrica útil al inicio del circuito, se impide físicamente el flujo adecuado y continuo de agua hacia el resto del sector, comprometiendo la distribución integral.

2.3.2 Presiones dinámicas

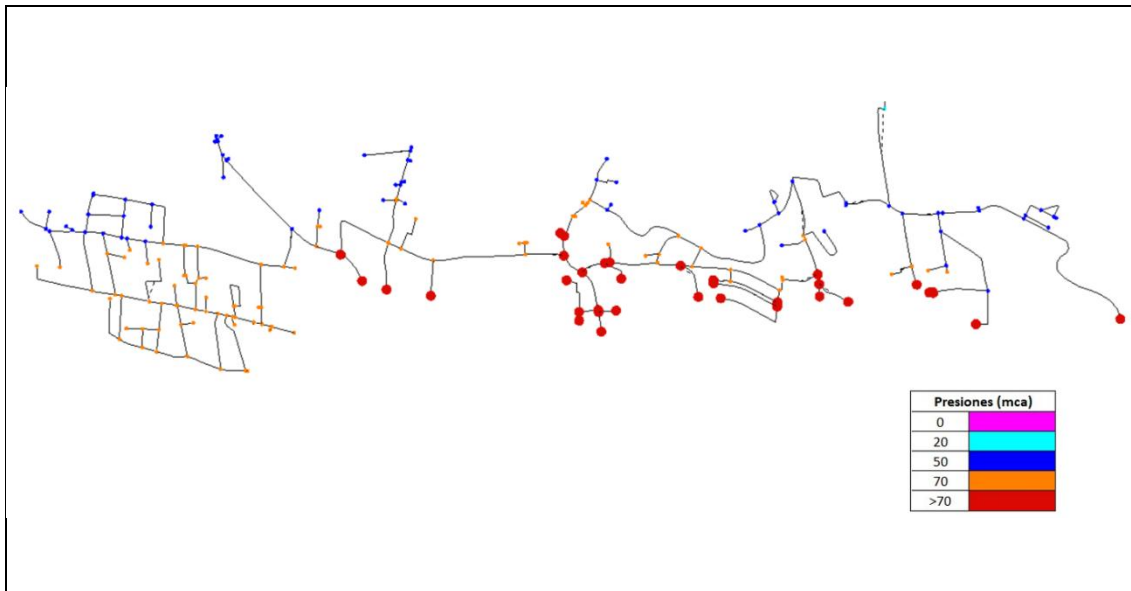
A diferencia de los problemas de presión puntuales y localizados que se registraron en el escenario del año 2025, la proyección para el año 2050 anticipa un déficit sistémico y generalizado que compromete severamente la operatividad de ambos sectores de estudio. La falta de energía útil se extiende por toda la red, tal como se ilustra en la siguiente planimetría de isopresiones.

Ilustración 2-9: Presiones dinámicas en el Sector 2.1 (2050)



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 2-10: Presiones dinámicas en el Sector 2.2 (2050)



Fuente: Elaboración propia.

La evaluación gráfica y tabular demuestra que la inmensa mayoría de los nodos de consumo registran presiones dinámicas superiores a los 70 m.c.a., situándose significativamente por encima de los rangos óptimos de operación. Este panorama evidencia una problemática de sobrepresión en gran parte de la red, lo que representa un riesgo elevado de daños estructurales, fatiga de materiales e incremento de pérdidas físicas por fugas en el sistema debido a las elevadas presiones sostenidas.

2.4 Análisis comparativo de la operatividad hidráulica (2025-2050)

Este apartado constituye el eje central del diagnóstico, donde se contrasta la resiliencia del sistema actual frente al incremento de la demanda proyectada a 25 años. El análisis permite visualizar la degradación física de los parámetros de servicio conforme el consumo aumenta hacia el final del horizonte de diseño.

2.4.1 Evaluación comparativa del Sector 2.1

En el Sector 2.1, el crecimiento de la demanda desestabiliza las arterias principales que ya operan en el umbral de su capacidad. Como se observa en la evaluación operativa,

la longitud de tuberías que presentan gradientes hidráulicos superiores a los 10 m/km se incrementa de forma alarmante, pasando de 4.21 kilómetros en el escenario 2025 a un total de 5.13 kilómetros para el año 2050. Simultáneamente, la longitud de tuberías con velocidades excesivas por encima de los 2 m/s alcanza una extensión de 1.01 kilómetros.

Este estrangulamiento genera una disipación energética por fricción sumamente perjudicial para la operatividad. La presión dinámica máxima en este sector alcanza valores de 97.9 metros de columna de agua en el escenario 2025, descendiendo hasta los 95.8 metros de columna de agua para el año 2050. Este descenso responde a que, al incrementarse el caudal demandado, la pérdida de energía por kilómetro recorrido es mayor, restando carga residual en los nodos. A pesar de esta caída en los máximos, el número de nodos con déficit de presión por debajo del umbral de tolerancia mínima de 10 metros de columna de agua se eleva de 4 a 11 puntos críticos, evidenciando que la energía no llega de forma equitativa a las zonas de mayor elevación debido a la resistencia friccional del sistema.

Tabla 2-6: Comparación de resultados de la evaluación operativa 2025-2050, Sector 2.1

Comparación de resultados de la evaluación operativa de la red			
Año	2025	2050	
Población	14562	16471	
QMH (l/s)	70.79	74.35	
Long. Tuberías con $v > 2\text{m/s}$ (km)	0.97	1.01	
Long. Tuberías con $hf > 10\text{km}$ (km)	4.21	5.13	
# de Nodos con Presión Dinámica < 20 m.c.a.	4	11	
# Nodos con Presión Dinámica > 50 m.c.a.	216	215	
Valor Máximo de Presión Encontrada (m.c.a)	97.9	95.8	

Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Evaluación comparativa del Sector 2.2

Para el Sector 2.2, la configuración de la red amortigua el problema de fricción, manteniendo la longitud de tuberías con gradientes hidráulicos mayores a 10 m/km

constantes en un valor de 0.17 kilómetros. Sin embargo, el diagnóstico manifiesta una vulnerabilidad crítica en la gestión de la energía potencial y las sobrepresiones. La presión máxima registrada en este sector es de 86.4 metros de columna de agua para el año 2025 y se sitúa en 86.1 metros de columna de agua para el año 2050.

Estos valores representan una condición de sobrepresión constante que somete a las tuberías de PVC y a las acometidas domiciliarias a un estado de fatiga mecánica permanente. Al superar con creces los límites de confort y seguridad operativa de las instalaciones sanitarias, se eleva significativamente el riesgo de roturas por transitorios hidráulicos y fugas no visibles en las uniones, lo cual compromete la eficiencia física de la red en el largo plazo.

Tabla 2-7: Comparación de resultados de la evaluación operativa 2025-2050, Sector 2.2

Comparación de resultados de la evaluación operativa de la red			
Año	2025	2050	
Población	4814	5756	
QMH (l/s)	23.40	25.98	
Long. Tuberías con $v > 2\text{m/s}$ (km)	0.17	0.17	
Long. Tuberías con $hf > 10\text{km}$ (km)	0.17	0.17	
# de Nodos con Presión Dinámica $< 20\text{ m.c.a.}$	1	1	
# Nodos con Presión Dinámica $> 50\text{ m.c.a.}$	142	130	
Valor Máximo de Presión Encontrada (m.c.a)	86.4	86.1	

Fuente: Elaboración propia

2.5 Conclusión del diagnóstico y justificación técnica de la intervención

Tras la validación del modelo en el software WaterGEMS, se concluye de manera técnica que la red del sector Mutualista es hidráulicamente ineficiente para el horizonte de diseño 2050. Los hallazgos cuantitativos que fundamentan la necesidad de un reforzamiento estructural se resumen en los siguientes puntos:

En primer lugar, el colapso por fricción en el Sector 2.1 es evidente al observar el aumento a 5.13 kilómetros de tuberías con gradientes hidráulicos excesivos. Esto

demuestra que los diámetros actuales son incapaces de transportar la demanda futura sin sacrificar la carga piezométrica, provocando que 11 nodos caigan en situación de déficit de suministro por debajo del umbral de tolerancia mínima de 10 metros de columna de agua.

En segundo lugar, se identifica una inestabilidad piezométrica marcada por la dualidad del sistema. Mientras las zonas altas sufren los estragos de las pérdidas de energía, las zonas bajas operan con presiones excesivas de hasta 97.9 metros de columna de agua en el Sector 2.1 y 86.4 metros de columna de agua en el Sector 2.2, violando las normas de seguridad estructural y confort.

Finalmente, la red actual carece de elementos de regulación activa para gestionar estos excedentes de energía. Los resultados obtenidos validan la urgencia de aplicar un reforzamiento estratégico enfocado en el redimensionamiento de las arterias críticas y la estabilización del sistema mediante válvulas reductoras de presión, propuesta que será desarrollada de forma detallada en el siguiente capítulo de esta investigación.

3. CAPÍTULO III: PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN Y REFUERZOS PARA MEJORAR EL ABASTECIMIENTO DE LA RED

3.1 Identificación de tramos con deficiencias hidráulicas

El diagnóstico hidráulico desarrollado en el Capítulo II evidenció que la red de abastecimiento del sector Mutualista presenta deficiencias operativas significativas en los escenarios de análisis, tanto en el Sector 2.1 como en el Sector 2.2. A partir de los resultados obtenidos mediante la simulación en WaterGEMS, se identificaron de manera sistemática los parámetros hidráulicos que incumplen los límites establecidos por la Norma CO 10.07-601 del MIDUVI (2015) y que fundamentan las propuestas de reforzamiento desarrolladas en el presente capítulo.

La identificación precisa de los tramos críticos constituye el punto de partida de todo proceso de rehabilitación de redes de distribución. Según Saldarriaga (2016), el diagnóstico hidráulico debe traducirse en una jerarquización de intervenciones basada en tres criterios fundamentales: la magnitud del incumplimiento normativo, el caudal transportado por el tramo afectado y la repercusión del tramo sobre la integridad del servicio aguas abajo. La aplicación conjunta de estos criterios permite concentrar los recursos de inversión en las intervenciones de mayor impacto operativo, evitando el sobredimensionamiento indiscriminado de la infraestructura.

Los principales problemas detectados en el diagnóstico del escenario proyectado al año 2050 fueron los siguientes: pérdidas de carga superiores al criterio de diseño adoptado de 10 m/km en tramos de la red de distribución del Sector 2.1, y sobrepresiones generalizadas en nodos de consumo de ambos sectores, con presiones dinámicas que superan el límite normativo de 50 m.c.a. (MIDUVI, 2015). Estas deficiencias se concentran en los tramos de menor diámetro y en las zonas de menor cota altimétrica, donde la capacidad de conducción resulta insuficiente para transportar el caudal proyectado y donde la energía potencial disponible excede los niveles operativos seguros.

En el Sector 2.1, la evaluación del escenario 2050 identificó una longitud total de 5,13 km de tuberías con gradientes hidráulicos superiores a 10 m/km, 11 nodos en déficit de presión por debajo del umbral de 20 m.c.a. y 215 nodos con sobrepresión superior a 50 m.c.a. En el Sector 2.2, si bien las pérdidas de carga en la red de distribución se mantienen dentro de rangos admisibles (únicamente 0,17 km superan el criterio), se registran 130 nodos con presiones superiores a 50 m.c.a., alcanzando un valor máximo de 86,1 m.c.a. Esta dualidad de problemáticas, consistente con lo reportado por Bermeo y Estrada (2025) en su análisis de la red del sector Cruz Verde 4B2 Norte de la ciudad de Cuenca, demuestra que las redes consolidadas requieren estrategias de intervención diferenciadas según el tipo de deficiencia predominante en cada sector.

Con base en este diagnóstico, se determinó que la estrategia de intervención más apropiada para el Sector 2.1 consiste en el incremento selectivo de diámetros en los tramos críticos, complementada con la instalación de PRV para controlar las sobrepresiones resultantes. Para el Sector 2.2, dado que el problema dominante es de naturaleza piezométrica y no de capacidad de conducción, la intervención se centra en el control de presiones mediante PRV, con modificaciones mínimas de diámetro en los tramos que lo requieren por continuidad hidráulica, como se muestra en la tabla 3-1.

Tabla 3-1: Tuberías del Sector 2.1 con pérdidas de carga superiores a 10 m/km, escenario 2050 sin optimizar

Identificador	Ø actual (mm)	Long. (m)	Q (L/s)	v (m/s)	hf (m/km)
2.1_T_1282	63	69.23	13.0	4.23	231.36
2.1_T_1102	63	22.82	9.0	2.89	114.36
2.1_T_1256	63	66.68	9.0	2.74	103.87
2.1_T_1387	63	132.68	8.0	2.60	94.19
2.1_T_1394	63	163.21	7.0	2.32	76.03
2.1_T_1400	63	186.89	7.0	2.11	64.07
2.1_T_1381	63	125.77	6.0	1.92	53.61
2.1_T_1144	63	34.93	6.0	1.89	52.24
2.1_T_1418	63	357.97	5.0	1.62	38.99
2.1_T_1409	110	214.87	22.0	2.28	38.56
2.1_T_1224	63	54.81	5.0	1.57	37.14
2.1_T_1357	110	105.41	21.0	2.23	36.79
2.1_T_1374	63	123.51	5.0	1.50	34.13
2.1_T_1273	63	68.09	5.0	1.49	33.33
2.1_T_1159	110	38.67	19.0	2.02	30.76
2.1_T_1041	110	6.52	19.0	1.99	29.95
2.1_T_1074	110	12.38	16.0	1.71	22.63
2.1_T_1018	110	3.10	16.0	1.66	21.29
2.1_T_1424	63	466.67	4.0	1.14	20.46
2.1_T_1104	110	24.75	15.0	1.62	20.45
2.1_T_1033	110	5.06	15.0	1.61	20.29
2.1_T_1305	63	77.98	3.0	1.11	19.54
2.1_T_1318	63	87.56	3.0	1.09	18.87
2.1_T_1098	63	22.36	3.0	1.07	18.32
2.1_T_1207	63	50.24	3.0	1.07	18.18
2.1_T_1396	110	203.38	14.0	1.51	17.90
2.1_T_1121	110	30.11	14.0	1.47	17.17
2.1_T_1408	110	229.82	14.0	1.47	17.13
2.1_T_1244	110	60.07	14.0	1.47	17.04
2.1_T_1038	110	6.09	14.0	1.46	16.86
2.1_T_1355	63	101.80	3.0	1.01	16.23
2.1_T_1091	63	20.91	3.0	0.94	14.28
2.1_T_1320	63	85.63	3.0	0.94	14.17
2.1_T_1382	110	127.24	12.0	1.26	12.86
2.1_T_1231	63	56.18	3.0	0.88	12.66
2.1_T_1350	50	96.69	1.0	0.76	12.53
2.1_T_1058	110	8.73	11.0	1.21	11.83
2.1_T_1054	110	8.24	11.0	1.21	11.81
2.1_T_1315	110	81.15	11.0	1.18	11.38
TOTAL		3638.20	—	—	—

Fuente: Elaboración propia

3.2 Criterios técnicos para la optimización del modelo hidráulico

El proceso de optimización del modelo hidráulico se fundamentó en el cumplimiento estricto de los parámetros establecidos por la Norma CO 10.07-601 del MIDUVI (2015), complementados con criterios de diseño conservadores orientados a

garantizar el desempeño de la red durante la totalidad del horizonte de diseño. A continuación, se detallan los criterios técnicos adoptados durante el proceso iterativo de rediseño.

3.2.1 Criterio de pérdidas de carga unitarias

La Norma CO 10.07-601 establece un límite máximo admisible de 12 m/km para la pérdida de carga unitaria en redes de distribución urbanas (MIDUVI, 2015). No obstante, en el presente trabajo se adoptó un criterio de diseño más restrictivo de 10 m/km, fundamentado en las siguientes consideraciones técnicas:

En primer lugar, el criterio más restrictivo introduce un margen de seguridad operativa ante imprevistos como demandas pico no contempladas en la proyección, conexiones no registradas en el catastro oficial o variaciones estacionales en el consumo. Según Mays (2000), los sistemas de distribución reales operan con niveles de incertidumbre asociados a la demanda y a las propiedades hidráulicas de las tuberías que deben ser absorbidos mediante márgenes de diseño explícitos.

En segundo lugar, la rugosidad de las tuberías de PVC incrementa progresivamente durante su vida útil debido a la formación de biopelículas y depósitos minerales en la pared interna del conducto (Saldarriaga, 2016; Sotelo-Pichardo et al., 2019). Aplicar un criterio de diseño de 10 m/km permite que, aun cuando el coeficiente de rugosidad se degrade con el tiempo, el gradiente hidráulico real de la red se mantenga dentro del límite normativo de 12 m/km a lo largo de todo el periodo de diseño.

En tercer lugar, el horizonte de proyección a 25 años introduce incertidumbres inherentes al modelo de crecimiento poblacional. Un criterio conservador en pérdidas permite absorber desviaciones moderadas entre la proyección demográfica y la demanda real sin comprometer el cumplimiento normativo, alineándose con las recomendaciones de Salas et al. (2023) sobre el diseño robusto de redes de distribución sujetas a incertidumbre en la demanda.

3.2.2 Criterio de velocidades de flujo

La Norma CO 10.07-601 establece un rango admisible de velocidad comprendido entre 0,30 m/s y 2,00 m/s (MIDUVI, 2015). Este rango fue verificado en cada tramo intervenido para garantizar, por un lado, que el aumento de diámetro no generara velocidades excesivamente bajas que favorezcan la sedimentación de partículas y el deterioro de la calidad del agua en los ramales terminales (Mays, 2000) y, por otro, que la red mantuviera velocidades compatibles con la integridad mecánica del material, evitando fenómenos de erosión en las paredes internas.

3.2.3 Criterio de presiones dinámicas

La Norma CO 10.07-601 fija una presión mínima de 20 m.c.a. y una presión máxima de 50 m.c.a. en condiciones de Caudal Máximo Horario (MIDUVI, 2015). El cumplimiento simultáneo de ambos límites en una red con variación altimétrica significativa como la del sector Mutualista, que alcanza 30 m de diferencia entre los puntos más alto y más bajo, requirió la implementación de dispositivos de regulación activa. La instalación de válvulas reductoras de presión (en adelante PRV, por sus siglas en inglés Pressure Reducing Valve) en puntos estratégicos constituye la estrategia técnica reconocida internacionalmente para la gestión de presiones en redes con perfiles topográficos acentuados (Alcocer-Yamanaka et al., 2016; Mays, 2000).

3.2.4 Asignación del coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams

El modelo de diagnóstico base, correspondiente a los escenarios 2025 y 2050 sin intervención, fue ejecutado con un coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams $C = 150$, valor consistente con la calibración del modelo histórico facilitado por ETAPA EP y correspondiente a tubería de PVC en condición nueva (Saldarriaga, 2016). Para el dimensionamiento de la propuesta final de reforzamiento se adoptó un valor más

conservador de $C = 140$, que refleja la condición de operación del PVC durante su vida útil efectiva (Williams & Hazen, 1933, citados en Sotelo-Pichardo et al., 2019).

Esta diferenciación responde a un criterio técnico de diseño robusto: el diagnóstico se desarrolla con condiciones favorables para evitar sobreestimar las deficiencias existentes del sistema, mientras que la solución se dimensiona con condiciones desfavorables para garantizar que la red mantenga su desempeño hidráulico conforme el material envejezca a lo largo del horizonte de diseño. El coeficiente $C = 140$ aplicado en la propuesta final constituye por tanto un factor implícito de seguridad hidráulica, alineado con las recomendaciones de la literatura técnica sobre la variabilidad temporal del coeficiente de rugosidad en tuberías plásticas (Pavco Wavin, 2020; Saldarriaga, 2016).

3.2.5 Metodología iterativa de rediseño

La metodología aplicada para la optimización consistió en un proceso iterativo de ajuste manual de diámetros e instalación progresiva de PRV en WaterGEMS, validando el comportamiento hidráulico de la red tras cada modificación mediante simulación estática bajo condiciones de Caudal Máximo Horario. Este procedimiento secuencial, coincidente con el aplicado por Bermeo y Estrada (2025) en el sector Cruz Verde 4B2 Norte, contempló las siguientes etapas: (a) identificación de tramos con pérdidas de carga superiores al criterio de diseño; (b) incremento selectivo de diámetros priorizando los tramos con mayor caudal y mayor longitud crítica; (c) re-evaluación del comportamiento piezométrico tras la optimización de diámetros; (d) localización y dimensionamiento de PRV para controlar las sobrepresiones inducidas por la mejora de la capacidad de conducción; (e) verificación final del cumplimiento simultáneo de los tres criterios normativos (pérdidas de carga, velocidades y presiones).

3.3 Optimización de diámetros, Sector 2.1

El Sector 2.1 concentra la mayor cantidad de tramos con deficiencias hidráulicas, razón por la cual la intervención en esta zona fue la más extensa. El proceso de redimensionamiento se aplicó de manera selectiva sobre los tramos que presentaban pérdidas de carga superiores a 10 m/km en el modelo proyectado al año 2050, priorizando las arterias que transportan los mayores caudales por su impacto determinante en la distribución general del sistema.

La selección de los tramos a intervenir se fundamentó en la aplicación conjunta de tres criterios de priorización. El primer criterio, de carácter normativo, correspondió al incumplimiento del gradiente hidráulico de diseño. El segundo criterio, de carácter hidráulico, consideró el caudal transportado por cada tramo, asumiendo que los tramos con mayor caudal tienen mayor incidencia sobre la carga piezométrica de los nodos aguas abajo (Saldarriaga, 2016). El tercer criterio, de carácter operativo, consideró la posición del tramo dentro de la red, priorizando los elementos que funcionan como arterias principales frente a los ramales secundarios de servicio.

Como resultado del proceso iterativo, se intervinieron 39 tramos de tubería mediante el incremento de su diámetro nominal. Los cambios ejecutados comprendieron cinco tipos de sustitución, abarcando desde tuberías secundarias de pequeño diámetro hasta arterias de distribución de diámetro medio. La longitud total de red redimensionada en este sector asciende a 3638,20 metros, distribuidos de la siguiente manera: un tramo de 50 mm a 63 mm (96,69 m), tres tramos de 63 mm a 100 mm (739,19 m), diecisiete tramos de 63 mm a 110 mm (1567,50 m), un tramo de 63 mm a 160 mm (69,23 m) y diecisiete tramos de 110 mm a 160 mm (1.165,59 m). En todos los casos se mantuvo el material PVC, coherente con la política de estandarización de materiales de ETAPA EP (2024) y con las especificaciones técnicas establecidas en las normas NTE INEN 1373 e INEN 1744 (Servicio Ecuatoriano de Normalización [INEN], 2016).

Antes de presentar el detalle hidráulico de cada tramo modificado, se resume en las siguientes tablas, 3-2, 3-3 y 3-4. La ubicación física de las 39 tuberías intervenidas en el proyecto, indicando el diámetro original y el diámetro optimizado adoptado en la propuesta. Esta tabla permite visualizar de manera espacial la concentración de los cambios en los corredores principales del sector y facilita la trazabilidad entre el modelo hidráulico y el catastro real de la red.

Tabla 3-2: Ubicaciones de tramos con diámetros optimizados, Sector 2.1

ID	Identificación del tramo	Diámetro 2050 (mm)	Diámetro Optimizado (mm)
184	Av. Yaupi y C. Francisco Tamariz	110	160
224	Av. Yaupi y Av. Abelardo J. Andrade	110	160
236	Calle La Floresta y Camino A Lazareto	110	160
243	Av. Abelardo J. Andrade, entre Av. Del Chofer y Aristóteles	110	160
277	Calle La Floresta, entre Camino A Lazareto y Patricio Muñoz Vega	110	160
286	Calle La Floresta y Camino A Lazareto (continuación)	110	160
327	Camino A Lazareto y Av. Yaupi	110	160
369	Calle Del Pasacalle y Combate de la Florida	63	110
386	Calle Del Pasacalle y C. Vencedor	63	110
392	Av. Abelardo J. Andrade y C. Francisco Tamariz	63	110
396	Camino A Lazareto y Patricio Muñoz Vega	110	160
435	Av. Yaupi, entre C. Francisco Tamariz y Benjamín Franklin	110	160
484	Calle Antonio Neumane, entre Martin Garate y Rosalina Quintero	63	110
514	Av. Yaupi, entre Félix Roggia y C. Francisco Tamariz	110	160
608	Calle De la Bandolina, entre Del Acordeón y De La Sinfónica	63	110
641	Calle Del Pasacalle, entre Aurelio Alvarado y C. Vencedor	63	110
654	Calle Del Pasacalle, entre Ayancay y Cumaná	63	110
675	Av. Yaupi y Catambuco	110	160
697	Calle Del Pasacalle y Av. Turuhuayco	63	110
723	Calle Del Acordeón, entre De La Bandolina y Del Concierto	63	110
738	Av. Miraflores, entre La Floresta y Del Acordeón	63	160
782	Calle Del Sanjuanito, entre Juan Strobel y Rosalina Quintero	63	110
798	Calle La Floresta y Patricio Muñoz Vega	110	160
801	Av. Yaupi, entre Benjamín Franklin y C. Francisco Tamariz	63	110
803	Calle Humboldt y Einstein	63	100
848	C. Francisco Tamariz, entre Yaupi y Ayancay	50	63
854	Calle Ayancay, entre Catambuco y Del Pasacalle	63	110
856	Av. Yaupi, entre C. Alberto María Torres y Félix Roggia	110	160
878	Av. Miraflores y Del Acordeón	63	110
886	Calle Del Pasacalle, entre Av. Turuhuayco y Aurelio Alvarado	63	110
887	Av. Yaupi, entre Catambuco y Del Pasacalle	110	160
892	Calle Del Acordeón, entre Av. Miraflores y De La Bandolina	63	110
902	Calle Del Concierto y Antonio Neumane, hasta Martin Gárate	63	110
905	Camino A Lazareto y Patricio Muñoz Vega (continuación)	110	160
910	Calle Cumaná, entre Del Pasacalle y C. Graham Bell	63	100
919	Camino A Lazareto y La Floresta	110	160
920	Av. Yaupi, entre Camino A Lazareto y C. Alberto María Torres	110	160
931	Calle Rosalina Quintero, entre Antonio Neumane y Del Sanjuanito	63	110
937	Av. de las Américas, entre Av. Del Chofer y Universidad Católica	63	100

Fuente: Elaboración propia, a partir del Modelo Hidráulico 2050 y Propuesta de Optimización.

Tabla 3-3: Tramos de tubería modificados en el Sector 2.1, diámetros originales y propuestos

Identificador	Ø orig. (mm)	Ø prop. (mm)	Long. (m)	Q (L/s)	v (m/s)	hf (m/km)	Material
2.1_T_1350	50	63	96.69	2.0	0.66	7.32	PVC
2.1_T_1320	63	100	85.63	4.0	0.50	2.63	PVC
2.1_T_1400	63	100	186.89	7.0	0.84	6.78	PVC
2.1_T_1424	63	100	466.67	3.0	0.38	1.53	PVC
2.1_T_1091	63	110	20.91	4.0	0.37	1.35	PVC
2.1_T_1098	63	110	22.36	4.0	0.42	1.65	PVC
2.1_T_1102	63	110	22.82	9.0	0.95	7.59	PVC
2.1_T_1144	63	110	34.93	6.0	0.62	3.46	PVC
2.1_T_1207	63	110	50.24	4.0	0.39	1.46	PVC
2.1_T_1224	63	110	54.81	5.0	0.52	2.46	PVC
2.1_T_1231	63	110	56.18	5.0	0.49	2.27	PVC
2.1_T_1256	63	110	66.68	9.0	0.90	6.88	PVC
2.1_T_1273	63	110	68.09	7.0	0.72	4.55	PVC
2.1_T_1305	63	110	77.98	3.0	0.37	1.29	PVC
2.1_T_1318	63	110	87.56	3.0	0.36	1.25	PVC
2.1_T_1355	63	110	101.80	4.0	0.42	1.71	PVC
2.1_T_1374	63	110	123.51	2.0	0.22	0.51	PVC
2.1_T_1381	63	110	125.77	6.0	0.63	3.55	PVC
2.1_T_1387	63	110	132.68	11.0	1.13	10.41	PVC
2.1_T_1394	63	110	163.21	7.0	0.76	5.03	PVC
2.1_T_1418	63	110	357.97	5.0	0.53	2.58	PVC
2.1_T_1282	63	160	69.23	13.0	0.66	2.47	PVC
2.1_T_1018	110	160	3.10	19.0	0.94	4.79	PVC
2.1_T_1033	110	160	5.06	15.0	0.75	3.18	PVC
2.1_T_1038	110	160	6.09	11.0	0.56	1.86	PVC
2.1_T_1041	110	160	6.52	18.0	0.92	4.66	PVC
2.1_T_1054	110	160	8.24	9.0	0.44	1.19	PVC
2.1_T_1058	110	160	8.73	9.0	0.44	1.19	PVC
2.1_T_1074	110	160	12.38	14.0	0.68	2.67	PVC
2.1_T_1104	110	160	24.75	13.0	0.64	2.37	PVC
2.1_T_1121	110	160	30.11	17.0	0.82	3.79	PVC
2.1_T_1159	110	160	38.67	22.0	1.11	6.55	PVC
2.1_T_1244	110	160	60.07	17.0	0.82	3.75	PVC
2.1_T_1315	110	160	81.15	9.0	0.43	1.14	PVC
2.1_T_1357	110	160	105.41	24.0	1.21	7.65	PVC
2.1_T_1382	110	160	127.24	14.0	0.68	2.62	PVC
2.1_T_1396	110	160	203.38	12.0	0.59	2.01	PVC
2.1_T_1408	110	160	229.82	11.0	0.57	1.91	PVC
2.1_T_1409	110	160	214.87	25.0	1.23	7.97	PVC
TOTAL			3638.20	—	—	—	PVC

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-4: Resumen de tuberías a reemplazar por diámetro y longitud, Sector 2.1

Ø original (mm)	Ø propuesto (mm)	Nº de tramos	Longitud total (m)	Material
50	63	1	96.69	PVC
63	100	3	739.19	PVC
63	110	17	1567.50	PVC
63	160	1	69.23	PVC
110	160	17	1165.59	PVC
TOTAL		39	3638.20	PVC

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de la optimización de diámetros, los tramos intervenidos registran pérdidas de carga dentro del rango normativo, con velocidades de flujo comprendidas entre 0,30 y 2,00 m/s en la totalidad de los tramos modificados. Las siguientes ilustraciones presentan el mapa de diámetros de la red optimizada y la distribución de pérdidas de carga resultante, en contraste con el estado previo a la intervención.

Ilustración 3-1: Distribución de diámetros de la red optimizada, Sector 2.1



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-2: Pérdidas de gradiente hidráulico del modelo optimizado, Sector 2.1



Fuente: Elaboración propia

3.4 Optimización de diámetros, Sector 2.2

En el Sector 2.2, el diagnóstico hidráulico evidenció que las pérdidas de carga en la red de distribución se mantienen dentro de rangos aceptables, con una longitud de únicamente 0,17 km con gradientes superiores a 10 m/km en el escenario 2050. En consecuencia, la intervención sobre diámetros en este sector fue mínima, limitándose a dos tramos que requerían ajuste dimensional para garantizar la continuidad hidráulica tras la introducción de las PRV.

Los tramos modificados corresponden a: un tramo de 63 mm a 100 mm con una longitud de 86,64 m y un tramo de 63 mm a 110 mm con una longitud de 72,81 m. La longitud total de tubería redimensionada en este sector asciende a 159,45 m. Al igual que en el Sector 2.1, se conservó el material PVC en todos los tramos intervenidos, en coherencia con los criterios de estandarización y compatibilidad con la infraestructura existente (ETAPA EP, 2024).

Esta intervención minimalista responde al principio de proporcionalidad técnica: intervenir únicamente donde existe justificación cuantitativa del problema, evitando modificaciones innecesarias que podrían inducir alteraciones imprevistas en el comportamiento piezométrico de la red (Mora-Rodríguez et al., 2017). El enfoque diferenciado entre ambos sectores demuestra que la estrategia de reforzamiento no responde a un criterio homogéneo de sobredimensionamiento, sino a un diagnóstico específico del comportamiento hidráulico de cada subsector.

Tabla 3-5: Ubicaciones de tramos con diámetros optimizados, Sector 2.2

ID	Identificación del tramo	Diámetro 2050 (mm)	Diámetro Optimizado (mm)
404	Av. de los Cerezos, entre Gladiolos y De la Magnolia	63	110
415	Av. de los Cerezos, entre De la Magnolia y Los Girasoles	63	100

Fuente: Elaboración propia, a partir del Modelo Hidráulico 2050 y Propuesta de Optimización.

Tabla 3-6: Tramos de tubería modificados en el Sector 2.2, diámetros originales y propuestos

Identificador	Ø orig. (mm)	Ø prop. (mm)	Long. (m)	Q (L/s)	v (m/s)	hf (m/km)	Material
2.2_T_1152	63	110	72.81	10.0	1.00	8.43	PVC
2.2_T_1160	63	100	86.64	8.0	1.08	10.78	PVC
TOTAL			159.45	—	—	—	PVC

Fuente: Elaboración propia

3.5 Control de presiones mediante válvulas reductoras de presión (PRV), Sector

2.1

Una vez completado el redimensionamiento de tuberías en el Sector 2.1, se verificó que la red presentaba sobrepresiones generalizadas en los nodos de menor cota altimétrica, con valores que excedían el límite normativo de 50 m.c.a. Este fenómeno es inherente al proceso de optimización de diámetros: al incrementar la sección transversal de los conductos, las pérdidas por fricción disminuyen y, como consecuencia directa, la carga piezométrica residual aumenta en los nodos aguas abajo (Saldarriaga, 2016). Un comportamiento idéntico fue reportado por Bermeo y Estrada (2025) tras optimizar los diámetros en el sector Cruz Verde 4B2 Norte, lo que confirma el carácter sistemático de este efecto colateral en procesos de rehabilitación hidráulica.

3.5.1 Metodología de selección de puntos de instalación

La localización de las PRV se fundamentó en una metodología sistemática basada en el análisis de la distribución piezométrica del modelo. Los criterios aplicados fueron los siguientes:

En primer lugar, se identificaron las zonas de presión homogénea, agrupando los nodos con cotas piezométricas similares en áreas de regulación coherentes. Esta agrupación es equivalente a la definición operativa de un distrito hidrométrico modulado, concepto desarrollado por Alcocer-Yamanaka et al. (2016) como estrategia para la gestión eficiente de presiones en redes urbanas consolidadas.

En segundo lugar, cada PRV se localizó en el tramo de matriz que concentra el caudal de ingreso a la zona con sobrepresión, garantizando que la totalidad del flujo destinado a los nodos problemáticos atravesara la válvula. Este criterio, denominado “criterio de entrada única al distrito hidrométrico”, es reconocido como buena práctica por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2020) y constituye la base para el control efectivo del balance hídrico sectorial.

En tercer lugar, se verificó la compatibilidad del diámetro de la matriz en el punto de instalación con los diámetros comerciales estándar de PRV, adoptándose un diámetro nominal uniforme de 152,4 mm (6 pulgadas) para la totalidad de las válvulas, conforme a las dimensiones disponibles en el mercado para válvulas de control hidráulico de acción directa (BERMAD, 2024).

En cuarto lugar, las presiones de consigna se definieron de manera escalonada en función de la cota altimétrica de cada punto de instalación y de la topografía del área abastecida aguas abajo, garantizando que el nodo más desfavorable de cada sub-zona mantuviera una presión dinámica mínima de 20 m.c.a. en condición de Caudal Máximo Horario.

3.5.2 Configuración de las PRV en el Sector 2.1

La propuesta contempla la instalación de nueve PRV activas en el Sector 2.1, con presiones de consigna que varían entre 20 y 35 m.c.a., ajustadas según la cota altimétrica del sector abastecido por cada válvula. Adicionalmente, se contempla la configuración de una PRV en estado cerrado que actúa como elemento de seccionamiento hidráulico, independizando flujos entre zonas de regulación contiguas. Esta función de seccionamiento cumple el mismo rol operativo que los cortes de flujo mediante tapones o válvulas de cierre utilizados en estudios previos (Bermeo & Estrada, 2025; Alcocer-Yamanaka et al., 2016), con la ventaja operativa de que una válvula configurada como

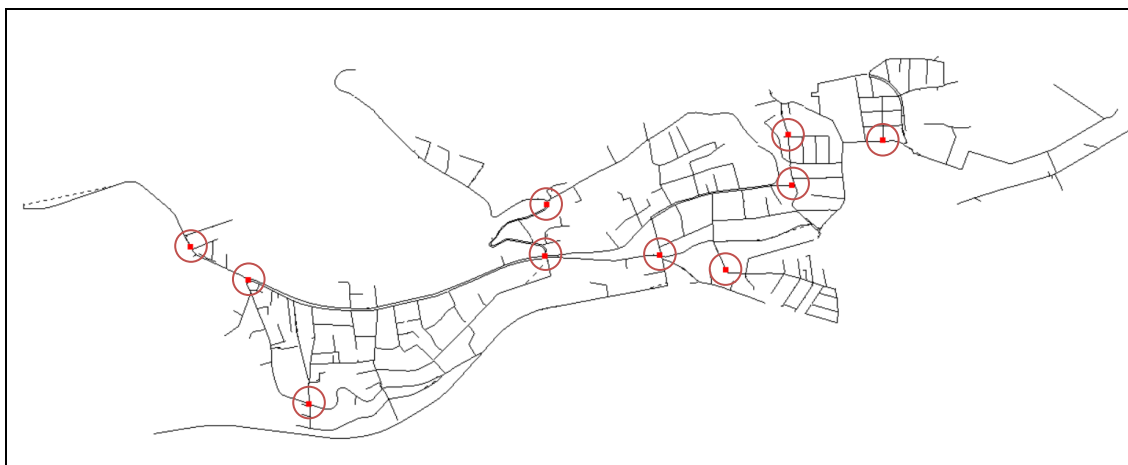
cerrada puede ser reactivada en el futuro para modificar la configuración del sistema sin necesidad de intervenciones constructivas adicionales.

Tabla 3-7: Válvulas reductoras de presión (PRV) instaladas en el Sector 2.1, parámetros hidráulicos

Etiqueta	Elev. (m.s.n.m.)	Ø (mm)	Consigna (m.c.a.)	Q (L/s)	LP entrada (m)	LP salida (m)	ΔH (m)
VRP-1	2663.98	152.4	20	74	2687.77	2684.03	3.74
PRV-1	2647.32	152.4	21	21	2683.28	2668.37	14.91
PRV-2	2633.21	152.4	30	52	2679.95	2663.28	16.67
PRV-3	2613.24	152.4	35	8	2664.42	2648.32	16.09
PRV-4	2612.83	152.4	30	13	2662.10	2642.90	19.20
PRV-6	2593.25	152.4	25	9	2641.61	2618.31	23.30
PRV-7	2605.08	152.4	20	20	2659.27	2625.12	34.15
PRV-8	2574.92	152.4	20	5	2622.66	2594.97	27.69
PRV-9	2597.63	152.4	30	4	2663.13	2627.70	35.43
VRP-2	2599.73	152.4	—	0	—	—	—

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-3: Ubicación de las PRV en el modelo hidráulico, Sector2.1



Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Verificación del régimen operativo de las PRV críticas

La magnitud del salto de presión disipado por una PRV determina su régimen de operación hidráulica y su susceptibilidad al fenómeno de cavitación, el cual compromete la integridad mecánica de la válvula mediante vibración, erosión y ruido estructural (Hutech, 2021; Ingeniería de Fluidos, 2020). De acuerdo con la práctica internacional, el

ratio de reducción $R = P_1/P_2$, donde P_1 representa la presión aguas arriba y P_2 la presión aguas abajo de la válvula, no debe exceder el valor de 3 para evitar el régimen cavitante (BERMAD, 2024; Hutech, 2021).

Se efectuó la verificación de este criterio para las PRV con mayor salto de presión del Sector 2.1, correspondientes a la PRV-7 y la PRV-9, que operan con diferenciales de 34,15 m y 35,43 m respectivamente. Los resultados se resumen en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8: Verificación del régimen operativo de las PRV críticas, Sector 2.1

PRV	P ₁ (m.c.a.)	P ₂ (m.c.a.)	ΔH (m)	R = P ₁ /P ₂	σ	Diagnóstico
PRV-4	49,27	30,07	19,20	1,64	1,553	Sin riesgo de cavitación
PRV-6	48,36	25,06	23,30	1,93	1,065	Sin riesgo de cavitación
PRV-7	54,19	20,04	34,15	2,70	0,580	Sin riesgo de cavitación
PRV-8	47,74	20,05	27,69	2,38	0,715	Sin riesgo de cavitación
PRV-9	65,50	30,07	35,43	2,18	0,842	Sin riesgo de cavitación

Fuente: Elaboración propia

La totalidad de las PRV instaladas opera con ratios de reducción inferiores al umbral crítico de 3, con valores comprendidos entre 1,64 y 2,70. De manera complementaria, el coeficiente de cavitación σ se mantiene en todos los casos por encima del umbral de seguridad de 0,3, con un valor mínimo de 0,580 correspondiente a la PRV-7. Estos resultados verifican que las PRV propuestas operan en régimen hidráulicamente estable, sin riesgo de daño mecánico por cavitación ni problemas de vibración o ruido estructural, garantizando la vida útil proyectada de los dispositivos de regulación.

3.6 Control de presiones mediante válvulas reductoras de presión (PRV), Sector

2.2

El Sector 2.2 presenta un perfil hidráulico dominado por sobrepresiones, con 130 nodos que registran presiones dinámicas superiores a 50 m.c.a. en el escenario 2050. Este

comportamiento es atribuible a la diferencia altimétrica existente entre el punto de alimentación desde el tanque Cebollar N.º 2 y las zonas de menor cota dentro del sector, que alcanza hasta 86,1 m.c.a. en los nodos más bajos. La estabilización piezométrica en este contexto topográfico solo puede lograrse mediante la regulación activa de la presión, estrategia ampliamente documentada en redes consolidadas con variación altimétrica significativa (Alcocer-Yamanaka et al., 2016; Mora-Rodríguez et al., 2017).

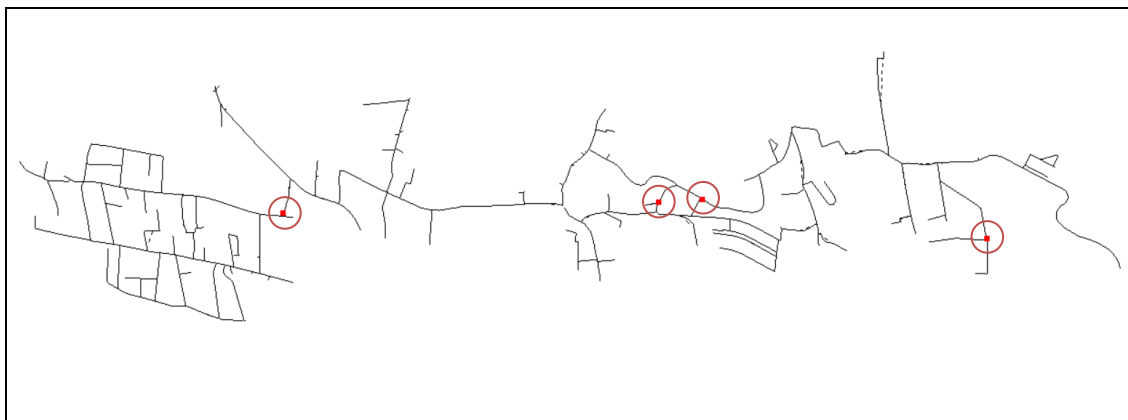
Para controlar estas presiones excesivas, se propone la instalación de cuatro PRV en puntos estratégicos del Sector 2.2, aplicando la misma metodología de selección descrita en la Sección 3.5.1. Las válvulas tienen el mismo diámetro nominal de 152,4 mm (6 pulgadas) que las del Sector 2.1, con presiones de consigna que varían entre 20 y 40 m.c.a., configuradas de acuerdo con la topografía local de cada zona de intervención. El rango más amplio de consignas respecto al Sector 2.1 responde a la mayor diferencia altimétrica presente en el Sector 2.2, donde las zonas bajas requieren una reducción de presión más pronunciada para alcanzar los valores normativos. Los diferenciales de presión de estas cuatro PRV oscilan entre 14,09 m y 26,85 m, valores que se encuentran dentro del régimen operativo seguro verificado en la Sección 3.5.3.

Tabla 3-9: Válvulas reductoras de presión (PRV) instaladas en el Sector 2.2, parámetros hidráulicos

Etiqueta	Elev. (m.s.n.m.)	Ø (mm)	Consigna (m.c.a.)	Q (L/s)	LP entrada (m)	LP salida (m)	ΔH (m)
PRV-1	2634.76	152.4	40	22	2688.94	2674.85	14.09
PRV-2	2627.41	152.4	30	6	2674.44	2657.48	16.96
PRV-3	2642.72	152.4	20	0	2689.62	2662.77	26.85
PRV-4	2612.34	152.4	35	8	2671.89	2647.42	24.46

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-4: Ubicación de las PRV en el modelo hidráulico, Sector 2.2



Fuente: Elaboración propia

3.7 Resultados del modelo hidráulico optimizado

3.7.1 Resultados Sector 2.1

Tras la aplicación conjunta del redimensionamiento de diámetros y la instalación de las PRV, el modelo hidráulico del Sector 2.1 presenta una mejora sustancial en los parámetros operativos. Los resultados obtenidos en el escenario proyectado al año 2050 se sintetizan a continuación.

En lo que respecta a las pérdidas de carga, la longitud de tuberías con gradientes superiores a 10 m/km se redujo a un valor residual de 0,27 km, correspondiente a diez tramos de longitud muy reducida, la mayoría inferiores a 40 m, que constituyen conexiones puntuales dentro del modelo. Esta longitud residual representa una reducción del 94,7 % respecto a los 5,13 km identificados en el escenario sin optimizar. Los tramos residuales con gradiente ligeramente superior a 10 m/km no representan un problema operativo significativo, dado que su corta longitud implica una disipación energética mínima en términos absolutos y una caída de presión despreciable a escala de la red (Mays, 2000).

Respecto a las velocidades de flujo, únicamente se identificó un tramo con velocidad superior a 2 m/s, de longitud 2,34 m, correspondiente a una conexión de nodo

de muy corta extensión. La totalidad de los tramos de la red de distribución opera dentro del rango normativo de 0,30 a 2,00 m/s, garantizando condiciones adecuadas de transporte sin riesgo de erosión por velocidades excesivas ni sedimentación por velocidades insuficientes (MIDUVI, 2015).

En cuanto a las presiones dinámicas, el modelo optimizado mantiene la totalidad de los nodos de consumo dentro del rango normativo de 20 a 50 m.c.a. Los nodos que previamente registraban sobrepresiones superiores a 50 m.c.a. operan ahora bajo consignas controladas por las PRV, mientras que los nodos con déficit de presión fueron corregidos mediante el incremento de capacidad de conducción en las arterias principales, restableciendo la carga piezométrica disponible en las zonas de mayor cota altimétrica.

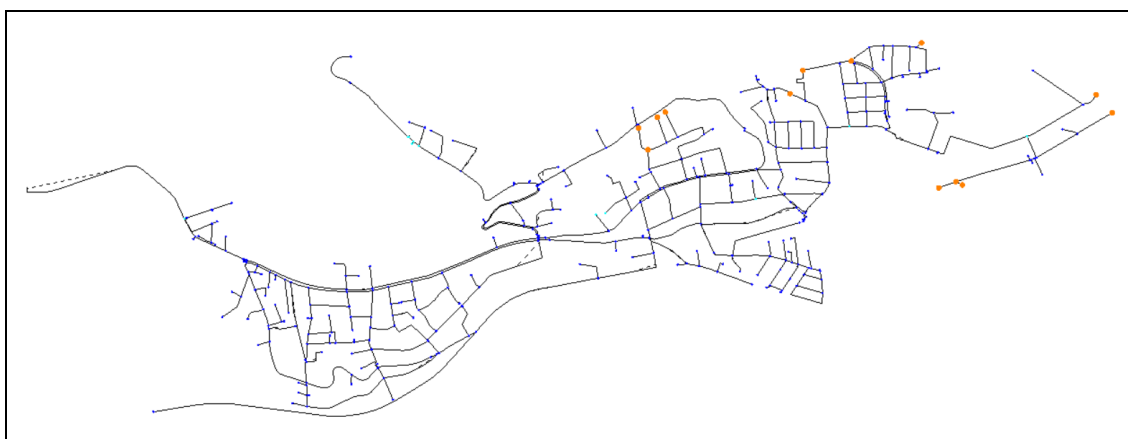
Las ilustraciones siguientes presentan comparativamente el estado de la red antes y después del reforzamiento, en términos de distribución de diámetros, pérdidas de carga y presiones dinámicas.

Ilustración 3-5: Comparación de pérdidas de gradiente antes y después de la optimización, Sector 2.1 (2050)



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-6: Presiones dinámicas del modelo optimizado, Sector 2.1 (2050)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-10: Comparación de resultados operativos antes y después del reforzamiento, Sector 2.1

Parámetro	Escenario 2050 sin optimizar	Modelo optimizado	Variación	% Mejora
Long. de tuberías con $h_f > 10$ m/km (km)	5.13	0.27	-4.86	94.7 %
N.º de nodos con presión < 20 m.c.a.	11	0	-11	100 %
N.º de nodos con presión > 50 m.c.a.	215	0	-215	100 %
N.º de tramos con $v > 2.0$ m/s	≥ 5	1 (trayecto 2.34 m)	—	—
Cumplimiento Norma CO 10.07-601	NO	SÍ	—	—

Fuente: Elaboración propia

3.7.2 Resultados Sector 2.2

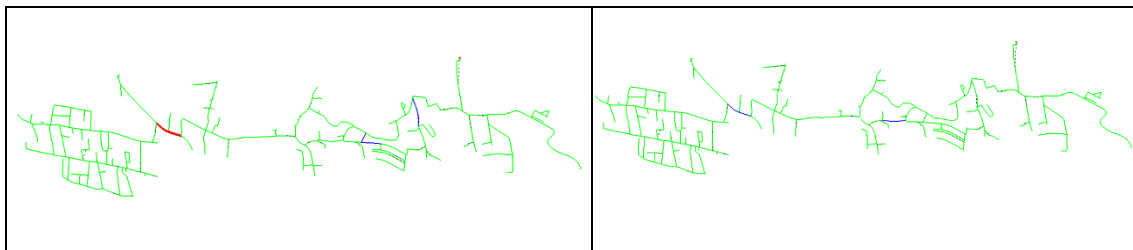
En el Sector 2.2, la implementación de las cuatro PRV, combinada con los dos tramos redimensionados, permite alcanzar condiciones hidráulicas operativas dentro de los parámetros normativos para el horizonte de diseño 2050.

En términos de pérdidas de carga, la red de distribución del Sector 2.2 no presenta ningún tramo con gradientes hidráulicos superiores a 10 m/km en el modelo optimizado, lo que confirma que los problemas de este sector eran fundamentalmente de sobrepresión

y no de capacidad de conducción. El único tramo que registra hf elevado en el informe del modelo corresponde a la tubería de interconexión entre el tanque Cebollar y el punto de entrada al sector (2.2_T_1229), elemento que forma parte de la línea de conducción principal y no de la red de distribución evaluada bajo los criterios de la Norma CO 10.07-601 (MIDUVI, 2015).

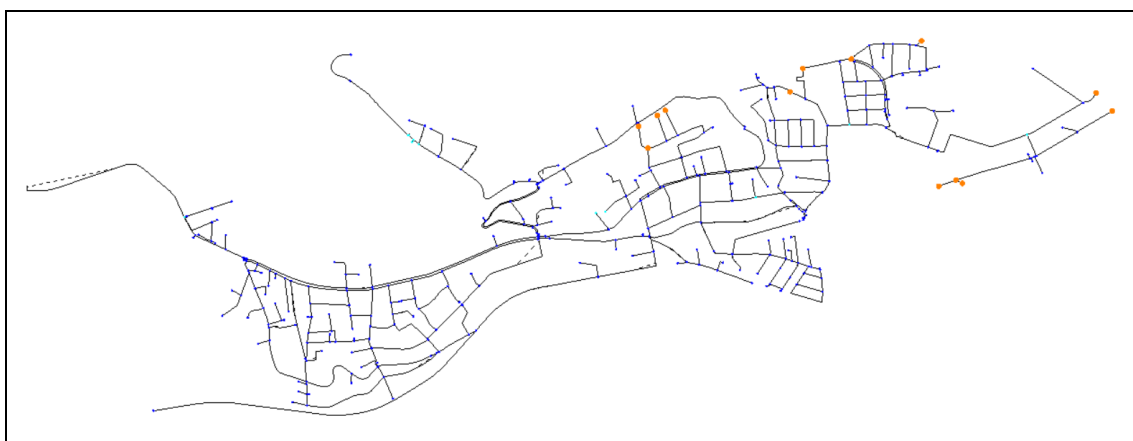
Las velocidades de flujo en la totalidad de la red del Sector 2.2 se mantienen dentro del rango admisible de 0,30 a 2,00 m/s, sin registrarse tramos con valores superiores al máximo normativo en la red de distribución. En cuanto a las presiones dinámicas, el modelo optimizado controla eficazmente las sobrepresiones detectadas en el diagnóstico, manteniendo la mayoría de los nodos dentro del rango normativo de 20 a 50 m.c.a.

Ilustración 3-7: Comparación de pérdidas de gradiente antes y después de la optimización, Sector 2.2 (2050)



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-8: Presiones dinámicas del modelo optimizado, Sector 2.2 (2050)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-11: Comparación de resultados operativos antes y después del reforzamiento, Sector 2.2

Parámetro	Escenario 2050 sin optimizar	Modelo optimizado	Variación	% Mejora
Long. de tuberías con hf > 10 m/km (km)	0.17	0.00	-0.17	100 %
N.º de nodos con presión > 50 m.c.a.	130	0	-130	100 %
Presión máxima registrada (m.c.a.)	86.1	≤ 50	-36.1	—
N.º de nodos con presión < 20 m.c.a.	0	0	0	—
Cumplimiento Norma CO 10.07-601	NO	SÍ	—	—

Fuente: Elaboración propia

3.8 Propuesta técnica de reforzamiento de la red

Una vez validado el modelo hidráulico optimizado, se presenta a continuación la propuesta técnica de reforzamiento que sintetiza las intervenciones necesarias para garantizar el suministro eficiente de agua potable en el sector Mutualista durante el horizonte de diseño planteado al año 2050. La propuesta comprende dos líneas de acción complementarias: la sustitución de tuberías con diámetros insuficientes y la instalación de PRV para el control piezométrico.

3.8.1 Sustitución de tuberías

Se propone la sustitución de 41 tramos de tubería distribuidos entre los dos sectores de estudio. En el Sector 2.1 se intervendrán 39 tramos con una longitud total de 3638,20 m, mientras que en el Sector 2.2 se sustituirán 2 tramos con una longitud de 159,45 m. La longitud total de tubería a reemplazar en el conjunto del proyecto asciende a 3797,65 m, en todos los casos con material PVC conforme a las especificaciones de la

norma NTE INEN 1373 y a las especificaciones técnicas de ETAPA EP (2024; INEN, 2016).

Los diámetros de reemplazo propuestos fueron determinados mediante el proceso iterativo de simulación descrito en las secciones anteriores, garantizando el cumplimiento simultáneo de los criterios de pérdidas de carga, velocidades y presiones establecidos por la Norma CO 10.07-601 (MIDUVI, 2015). Este enfoque de optimización selectiva, frente a alternativas de sustitución generalizada, permite concentrar la inversión en los elementos de mayor impacto hidráulico y evitar el sobredimensionamiento de la red, en coherencia con los principios de eficiencia económica en la rehabilitación de redes urbanas (Mays, 2000; Saldarriaga, 2016).

Tabla 3-12: Resumen general de tuberías a reemplazar — Sectores 2.1 y 2.2 por diámetro y longitud

Sector	Ø original (mm)	Ø propuesto (mm)	N.º tramos	Longitud (m)	Material
2.1	50	63	1	96.69	PVC
2.1	63	100	3	739.19	PVC
2.1	63	110	17	1567.50	PVC
2.1	63	160	1	69.23	PVC
2.1	110	160	17	1165.59	PVC
2.2	63	100	1	86.64	PVC
2.2	63	110	1	72.81	PVC
TOTAL PROYECTO			41	3797.65	PVC

Fuente: Elaboración propia.

3.8.2 Instalación de válvulas reductoras de presión (PRV)

Se propone la instalación de catorce PRV en total: diez en el Sector 2.1 (nueve activas y una configurada como elemento de seccionamiento hidráulico) y cuatro en el Sector 2.2. Todas las válvulas son de diámetro nominal 152,4 mm (6 pulgadas), tipo PRV de acción directa, que regulan automáticamente la presión aguas abajo hacia la consigna configurada, independientemente de las variaciones de caudal y de la presión aguas arriba (BERMAD, 2024).

Las presiones de consigna fueron determinadas en función de la cota altimétrica de cada punto de instalación y de la distribución topográfica del área abastecida por cada válvula. En el Sector 2.1 las consignas varían entre 20 y 35 m.c.a., mientras que en el Sector 2.2 el rango es de 20 a 40 m.c.a. Esta variación responde a la mayor diferencia altimétrica presente en el Sector 2.2, donde las zonas bajas requieren una reducción de presión más pronunciada para alcanzar los valores normativos. La verificación del régimen operativo presentada en la Sección 3.5.3 confirma que ninguna de las PRV propuestas opera en régimen cavitante, garantizando la estabilidad hidráulica y la durabilidad mecánica de los dispositivos de regulación.

Para la implementación adecuada de las PRV, se establecen las siguientes consideraciones constructivas, alineadas con las recomendaciones técnicas aplicables a redes de distribución urbanas (BERMAD, 2024; Mays, 2000):

- **Accesibilidad para mantenimiento:** las PRV deben instalarse en cámaras subterráneas con acceso que permita la verificación periódica de la consigna, la inspección del piloto hidráulico y el reemplazo de componentes internos sin interrupción prolongada del servicio.
- **Protección contra fenómenos transitorios:** debe preverse la instalación de dispositivos de amortiguamiento de transitorios hidráulicos en los tramos aguas abajo de cada PRV, para mitigar el riesgo de golpe de ariete asociado a maniobras de cierre rápido.
- **Verificación de presión mínima aguas abajo:** se debe comprobar que la presión mínima aguas abajo de cada PRV no descienda por debajo de 20 m.c.a. bajo ninguna condición operativa prevista.
- **Instrumentación para monitoreo continuo:** se recomienda la instalación de manómetros en los nodos de referencia, así como la consideración de puntos de medición de caudal, con el fin de integrar progresivamente el sector Mutualista al

esquema de sectorización hidrométrica promovido internacionalmente como estrategia de reducción de pérdidas físicas (Alcocer-Yamanaka et al., 2016; IMTA, 2020).

3.9 Refinamiento posterior de diámetros para el control residual de pérdidas en el Sector 2.1

Una vez instaladas las PRV en los puntos de control definidos en la Sección 3.5, se ejecutó nuevamente la simulación del modelo en el escenario 2050 para verificar el comportamiento integral de la red bajo la propuesta combinada. En esta verificación se observó que, si bien la mayoría de los tramos cumplía con el criterio de diseño adoptado, todavía existían algunos tramos puntuales del Sector 2.1 con pérdidas de carga superiores a 10 m/km. Este comportamiento se explica por el reordenamiento del flujo que se produjo después de instalar las válvulas: al modificarse las presiones aguas abajo de cada PRV, los caudales se redistribuyeron entre la red, y algunos tramos terminaron transportando un caudal mayor al previsto en la primera iteración.

Por esta razón se decidió hacer un refinamiento posterior, enfocado únicamente en los tramos donde el modelo mostró pérdidas excesivas. Cabe aclarar que este ajuste no reemplaza ni modifica las propuestas presentadas anteriormente; lo que se hizo fue una corrección puntual sobre la base ya optimizada, con el fin de afinar el comportamiento hidráulico en el Sector 2.1.

Ilustración 3-9: Red con gradientes críticos tras la instalación de PRVs, Sector 2.1



Fuente: Elaboración propia

3.9.1 Identificación de los tramos críticos remanentes

Después de evaluar nuevamente el modelo con las PRV instaladas, se identificaron diez tramos del Sector 2.1 con gradiente hidráulico mayor a 10 m/km. De este grupo, cinco tramos presentaron valores entre 12 y 14 m/km, situándose por encima del límite normativo de 12 m/km establecido por la Norma CO 10.07-601 del MIDUVI (2015). Los demás tramos quedaron con gradientes entre 10,15 y 11,34 m/km, dentro del límite normativo, aunque por encima del criterio adoptado de 10 m/km. Por practicidad constructiva y por su impacto reducido en la operación, se priorizó la intervención únicamente sobre los cinco tramos que excedían el valor normativo.

Tabla 3-13: Tramos del Sector 2.1 con gradiente hidráulico superior a 10 m/km tras la instalación de las PRV

Identificador	Longitud (m)	Ø actual (mm)	Q (L/s)	v (m/s)	hf (m/km)
2.1_T_1154	37.54	63	3	0.84	13.04
2.1_T_1159	38.67	160	29	1.45	12.19
2.1_T_1225	55.37	100	-9	1.15	13.73
2.1_T_1238	57.67	63	2	0.80	12.03
P-9	24.68	110	11	1.14	12.03

Fuente: Elaboración propia.

El tramo P-9 corresponde a una de las conexiones inmediatamente aguas abajo de una PRV, donde el reordenamiento del flujo es especialmente sensible al diámetro. Los demás tramos se ubican en zonas de transición entre subdistritos de presión, donde el caudal redistribuido encontró diámetros que, aunque adecuados en la primera iteración, resultaron insuficientes una vez activado el control piezométrico.

3.9.2 Criterio técnico para el redimensionamiento de los tramos críticos

El redimensionamiento se efectuó siguiendo la misma lógica aplicada en las Secciones 3.3 y 3.4: se incrementó el diámetro al valor comercial inmediatamente superior, verificando en cada paso que el nuevo gradiente quedara dentro del criterio de 10 m/km y que la velocidad de flujo se mantuviera en el rango admisible de 0,30 a 2,00 m/s establecido por la norma. Se conservó el material PVC en todos los casos por compatibilidad con la red existente y por coherencia con las especificaciones técnicas de ETAPA EP.

El proceso se efectuó tramo por tramo, evaluando en cada iteración cómo el cambio de diámetro afectaba al resto del modelo. En la mayoría de los tramos un solo incremento de diámetro fue suficiente para corregir la pérdida; en el caso del tramo 2.1_T_1159, que se identificó como una arteria principal con caudal elevado, fue necesario subir directamente de 160 mm a 200 mm para alcanzar un gradiente razonable. Estos cambios se incorporaron al modelo final junto con las PRV ya configuradas, ejecutándose una última corrida para verificar el comportamiento integral de la red.

Tabla 3-14: Comparación de diámetros y parámetros hidráulicos antes y después del refinamiento

Identificador	Antes del refinamiento			Después del refinamiento			Δh_f (m/km)
	\varnothing (mm)	v (m/s)	hf (m/km)	\varnothing (mm)	v (m/s)	hf (m/km)	
2.1_T_1154	63	0.84	13.04	100	0.33	1.38	-11.66
2.1_T_1159	160	1.45	12.19	200	0.93	4.11	-8.08
2.1_T_1225	100	1.15	13.73	110	1.02	9.84	-3.90
2.1_T_1238	63	0.80	12.03	100	0.43	2.20	-9.83
P-9	110	1.14	12.03	160	0.57	2.16	-9.87

Fuente: Elaboración propia.

La reducción del gradiente hidráulico fue significativa en los cinco tramos. El caso más representativo es el del tramo P-9, cuyo gradiente bajó de 12,03 a 2,16 m/km al cambiar el diámetro de 110 a 160 mm; la velocidad también se redujo a la mitad (de 1,14 a 0,57 m/s), aliviando el esfuerzo sobre el material y mejorando la calidad operativa del tramo. El tramo 2.1_T_1159, que es la arteria más solicitada del grupo, pasó de un gradiente de 12,19 m/km a 4,11 m/km tras el cambio de 160 a 200 mm, manteniendo una velocidad de 0,93 m/s, plenamente dentro del rango admisible.

3.9.3 Resultados del modelo después del refinamiento

Una vez aplicados los cinco ajustes y ejecutada la simulación final, el comportamiento de la red en el Sector 2.1 se estabilizó en niveles aceptables. La longitud total de tubería con gradiente superior a 12 m/km (límite normativo) se redujo a un valor residual asociado únicamente a tramos cortos de conexión puntual, en su mayoría inferiores a 10 m. La longitud total intervenida en este refinamiento fue de 213.93 m, repartida entre los cinco tramos descritos.

En cuanto al comportamiento de las presiones, el modelo final del Sector 2.1 presenta la totalidad de los nodos por debajo de los 70 m.c.a., con una presión máxima registrada de 69,30 m.c.a. en el nodo 2.1_N_1017, ubicado en una de las zonas de menor cota altimétrica. La distribución de presiones se resume en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15: Distribución de presiones nodales en el Sector 2.1 después del refinamiento (escenario 2050)

Rango de presión (m.c.a.)	N.º de nodos	Porcentaje	Observación
P < 20	10	2.6 %	Nodos en zonas de mayor cota
20 ≤ P ≤ 50	326	85.6 %	Cumple norma MIDUVI
50 < P ≤ 55	32	8.4 %	Operativamente aceptable
55 < P ≤ 60	7	1.8 %	Operativamente aceptable
60 < P ≤ 70	6	1.6 %	Por debajo del umbral admisible (70 m.c.a.)
P > 70	0	0,0 %	Sin nodos en este rango
Total	381	100 %	P máx. = 69,30 m.c.a.

Fuente: Elaboración propia.

3.9.4 Análisis de los nodos con presión superior a 50 m.c.a.

Como se observa en la Tabla 3-15, después del refinamiento todavía permanecen 45 nodos del Sector 2.1 con presiones superiores a 50 m.c.a. Este resultado merece una explicación detallada, ya que se aleja del cumplimiento estricto del rango normativo, aunque sigue siendo operativamente válido.

La razón principal por la que estos nodos no logran reducirse por debajo de 50 m.c.a. está en la topografía del sector. El Sector 2.1 presenta una diferencia altimétrica de aproximadamente 30 m entre sus puntos más altos y más bajos, y el sistema se alimenta desde el tanque Cebollar N.º 2 con una cota piezométrica fija. Bajar más la presión en las zonas bajas implicaría reducir la consigna de las PRV aguas arriba, pero hacerlo provocaría que los nodos altos del mismo subdistrito (que dependen de la misma válvula) cayeran por debajo de los 20 m.c.a., incumpliendo el límite mínimo de la norma. Existe entonces una tensión entre los dos extremos: si se baja la presión para los nodos bajos, se comprometen los altos; si se sube para asegurar los altos, los bajos exceden los 50 m.c.a.

Para resolver completamente esta situación, sería necesario instalar PRV adicionales en cada subdistrito de presión, lo que implicaría un aumento considerable en el número de válvulas y en los costos asociados. Considerando que las consecuencias

operativas de tener nodos entre 50 y 70 m.c.a. son limitadas, ya que las redes de PVC modernas y los accesorios domiciliarios están diseñados para soportar presiones de trabajo de hasta 80 m.c.a. (Pavco Wavin, 2020), se consideró que el costo-beneficio de seguir agregando válvulas no se justificaba.

Por esta razón se concluyó que el modelo entregado representa la mejor configuración alcanzable de manera razonable, con los criterios técnicos y constructivos manejados en este trabajo. Los nodos con presión superior a 50 m.c.a. permanecen dentro de un rango operativamente seguro: el más alto registra 69,30 m.c.a. y la totalidad de la red está por debajo del umbral de 70 m.c.a. que se considera el límite admisible para este tipo de infraestructura.

Tabla 3-16: Nodos con mayor presión en el modelo final del Sector 2.1

Identificador	Cota (m.s.n.m.)	Presión (m.c.a.)	Observación
2.1_N_1017	2553.83	69.30	Zona baja — sin riesgo operativo
2.1_N_1359	2594.09	66.70	Zona baja — sin riesgo operativo
2.1_N_1361	2596.55	64.20	Zona baja — sin riesgo operativo
2.1_N_1346	2598.17	62.60	Zona baja — sin riesgo operativo
J-7	2561.47	61.70	Zona baja — sin riesgo operativo
2.1_N_1371	2558.86	60.10	Zona baja — sin riesgo operativo

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de presiones que se observa en la tabla 3-16, muestra una tendencia coherente con la topografía: los nodos con mayor presión son justamente los de menor cota, es decir, los puntos donde la diferencia entre la línea piezométrica y el terreno alcanza su valor máximo. Esta es una situación esperable en redes de distribución urbanas con relieve marcado, y la práctica internacional acepta presiones puntuales por encima de 50 m.c.a. siempre que se mantengan dentro del rango admisible del material y que no comprometan los accesorios del sistema (Mays, 2000).

3.9.5 Consideración final del refinamiento

El refinamiento descrito en este apartado constituye la última etapa del proceso iterativo de optimización del Sector 2.1. La intervención adicional fue intencionalmente acotada a los cinco tramos donde la pérdida de carga excedía el límite normativo, evitando el sobredimensionamiento de la red y conservando el espíritu original de la propuesta: una intervención focalizada, técnica y respaldada en datos del modelo. Los resultados obtenidos confirman que la combinación de redimensionamiento de tuberías y control mediante PRV es una estrategia adecuada para este sector, y que la red queda en condiciones operativas que cumplen con la mayor parte de la normativa, manteniendo los desvíos puntuales dentro de márgenes técnicamente seguros.

3.10 Validación técnica y viabilidad de la propuesta

El proceso de optimización hidráulica desarrollado en el presente capítulo demuestra que es técnicamente factible garantizar el suministro de agua potable bajo condiciones normativas para el sector Mutualista hasta el horizonte de diseño del año 2050, mediante una intervención estratégica y focalizada en los tramos críticos de la red.

La propuesta de reforzamiento, basada en la combinación de redimensionamiento selectivo de tuberías e instalación de catorce PRV, permitió corregir el 94,7 % de la longitud de red con pérdidas de carga excesivas en el Sector 2.1, al tiempo que se controlan las sobrepresiones en ambos sectores mediante regulación piezométrica activa. Este enfoque dual de intervención, diferenciado según el tipo de deficiencia dominante en cada subsector, es consistente con las mejores prácticas reportadas en la literatura técnica especializada y con la experiencia previa documentada en otros sectores del sistema de abastecimiento de la ciudad de Cuenca (Bermeo & Estrada, 2025).

La adopción de criterios conservadores durante el dimensionamiento, específicamente el límite de pérdidas de carga de 10 m/km (más restrictivo que el máximo

normativo de 12 m/km) y el coeficiente de Hazen-Williams $C = 140$ (representativo del PVC en uso frente al $C = 150$ de tubería nueva), introduce factores implícitos de seguridad hidráulica que garantizan el desempeño de la red frente a la degradación progresiva del material y a las incertidumbres inherentes a la proyección poblacional de 25 años.

La verificación del régimen operativo de las PRV confirma que todas las válvulas propuestas operan con ratios de reducción inferiores al umbral crítico de cavitación, con un máximo de 2,70 en la PRV-7, garantizando la integridad mecánica y la vida útil proyectada de los dispositivos de regulación.

Los modelos hidráulicos finales, simulados con las modificaciones implementadas en WaterGEMS, verifican que los parámetros operativos de la red cumplen con los criterios establecidos por la Norma CO 10.07-601 del MIDUVI (2015): pérdidas de carga dentro del límite admisible, velocidades de flujo en el rango normativo y presiones dinámicas controladas entre 20 y 50 m.c.a. en la generalidad de los nodos de consumo. Estos resultados validan la viabilidad técnica de la propuesta y sientan las bases para su implementación por parte de ETAPA EP en el marco del plan de mejoramiento de la infraestructura de agua potable del sector Mutualista.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El reforzamiento hidráulico de la red de abastecimiento de agua potable del Sector Mutualista, mediante modelación computacional en WaterGEMS, demostró que la combinación de sustitución de tuberías e instalación de válvulas reductoras de presión permite garantizar el cumplimiento de los parámetros establecidos por la Norma CO 10.07-601 en ambos sectores de estudio, tanto para las condiciones actuales como para el horizonte de diseño 2050.

La recopilación de información técnica proporcionada por ETAPA EP, complementada con el catastro de la red y los datos de proyección poblacional, constituyó la base fundamental para la construcción de un modelo hidráulico representativo de las condiciones reales de operación. La metodología de escalado proporcional mediante el factor de multiplicación F_m permitió actualizar las demandas del modelo base al año 2025 y proyectarlas al horizonte de diseño 2050 de forma consistente con los datos oficiales de ETAPA EP.

En el Sector 2.1, se determinó una longitud de 5,13 km de tuberías con pérdidas de carga superiores a 10 m/km en el escenario proyectado al año 2050, así como 11 nodos con presión dinámica inferior a 20 m.c.a., lo que evidencia un déficit hidráulico que comprometería el suministro en las zonas de mayor elevación topográfica.

El diagnóstico del escenario actual (2025) confirmó que la red ya presenta problemas hidráulicos incipientes, con 4 nodos en déficit de presión en el Sector 2.1 y sobrepresiones superiores a 50 m.c.a. en 216 y 142 nodos de los Sectores 2.1 y 2.2, respectivamente. Esta situación refleja que la infraestructura existente fue diseñada para condiciones de demanda menores a las actuales, y que, sin intervención, las deficiencias se intensificarán conforme avance el crecimiento poblacional proyectado.

La propuesta de reforzamiento desarrollada para el Sector 2.1 comprende la sustitución de 39 tramos de tubería con una longitud total de 3.638,20 m, con incrementos de diámetro que van desde 50 a 63 mm hasta 110 a 160 mm, y la instalación de 10 válvulas reductoras de presión de 152,4 mm (6 pulgadas). Esta combinación de medidas permitió reducir la longitud de red con pérdidas de carga excesivas en un 94,7%, corrigiendo el incumplimiento normativo en la práctica totalidad de los tramos críticos identificados.

En el Sector 2.2, la estrategia de intervención se concentró en el control de sobrepresiones mediante la instalación de cuatro válvulas reductoras de presión, con modificaciones mínimas de diámetro en dos tramos (159,45 m en total). Esta solución se justifica por el carácter predominantemente piezométrico del problema en este sector, donde las pérdidas de carga no representaban un incumplimiento significativo pero las presiones excedían el límite normativo de 50 m.c.a. en 130 nodos.

La validación de los modelos hidráulicos optimizados en WaterGEMS confirma que la propuesta de reforzamiento permite alcanzar el cumplimiento de los parámetros normativos establecidos por la Norma CO 10.07-601 del MIDUVI en ambos sectores para el horizonte de diseño 2050, garantizando presiones dinámicas dentro del rango de 20 a 50 m.c.a., pérdidas de carga inferiores a 10 m/km y velocidades de flujo comprendidas entre 0,30 y 2,00 m/s en la generalidad de la red de distribución.

Recomendaciones

Se recomienda a ETAPA EP considerar la implementación de las propuestas técnicas desarrolladas en el presente estudio, priorizando la sustitución de los tramos de tubería con mayores pérdidas de carga en el Sector 2.1 y la instalación de las válvulas reductoras de presión en ambos sectores, por su impacto directo en la continuidad y calidad del servicio para los usuarios del sector Mutualista.

Se sugiere iniciar la implementación con la sustitución de los 17 tramos de 63 a 110 mm en el Sector 2.1, por concentrar la mayor longitud de intervención (1.567,50 m) y corresponder a tramos que presentaban los gradientes hidráulicos más elevados en el diagnóstico. Esta priorización permitirá obtener el mayor impacto operativo por metro lineal de tubería sustituida.

Se recomienda realizar campañas de monitoreo de presiones in situ en los nodos de referencia definidos para cada válvula reductora de presión, previas a la instalación de las mismas, con el fin de verificar las condiciones reales de operación y ajustar las presiones de consigna con base en mediciones de campo. Este proceso es fundamental para garantizar que el modelo hidráulico represente con fidelidad el comportamiento real de la red.

Se recomienda que futuras intervenciones en la red consideren la actualización periódica del modelo hidráulico en WaterGEMS con los datos reales de operación de ETAPA EP, de modo que el modelo se mantenga calibrado y pueda ser utilizado como herramienta de soporte para la toma de decisiones operativas y de planificación a largo plazo.

Se recomienda extender estudios similares a los demás sectores del área de influencia de la Planta de Agua Potable El Cebollar, dado que la problemática identificada en el sector Mutualista es representativa de un patrón recurrente en redes de distribución diseñadas para condiciones de demanda inferiores a las actuales. Un diagnóstico sistemático de toda el área de servicio permitiría a ETAPA EP planificar las intervenciones de manera integral y optimizar la inversión en infraestructura.

Finalmente, se recomienda implementar un programa de mantenimiento preventivo que incluya la inspección periódica de las válvulas reductoras de presión instaladas, la verificación de los coeficientes de rugosidad de las tuberías antiguas de asbesto-cemento que aún forman parte de la red, y el monitoreo continuo de las presiones

en los puntos críticos identificados en el presente estudio, para anticipar deterioros futuros del servicio y adoptar medidas correctivas de manera oportuna.

Lista de Referencias

- Balladares Chicaiza, A., & Guamán Quishpe, B. (2012). *Proyecto sistema integral de agua potable para las comunidades de Chulcotoro y Calquín de la parroquia de Cochapamba*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1805/11/UPS-ST000852.pdf>
- Cárdenas, F., & Rodríguez, V. (2021). *Diseño de un sistema de potabilización de agua para la ecoaldea de la isla Santay, provincia del Guayas*. Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador. Obtenido de <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/RODRIGUEZ%20BUSTAMANTE%20VERONICA%20YADIRA.pdf>
- Chiquito, J. (2020). *Diseño de la red de distribución de agua potable de la ciudadela El Mirador del cantón Puerto López*. Universidad Estatal del sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2729/1/TESIS%20FINAL%20JOEL%20CHIQUITO%281%29.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento; Conducciones*. Ciudad de México: Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.
- Coronel, I., & García, C. (2023). *Metodología para la evaluación de la conducción de la red de agua potable enfocada al cálculo del agua no contabilizada aplicada en el sistema Nero*. Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/13835/1/19358.pdf>
- EPA. (2020). *U.S. Environmental Protection Agency*. Obtenido de <https://www.epa.gov/water-research/epanet>
- ETAPA EP. (2022). *Agua Potable*. Obtenido de ETAPA EP: <https://www.etapa.net.ec/principal/agua-potable>
- Giles, R. (1956). *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Guaman, J., & Taris, M. (2017). *Diseño del sistema para el abastecimiento del agua potable de la comunidad de Mangacuzana, cantón Cañar, provincia de Cañar*. Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. Obtenido de <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/3546>

- Llugin, J., & Tinoco, J. (2022). *Diseño del sistema de agua potable y alcantarillado sanitario, para el barrio El Rosario, parroquia de Sangolquí, cantón Rumiñahui, provincia de Pichincha*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador . Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23004/1/UPS%20-%20TTS855.pdf>
- MIDUVI. (2015). *Código Ecuatoriano de la Construcción: Norma CO 10.07-601. Abastecimiento de agua potable y eliminación de aguas residuales en el área urbana*. Quito: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- MIDUVI. (2016). Obtenido de Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda del Ecuador: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (Mayo de 2018). *Reglamento Ley Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua*. Obtenido de Ministerio del Ambiente del Ecuador: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Reglamento-Ley-Recursos-Hidricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf>
- Nárvaez, H., & Velasquez, J. (2024). *Diseño de la red de abastecimiento de agua potable para el recinto San Francisco de Chila de la parroquia San Jacinto de Blua, Cantón Santo Domingo de los Tsáchilas*. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/28714/1/UPS-GT005591.pdf>
- ONU. (2015). *Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Pacto Mundial Red Española. (s.f.). *ODS 6: Agua limpia y saneamiento*. Obtenido de Pacto Mundial Red Española: <https://www.pactomundial.org/ods/6-agua-limpia-y-saneamiento/>
- Plua, R. (2019). *Diseño de la red de distribución de agua potable para la comunidad Casas Viejas de la Parroquia Pedro Pablo Gómez del cantón Jipijapa*. Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1707>
- Preciado, G., & Cabrera, D. (2021). *Diseño de una red de distribución de agua potable en la parroquia urbana San Pedro de Guanujo en el cantón Guaranda*. Escuela

Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador . Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/52234/1/T-70588%20Preciado%20-%20Cabrera.pdf>

Presidencia de la República del Ecuador. (2 de Octubre de 2023). *El acceso al agua es un derecho humano y el Estado lo garantiza*. Obtenido de Presidencia de la República del Ecuador: <https://www.presidencia.gob.ec/el-acceso-al-agua-es-un-derecho-humano-y-el-estado-lo-garantiza/>

Senagua. (2012). *Norma de diseño para sistemas de abastecimiento de agua potable, disposición de excretas y residuos líquidos en el área rural*. Quito: Senagua.

Senagua. (2012). *Norma para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes*. Quito: Senagua.

UNICEF Ecuador. (18 de Octubre de 2021). *El agua, un derecho humano pendiente para los niños del Ecuador*. Obtenido de UNICEF Ecuador: <https://www.unicef.org/ecuador/comunicados-prensa/el-agua-un-derecho-humano-pendiente-para-los-ni%C3%B1os-del-ecuador>

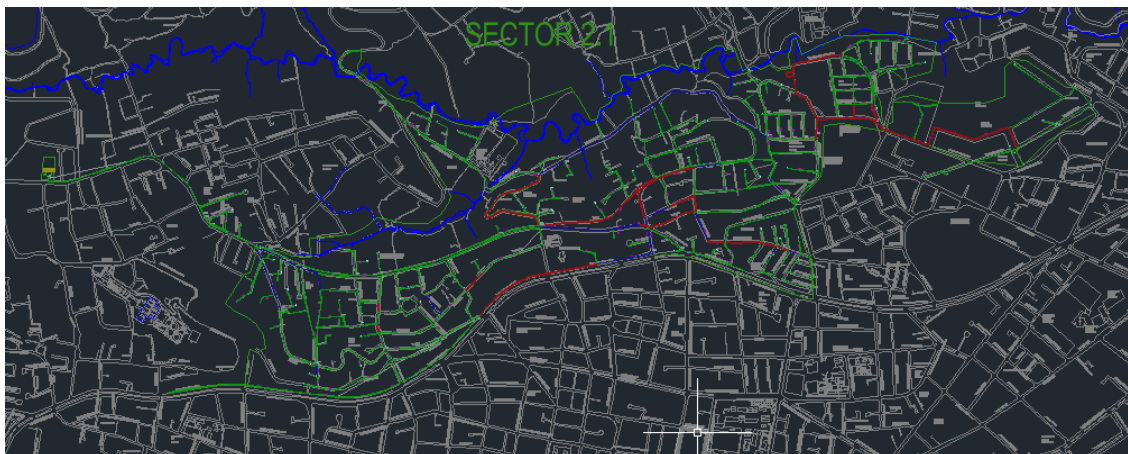
Urgiles Mendieta, E. P. (2019). *Guía de diseño con criterios de operación y mantenimiento para captaciones, conducciones y redes de distribución de agua potable, de la empresa ETAPA EP*. Universidad del Azuay: Cuenca.

Vélez, V. (2024). *Diseño de red de distribución de agua potable en el sector Vista Hermosa en la ciudad de Manta*. Universidad Estatal del sur de Manabí , Jipijapa, Ecuador . Obtenido de <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/6865/1/V%C3%A9lez%20Puerto%20V%C3%ADctor%20Andr%C3%A9s.pdf>

Yoza, D., & Lluilema, E. (2023). *Diseño del sistema de abastecimiento de agua potable para el recinto San Cristóbal de la parroquia Juan Gómez Rendón*. Universidad Politécnica Salesiana , Guayaquil, Ecuador. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/26101/1/UPS-GT004620.pdf>

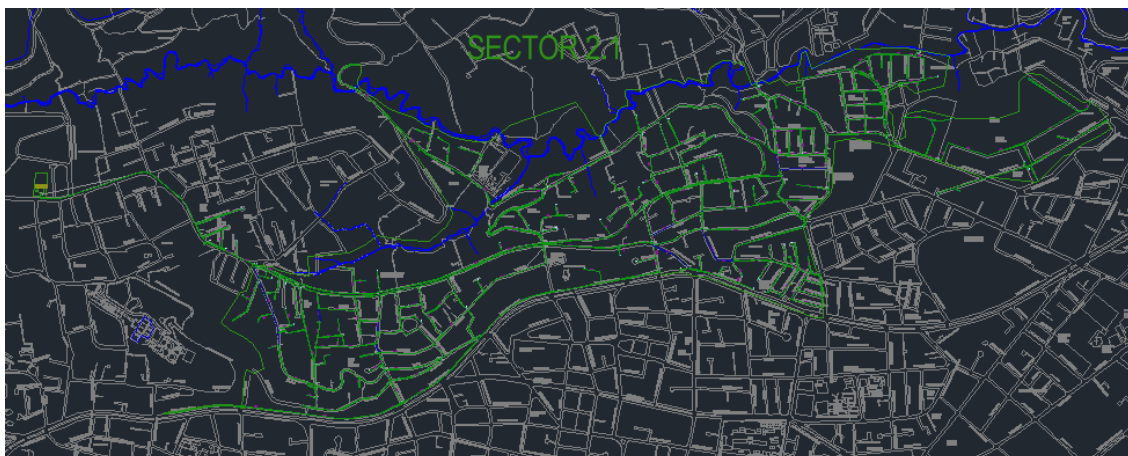
ANEXOS

Anexos 1: Planimetría y trazado de la red hidráulica actual sobre base catastral, Sector 2.1



Fuente: Elaboración propia

Anexos 2: Planimetría y trazado de la red hidráulica optimizada sobre base catastral, Sector 2.1



Fuente: Elaboración propia

Anexos 3: Tabla general de la red de distribución final, Sector 2.1 (sin refinar)

ID	Label	Lenght (m)	Diameter (mm)	Flow (L/s)	Velocity (m/s)	Headloss Gradient (m/km)
134	2.1_T_1001	0.97	63	0	0	0
137	2.1_T_1002	1.47	250	46	0.94	3.246
140	2.1_T_1003	1.68	110	0	0	0
143	2.1_T_1004	1.72	63	1	0.42	3.638
146	2.1_T_1005	1.82	63	0	0.08	0.164
149	2.1_T_1006	1.82	110	5	0.57	3.428
152	2.1_T_1007	1.92	63	0	0	0
155	2.1_T_1008	2	63	0	0.08	0.149
161	2.1_T_1010	2.02	110	0	0	0

164	2.1_T_1011	2.04	63	1	0.24	1.17
167	2.1_T_1012	2.27	63	0	0	0
170	2.1_T_1013	2.35	110	4	0.47	2.284
173	2.1_T_1014	2.34	63	8	2.47	96.982
176	2.1_T_1015	2.55	110	0	0	0
179	2.1_T_1016	3.07	110	0	0	0
182	2.1_T_1017	3.08	250	32	0.65	1.645
184	2.1_T_1018	3.1	160	26	1.28	9.588
187	2.1_T_1019	3.17	50	0	0	0
189	2.1_T_1020	3.29	110	10	1.09	11.035
192	2.1_T_1021	3.48	63	0	0.04	0.086
194	2.1_T_1022	3.91	63	0	0	0
197	2.1_T_1023	3.94	63	0	0	0
200	2.1_T_1024	4.1	63	0	0	0
203	2.1_T_1025	4.14	110	0	0	0
206	2.1_T_1026	4.15	110	3	0.37	1.505
209	2.1_T_1027	4.27	300	74	1.05	3.205
211	2.1_T_1028	4.7	100	0	0.01	0
214	2.1_T_1029	4.78	63	1	0.27	1.619
217	2.1_T_1030	4.87	63	0	0	0
219	2.1_T_1031	4.87	100	0	0	0
221	2.1_T_1032	5	110	0	0.02	0
224	2.1_T_1033	5.06	160	14	0.7	3.118
225	2.1_T_1034	5.45	63	0	0.02	0
228	2.1_T_1035	5.76	110	0	0	0
230	2.1_T_1036	6	63	0	0	0
233	2.1_T_1037	6	63	0	0.02	0
236	2.1_T_1038	6.09	160	3	0.17	0.244
238	2.1_T_1039	6.11	63	0	0.04	0.049
241	2.1_T_1040	6.27	110	0	0	0
245	2.1_T_1042	6.61	63	0	0	0
248	2.1_T_1043	6.76	63	0	0	0
251	2.1_T_1044	6.78	63	1	0.34	2.503
254	2.1_T_1045	6.9	63	-1	0.17	0.691
256	2.1_T_1046	6.93	63	0	0	0
259	2.1_T_1047	7.18	110	0	0	0
261	2.1_T_1048	7.83	50	0	0	0
263	2.1_T_1049	8.03	63	0	0.04	0.037
266	2.1_T_1050	8.05	63	0	0.01	0.037
269	2.1_T_1051	8.14	100	0	0	0
271	2.1_T_1052	8.17	63	0	0	0
274	2.1_T_1053	8.25	110	10	1.06	10.577
277	2.1_T_1054	8.24	160	1	0.05	0
279	2.1_T_1055	12.14	63	-1	0.23	1.152
282	2.1_T_1056	11.5	100	4	0.46	2.484
284	2.1_T_1057	8.5	63	0	0	0
286	2.1_T_1058	8.73	160	1	0.05	0.034
287	2.1_T_1059	8.79	63	2	0.77	11.343
290	2.1_T_1060	8.98	63	0	0	0
293	2.1_T_1061	9.12	300	74	1.05	3.231
294	2.1_T_1062	9.1	63	0	0.01	0
297	2.1_T_1063	9.4	63	2	0.52	5.475
300	2.1_T_1064	9.47	63	1	0.46	4.275
303	2.1_T_1065	9.98	100	3	0.44	2.296
306	2.1_T_1066	10.23	110	8	0.89	7.681
309	2.1_T_1067	11.5	63	1	0.46	4.272
312	2.1_T_1068	11.7	63	0	0.01	0
315	2.1_T_1069	14.25	110	0	0	0
318	2.1_T_1070	11.96	63	0	0	0
321	2.1_T_1071	11.97	63	0	0.01	0
324	2.1_T_1072	12.23	63	0	0.03	0.024
326	2.1_T_1073	12.34	63	1	0.3	1.978
327	2.1_T_1074	12.38	160	6	0.29	0.625
329	2.1_T_1075	14.52	50	0	0.02	0.02
332	2.1_T_1076	13.81	63	0	0.04	0.065
334	2.1_T_1077	13.95	110	4	0.38	1.557
337	2.1_T_1078	14.16	63	0	0	0
340	2.1_T_1079	14.65	50	0	0	0
343	2.1_T_1080	15.14	63	0	0	0.02

345	2.1_T_1081	15.33	250	4	0.07	0.039
346	2.1_T_1082	15.57	63	0	0.01	0
349	2.1_T_1083	16.11	250	0	0	0
351	2.1_T_1084	17.04	63	0	0.01	0
354	2.1_T_1085	17.28	63	0	0.06	0.103
357	2.1_T_1086	17.39	63	0	0.07	0.154
359	2.1_T_1087	18.18	50	1	0.49	7.287
362	2.1_T_1088	18.7	63	0	0	0
365	2.1_T_1089	19.37	63	0	0.15	0.522
368	2.1_T_1090	20.81	100	3	0.37	1.702
369	2.1_T_1091	20.91	110	4	0.37	1.523
372	2.1_T_1092	24.51	100	0	0.01	0
373	2.1_T_1093	21.67	63	0	0.01	0.014
376	2.1_T_1094	21.87	160	10	0.5	1.715
378	2.1_T_1095	22.18	160	9	0.47	1.503
381	2.1_T_1096	22.23	63	0	0.07	0.121
384	2.1_T_1097	22.34	250	32	0.65	1.652
386	2.1_T_1098	22.36	110	4	0.42	1.891
388	2.1_T_1099	23.37	110	0	0.03	0.013
389	2.1_T_1100	22.73	110	0	0.03	0.026
391	2.1_T_1101	22.92	63	-1	0.41	3.442
394	2.1_T_1103	24.71	63	0	0.05	0.06
396	2.1_T_1104	24.75	160	5	0.25	0.457
397	2.1_T_1105	23.67	63	-2	0.5	5.093
399	2.1_T_1106	24.31	63	0	0	0
401	2.1_T_1107	25.02	63	0	0	0
404	2.1_T_1108	25.23	63	0	0.04	0.047
405	2.1_T_1109	25.38	63	0	0	0
408	2.1_T_1110	25.52	63	0	0	0
410	2.1_T_1111	26.6	63	0	0.01	0
413	2.1_T_1112	26.55	63	0	0.04	0.034
416	2.1_T_1113	27.43	110	4	0.47	2.322
418	2.1_T_1114	27.59	63	0	0.05	0.065
421	2.1_T_1115	27.62	100	3	0.36	1.562
424	2.1_T_1116	27.75	63	1	0.37	2.917
426	2.1_T_1117	27.86	63	0	0	0
428	2.1_T_1118	28.79	63	1	0.17	0.713
430	2.1_T_1119	29.24	63	1	0.21	0.977
433	2.1_T_1120	40.33	63	0	0	0
435	2.1_T_1121	30.11	160	21	1.03	6.445
437	2.1_T_1122	30.84	63	0	0.07	0.135
440	2.1_T_1123	30.98	110	0	0.01	0
443	2.1_T_1124	31.14	63	0	0.05	0.057
444	2.1_T_1125	31.51	50	1	0.54	7.529
446	2.1_T_1126	30.87	63	1	0.2	0.935
447	2.1_T_1127	30.89	63	0	0.05	0.067
450	2.1_T_1128	31.19	63	0	0	0
452	2.1_T_1129	31.37	63	0	0.03	0.028
455	2.1_T_1130	31.39	63	-1	0.3	1.953
457	2.1_T_1131	31.94	63	0	0	0
459	2.1_T_1132	33.27	110	2	0.25	0.725
460	2.1_T_1133	35.1	110	9	0.93	8.344
461	2.1_T_1134	41.27	63	0	0.05	0.058
464	2.1_T_1135	32.79	63	0	0.02	0.018
467	2.1_T_1136	33.49	63	0	0.04	0.044
470	2.1_T_1137	34.56	63	0	0.06	0.121
471	2.1_T_1138	33.86	63	2	0.52	5.38
472	2.1_T_1139	33.89	63	1	0.27	1.572
475	2.1_T_1140	34.23	63	0	0.01	0.009
478	2.1_T_1141	34.43	160	10	0.5	1.694
479	2.1_T_1142	34.56	63	0	0.02	0.017
482	2.1_T_1143	34.9	63	1	0.22	1.1
484	2.1_T_1144	34.93	110	6	0.62	3.928
486	2.1_T_1145	35.11	63	0	0.08	0.153
488	2.1_T_1146	35.27	63	1	0.32	2.152
491	2.1_T_1147	35.32	50	1	0.63	10.155
494	2.1_T_1148	35.33	63	1	0.45	4.229
497	2.1_T_1149	36.28	50	1	0.3	2.527
498	2.1_T_1150	36.85	63	1	0.29	1.809

500	2.1_T_1151	44.62	63	0	0.11	0.28
502	2.1_T_1152	37.17	63	1	0.47	4.533
504	2.1_T_1153	37.57	63	0	0.14	0.491
505	2.1_T_1154	37.54	63	3	0.84	13.045
506	2.1_T_1155	37.59	160	14	0.7	3.136
507	2.1_T_1156	39.07	63	0	0.15	0.564
510	2.1_T_1157	38.34	63	-1	0.23	1.172
512	2.1_T_1158	46.63	63	0	0.09	0.211
514	2.1_T_1159	38.67	160	29	1.45	12.194
516	2.1_T_1160	38.6	63	1	0.41	3.54
517	2.1_T_1161	38.88	63	0	0.03	0.031
520	2.1_T_1162	62.68	63	0	0.06	0.095
523	2.1_T_1163	40.14	160	12	0.59	2.328
524	2.1_T_1164	40	63	0	0.02	0.015
526	2.1_T_1165	40.15	63	-1	0.32	2.217
528	2.1_T_1166	40.47	63	0	0.02	0.015
530	2.1_T_1167	42.29	63	0	0.09	0.19
533	2.1_T_1168	42.48	50	1	0.26	1.969
534	2.1_T_1169	42.58	110	7	0.69	4.74
537	2.1_T_1170	42.69	110	6	0.68	4.664
539	2.1_T_1171	42.77	110	7	0.71	5.095
541	2.1_T_1172	42.74	50	1	0.41	4.485
544	2.1_T_1173	42.88	63	0	0.01	0.007
547	2.1_T_1174	43.49	63	1	0.33	2.382
549	2.1_T_1175	43.56	100	-2	0.2	0.519
552	2.1_T_1176	43.69	63	0	0	0
554	2.1_T_1177	44.13	110	7	0.77	5.814
555	2.1_T_1178	44.27	110	8	0.87	7.377
556	2.1_T_1179	45.7	110	7	0.69	4.715
559	2.1_T_1180	44.6	63	0	0.06	0.087
561	2.1_T_1181	44.82	50	0	0.01	0
562	2.1_T_1182	44.94	63	1	0.21	0.98
564	2.1_T_1183	45.72	63	2	0.53	5.541
565	2.1_T_1184	45.79	63	2	0.55	5.962
567	2.1_T_1185	46.05	50	1	0.46	5.675
568	2.1_T_1186	46.23	63	0	0.06	0.103
570	2.1_T_1187	46.42	63	1	0.18	0.757
572	2.1_T_1188	46.41	63	0	0.16	0.59
573	2.1_T_1189	46.64	63	0	0.05	0.064
574	2.1_T_1190	46.79	63	0	0.02	0.019
576	2.1_T_1191	47.01	63	0	0.05	0.076
578	2.1_T_1192	47.06	63	-1	0.26	1.493
580	2.1_T_1193	47.16	160	10	0.51	1.786
581	2.1_T_1194	47.35	110	0	0	0
584	2.1_T_1195	47.88	110	7	0.72	5.197
586	2.1_T_1196	48.29	63	0	0	0
588	2.1_T_1197	48.32	50	0	0.18	1.096
590	2.1_T_1198	48.41	110	1	0.13	0.221
592	2.1_T_1199	48.69	63	-1	0.25	1.424
594	2.1_T_1200	48.94	110	1	0.1	0.14
595	2.1_T_1201	48.99	63	2	0.51	5.25
597	2.1_T_1202	49	63	0	0	0
600	2.1_T_1203	49.27	63	0	0.13	0.417
602	2.1_T_1204	49.57	50	0	0.17	0.901
604	2.1_T_1205	49.61	63	-1	0.22	1.104
605	2.1_T_1206	50.6	63	0	0.07	0.135
610	2.1_T_1208	50.88	63	0	0.05	0.076
612	2.1_T_1209	50.71	63	0	0.01	0
614	2.1_T_1210	50.81	63	1	0.42	3.585
616	2.1_T_1211	51.4	63	0	0.05	0.081
618	2.1_T_1212	51.82	63	1	0.19	0.816
619	2.1_T_1213	52.11	63	0	0.06	0.114
621	2.1_T_1214	52.25	63	0	0.02	0.011
623	2.1_T_1215	53.25	63	0	0.02	0.017
626	2.1_T_1216	65.27	50	1	0.4	4.287
627	2.1_T_1217	53.04	110	2	0.24	0.662
628	2.1_T_1218	53.01	63	1	0.19	0.809
629	2.1_T_1219	53.49	110	4	0.42	1.881
632	2.1_T_1220	73.88	63	0	0.04	0.04

635	2.1_T_1221	55.92	63	-1	0.26	1.506
638	2.1_T_1222	54.72	63	0	0.06	0.114
640	2.1_T_1223	54.74	63	2	0.52	5.476
641	2.1_T_1224	54.81	110	5	0.52	2.791
642	2.1_T_1225	55.37	100	-9	1.15	13.735
644	2.1_T_1226	57.36	63	0	0.01	0.005
646	2.1_T_1227	73.93	63	0	0.02	0.012
648	2.1_T_1228	75.3	63	0	0.04	0.055
650	2.1_T_1229	59.13	63	0	0.06	0.096
653	2.1_T_1230	59.68	63	-1	0.17	0.693
654	2.1_T_1231	56.18	110	0	0	0
655	2.1_T_1232	56.91	63	0	0.1	0.246
656	2.1_T_1233	57.02	63	0	0.03	0.031
658	2.1_T_1234	57.05	110	10	1.02	9.918
659	2.1_T_1235	57.35	63	0	0.04	0.057
662	2.1_T_1236	57.44	63	0	0.09	0.207
663	2.1_T_1237	57.55	63	0	0.09	0.191
665	2.1_T_1238	57.67	63	2	0.8	12.032
667	2.1_T_1239	57.95	110	9	0.95	8.686
669	2.1_T_1240	57.78	63	-1	0.28	1.746
672	2.1_T_1242	58.2	63	2	0.53	5.697
673	2.1_T_1243	59.52	63	0	0.02	0.02
675	2.1_T_1244	60.07	160	21	1.02	6.397
677	2.1_T_1245	60.37	63	1	0.18	0.735
679	2.1_T_1246	60.42	63	0	0	0
681	2.1_T_1247	65.24	63	0	0.15	0.557
683	2.1_T_1248	63.38	110	4	0.42	1.907
684	2.1_T_1249	61.31	63	0	0.09	0.223
686	2.1_T_1250	67.66	63	0	0.04	0.048
688	2.1_T_1251	61.37	63	0	0.07	0.146
689	2.1_T_1252	61.47	63	0	0	0
691	2.1_T_1253	81.51	63	0	0.03	0.029
693	2.1_T_1254	61.65	63	0	0.06	0.097
695	2.1_T_1255	61.76	63	1	0.24	1.34
697	2.1_T_1256	66.68	110	9	0.9	7.816
699	2.1_T_1257	62.2	160	9	0.45	1.388
700	2.1_T_1258	62.95	63	1	0.23	1.215
701	2.1_T_1259	79.93	63	0	0.06	0.108
703	2.1_T_1260	63.01	63	0	0.02	0.009
706	2.1_T_1261	63.67	63	2	0.53	5.545
708	2.1_T_1262	63.76	63	1	0.44	3.95
709	2.1_T_1263	63.9	63	0	0	0
710	2.1_T_1264	64.2	63	1	0.43	3.774
711	2.1_T_1265	64.48	63	1	0.22	1.094
712	2.1_T_1266	64.52	63	0	0.08	0.18
713	2.1_T_1267	64.73	50	0	0.11	0.414
714	2.1_T_1268	64.71	63	1	0.2	0.906
715	2.1_T_1269	67.9	110	9	0.91	7.899
717	2.1_T_1270	64.92	300	74	1.05	3.237
718	2.1_T_1271	64.97	63	1	0.22	1.09
720	2.1_T_1272	66.34	63	0	0.02	0.013
723	2.1_T_1273	68.09	110	7	0.78	5.976
724	2.1_T_1274	67.04	63	0	0.09	0.226
726	2.1_T_1275	67.24	63	0	0.06	0.106
728	2.1_T_1276	67.16	63	-1	0.2	0.904
729	2.1_T_1277	67.32	63	0	0.01	0.004
732	2.1_T_1278	67.76	63	0	0.12	0.382
733	2.1_T_1279	67.62	63	0	0.03	0.035
735	2.1_T_1280	68.13	63	1	0.3	2.01
736	2.1_T_1281	69.02	110	0	0.01	0
738	2.1_T_1282	69.23	160	13	0.66	2.803
740	2.1_T_1283	69.48	63	0	0	0
742	2.1_T_1284	72.79	63	0	0	0
743	2.1_T_1285	69.75	63	0	0.03	0.021
746	2.1_T_1286	69.81	63	0	0.05	0.06
747	2.1_T_1287	69.91	63	1	0.17	0.702
748	2.1_T_1288	78.28	63	0	0.06	0.114
750	2.1_T_1289	70.47	110	6	0.66	4.389
752	2.1_T_1290	71.43	63	0	0.05	0.088

754	2.1_T_1291	71.18	110	9	0.99	9.334
755	2.1_T_1292	74.09	63	0	0.14	0.47
756	2.1_T_1293	71.73	63	0	0.12	0.386
759	2.1_T_1294	71.94	63	0	0.05	0.062
762	2.1_T_1295	104.67	63	0	0.02	0.011
764	2.1_T_1296	72.69	63	0	0.15	0.532
766	2.1_T_1297	74.43	63	0	0.01	0.004
769	2.1_T_1298	74.71	50	0	0.1	0.382
770	2.1_T_1299	75.37	63	0	0.05	0.083
773	2.1_T_1300	75.93	63	0	0	0
775	2.1_T_1301	76.03	50	0	0.12	0.442
777	2.1_T_1302	76.74	63	0	0.16	0.609
778	2.1_T_1303	94.43	63	1	0.26	1.459
781	2.1_T_1304	98.97	63	0	0.11	0.313
782	2.1_T_1305	77.98	110	3	0.37	1.47
784	2.1_T_1306	78.39	63	1	0.24	1.28
785	2.1_T_1307	79.12	110	1	0.07	0.075
787	2.1_T_1308	79.17	63	0	0.09	0.203
789	2.1_T_1309	79.87	63	0	0.06	0.116
790	2.1_T_1310	89.24	63	0	0.05	0.08
792	2.1_T_1311	80.36	63	0	0.08	0.182
793	2.1_T_1312	80.42	110	-2	0.24	0.688
795	2.1_T_1313	80.6	110	2	0.22	0.584
796	2.1_T_1314	80.8	63	0	0.05	0.066
798	2.1_T_1315	81.15	160	1	0.04	0.015
799	2.1_T_1316	84.22	63	0	0.16	0.604
800	2.1_T_1317	82.81	110	7	0.78	5.945
801	2.1_T_1318	87.56	110	3	0.36	1.421
802	2.1_T_1319	83.46	110	1	0.16	0.3
803	2.1_T_1320	85.63	100	0	0.06	0.063
805	2.1_T_1321	86.95	110	1	0.11	0.151
807	2.1_T_1322	87.92	63	0	0.07	0.149
809	2.1_T_1323	107.05	63	0	0.02	0.017
810	2.1_T_1324	87.84	250	52	1.07	4.11
811	2.1_T_1325	132.23	63	0	0	0
812	2.1_T_1326	173.12	63	0	0	0
815	2.1_T_1327	88.93	110	5	0.5	2.624
816	2.1_T_1328	274.29	50	1	0.26	2.239
817	2.1_T_1329	89.48	63	0	0	0
818	2.1_T_1330	93.61	63	0	0.03	0.019
820	2.1_T_1331	89.74	50	0	0.1	0.332
821	2.1_T_1332	114.07	63	0	0.04	0.044
822	2.1_T_1333	103.36	63	0	0.05	0.075
824	2.1_T_1334	90.28	63	-1	0.2	0.956
826	2.1_T_1335	90.45	50	1	0.3	2.6
827	2.1_T_1336	110.25	110	5	0.5	2.665
828	2.1_T_1337	92.36	63	0	0.08	0.187
830	2.1_T_1338	90.98	63	2	0.64	8.003
832	2.1_T_1339	181.39	63	0	0.01	0
833	2.1_T_1340	90.99	63	0	0.01	0
834	2.1_T_1341	91.11	50	0	0.03	0.039
835	2.1_T_1342	91.22	63	0	0.01	0.003
838	2.1_T_1344	92.77	160	13	0.67	2.93
839	2.1_T_1345	97.67	63	0	0.03	0.027
841	2.1_T_1346	94.61	63	0	0	0
843	2.1_T_1347	95.83	63	1	0.48	4.619
844	2.1_T_1348	99.73	63	0	0	0
846	2.1_T_1349	120.38	63	0	0.01	0.005
848	2.1_T_1350	96.69	110	5	0.51	2.684
849	2.1_T_1351	117.45	50	1	0.35	3.492
851	2.1_T_1352	99.24	160	19	0.94	5.525
852	2.1_T_1353	133.86	50	0	0.22	1.461
853	2.1_T_1354	101.2	63	0	0.11	0.297
854	2.1_T_1355	101.8	110	3	0.28	0.924
855	2.1_T_1356	148.86	63	0	0.05	0.084
856	2.1_T_1357	105.41	200	31	0.99	4.634
859	2.1_T_1360	106.93	110	1	0.12	0.192
860	2.1_T_1361	110.34	50	0	0.06	0.132
862	2.1_T_1362	179.7	63	0	0.09	0.224

864	2.1_T_1363	108.97	63	1	0.43	3.756
866	2.1_T_1365	107.92	63	1	0.47	4.529
867	2.1_T_1366	108.68	63	0	0.09	0.222
868	2.1_T_1367	115.31	63	0	0.08	0.17
869	2.1_T_1368	111.98	50	0	0.05	0.085
871	2.1_T_1369	112.28	63	0	0.11	0.297
873	2.1_T_1370	113.08	63	1	0.18	0.792
874	2.1_T_1371	142.32	63	0	0.07	0.125
876	2.1_T_1372	114.5	300	74	1.05	3.236
877	2.1_T_1373	116.16	100	3	0.41	2.024
878	2.1_T_1374	123.51	110	1	0.06	0.055
879	2.1_T_1375	125.51	50	0	0.14	0.735
880	2.1_T_1376	121.08	110	-1	0.11	0.148
881	2.1_T_1377	149.33	63	1	0.38	3.107
882	2.1_T_1378	130.84	63	1	0.27	1.586
883	2.1_T_1379	125.65	63	0	0.05	0.083
885	2.1_T_1380	126.11	63	0	0	0
886	2.1_T_1381	125.77	110	6	0.63	4.033
887	2.1_T_1382	127.24	160	19	0.93	5.418
888	2.1_T_1383	129.77	110	0	0.02	0.007
889	2.1_T_1384	130.66	110	6	0.67	4.474
890	2.1_T_1385	126.73	50	0	0.25	1.834
891	2.1_T_1386	132.22	63	0	0.15	0.552
892	2.1_T_1387	132.68	160	12	0.61	2.436
893	2.1_T_1388	174.17	63	0	0.01	0.002
895	2.1_T_1389	138.36	63	1	0.23	1.231
897	2.1_T_1390	178.29	63	0	0	0
900	2.1_T_1392	157.03	63	2	0.64	7.931
901	2.1_T_1393	215.85	110	6	0.59	3.544
902	2.1_T_1394	163.21	110	7	0.76	5.721
904	2.1_T_1395	159.73	63	2	0.58	6.574
905	2.1_T_1396	203.38	160	4	0.19	0.291
906	2.1_T_1397	161.34	110	1	0.05	0.044
907	2.1_T_1398	165.13	50	1	0.57	8.4
910	2.1_T_1400	186.89	160	11	0.53	1.897
911	2.1_T_1401	184.17	100	3	0.4	1.917
912	2.1_T_1402	246.24	110	2	0.21	0.526
914	2.1_T_1404	199.03	63	1	0.21	0.975
915	2.1_T_1405	200.18	63	1	0.26	1.496
916	2.1_T_1406	204.75	63	0	0.01	0.003
918	2.1_T_1407	248.32	63	-2	0.49	4.869
920	2.1_T_1409	214.87	200	32	1.01	4.788
921	2.1_T_1410	217.57	63	1	0.26	1.546
922	2.1_T_1411	224.23	160	14	0.69	3.125
923	2.1_T_1412	298.72	110	0	0	0
924	2.1_T_1413	259.74	63	0	0.1	0.234
925	2.1_T_1414	276.44	63	1	0.28	1.715
927	2.1_T_1415	268.22	63	0	0.04	0.04
929	2.1_T_1416	270.34	110	0	0.01	0.001
930	2.1_T_1417	291.72	63	1	0.35	2.574
931	2.1_T_1418	357.97	110	5	0.53	2.934
932	2.1_T_1419	332.34	110	0	0	0
933	2.1_T_1420	345.62	110	0	0.02	0.008
934	2.1_T_1421	354.03	300	53	0.75	1.737
935	2.1_T_1422	444.35	250	52	1.07	4.104
937	2.1_T_1424	466.67	100	0	0	0
938	2.1_T_1425	650.1	300	74	1.05	3.237
940	2.1_T_1426	1,192.86	63	1	0.17	0.709
944	2.1_T_1427	107.89	63	0	0.14	0.508
945	2.1_T_1428	7.06	63	0	0.14	0.506
946	2.1_T_1429	48.44	250	9	0.18	0.147
948	2.1_T_1431	100.61	63	0	0.1	0.246
949	2.1_T_1432	119.29	63	0	0.1	0.247
950	2.1_T_1433	31.1	300	74	1.05	3.244
951	2.1_T_1434	39.83	300	74	1.05	3.236
964	2.1_T_1041(1)	3.38	160	21	1.03	6.605
965	2.1_T_1041(2)	3.14	160	21	1.03	6.536
967	2.1_T_1391(1)	136.82	250	52	1.06	4.077
968	2.1_T_1391(2)	4.54	250	52	1.06	4.068

970	2.1_T_1343(1)	90.73	63	0	0	0
974	2.1_T_1241(2)	54.75	100	0	0.01	0.005
977	2.1_T_1359(2)	114.97	63	0	0.03	0.031
979	2.1_T_1403(1)	207.45	110	8	0.84	6.834
980	2.1_T_1403(2)	3.48	110	8	0.84	6.841
985	2.1_T_1102(1)	17.83	160	13	0.65	2.771
986	2.1_T_1102(2)	4.99	160	13	0.65	2.801
991	2.1_T_1358(1)	101.84	110	9	0.95	8.678
992	2.1_T_1358(2)	2.5	110	9	0.95	8.678
995	2.1_T_1430(2)	15.73	250	9	0.18	0.151
996	P-9	24.68	110	11	1.14	12.026
998	2.1_T_1423(1)	433.75	110	0	0	0
1001	2.1_T_1430(1)(1)	167.17	250	20	0.4	0.662
1002	2.1_T_1430(1)(2)	10.78	250	20	0.4	0.663
1004	2.1_T_1399(1)	166.7	63	0	0.01	0.005
1007	2.1_T_1207(1)	2.29	110	5	0.49	2.595
1008	2.1_T_1207(2)	47.95	110	5	0.49	2.545
1010	2.1_T_1408(1)	221.28	160	4	0.18	0.248
1011	2.1_T_1408(2)	8.61	160	4	0.18	0.242

Fuente: Elaboración propia

Anexos 4: Tabla de nodos optimizados, Sector 2.1

Label	ID	Elevation (m)	Pressure (m H ₂ O)
2.1_N_1001	135	2,596.05	31.4
2.1_N_1002	136	2,595.87	31.5
2.1_N_1003	138	2,633.26	29.9
2.1_N_1004	139	2,633.34	29.9
2.1_N_1005	141	2,596.44	31.2
2.1_N_1006	142	2,596.90	30.7
2.1_N_1007	144	2,641.06	20.3
2.1_N_1008	145	2,640.86	20.5
2.1_N_1009	147	2,627.73	38.7
2.1_N_1010	148	2,627.94	38.5
2.1_N_1011	150	2,574.41	42.5
2.1_N_1012	151	2,574.50	42.4
2.1_N_1013	153	2,555.18	39.1
2.1_N_1014	154	2,555.19	39.1
2.1_N_1015	156	2,558.93	35.5
2.1_N_1016	157	2,558.72	35.7
2.1_N_1017	159	2,553.83	69.3
2.1_N_1019	162	2,648.41	34.9
2.1_N_1020	163	2,648.21	35.1
2.1_N_1021	165	2,637.03	23.8
2.1_N_1022	166	2,637.03	23.9
2.1_N_1023	168	2,576.98	44.4
2.1_N_1024	169	2,576.60	44.8
2.1_N_1025	171	2,608.86	38.3
2.1_N_1026	172	2,608.76	38.4
2.1_N_1027	174	2,585.00	32.5
2.1_N_1028	175	2,585.02	32.7
2.1_N_1029	177	2,647.56	35.7
2.1_N_1030	178	2,647.31	35.9
2.1_N_1031	181	2,594.95	32.7
2.1_N_1032	183	2,633.49	29.7
2.1_N_1033	185	2,632.68	28.8
2.1_N_1034	186	2,632.39	29.1
2.1_N_1035	188	2,575.10	41.6
2.1_N_1036	190	2,599.86	42.5
2.1_N_1037	191	2,600.26	42.2
2.1_N_1038	193	2,553.85	40.4
2.1_N_1039	195	2,566.14	50.4
2.1_N_1040	196	2,566.33	50.2
2.1_N_1041	198	2,667.40	20.5
2.1_N_1042	199	2,666.89	21

2.1_N_1043	201	2,565.74	28.7
2.1_N_1044	202	2,567.01	27.5
2.1_N_1045	204	2,631.65	35.4
2.1_N_1046	205	2,632.83	30.4
2.1_N_1047	207	2,585.09	39.4
2.1_N_1048	208	2,584.89	39.6
2.1_N_1049	210	2,647.14	36.1
2.1_N_1050	212	2,582.98	41.5
2.1_N_1051	213	2,583.17	41.3
2.1_N_1052	215	2,586.72	33.5
2.1_N_1053	216	2,586.84	33.4
2.1_N_1054	218	2,574.60	42.1
2.1_N_1055	220	2,600.17	46.6
2.1_N_1056	222	2,586.27	41.3
2.1_N_1057	223	2,585.99	41.6
2.1_N_1058	226	2,613.46	48.6
2.1_N_1059	227	2,613.86	48.2
2.1_N_1060	229	2,631.96	31.1
2.1_N_1061	231	2,592.71	34.9
2.1_N_1062	232	2,592.10	35.5
2.1_N_1063	234	2,626.86	32.8
2.1_N_1064	235	2,629.28	30.4
2.1_N_1065	237	2,595.86	31.8
2.1_N_1066	239	2,604.38	43.6
2.1_N_1067	240	2,604.00	44
2.1_N_1068	242	2,608.80	18.6
2.1_N_1069	244	2,647.49	20.8
2.1_N_1070	246	2,558.48	35.8
2.1_N_1071	247	2,557.10	37.2
2.1_N_1072	249	2,552.73	46.8
2.1_N_1073	250	2,551.88	47.7
2.1_N_1074	252	2,584.98	35.3
2.1_N_1075	253	2,585.57	34.7
2.1_N_1076	255	2,564.39	30.1
2.1_N_1077	257	2,590.96	36.6
2.1_N_1078	258	2,589.88	37.7
2.1_N_1079	260	2,647.99	20.3
2.1_N_1080	262	2,633.96	29.2
2.1_N_1081	264	2,640.81	25.4
2.1_N_1082	265	2,640.82	25.3
2.1_N_1083	267	2,633.95	32.8
2.1_N_1084	268	2,633.36	33.4
2.1_N_1085	270	2,582.55	41.9
2.1_N_1086	272	2,582.72	34
2.1_N_1087	273	2,580.72	36
2.1_N_1088	275	2,646.72	21.3
2.1_N_1089	276	2,646.51	21.4
2.1_N_1090	278	2,594.28	33.4
2.1_N_1091	280	2,551.36	43
2.1_N_1092	281	2,551.00	43.4
2.1_N_1093	283	2,585.13	39.4
2.1_N_1094	285	2,587.78	39.8
2.1_N_1095	288	2,610.42	49.9
2.1_N_1096	289	2,611.17	49.1
2.1_N_1097	291	2,668.01	19.8
2.1_N_1098	292	2,667.84	20
2.1_N_1099	295	2,608.61	18.8
2.1_N_1100	296	2,611.28	16.2
2.1_N_1101	298	2,611.01	37.2
2.1_N_1102	299	2,612.87	35.4
2.1_N_1103	301	2,566.66	49.9
2.1_N_1104	302	2,566.81	49.8
2.1_N_1105	304	2,599.05	47.7
2.1_N_1106	305	2,598.56	48.2
2.1_N_1107	307	2,640.13	26.1
2.1_N_1108	308	2,639.57	26.5
2.1_N_1109	310	2,640.29	20.7
2.1_N_1110	311	2,640.39	20.6
2.1_N_1111	313	2,616.43	46.7

2.1_N_1112	314	2,612.28	50.8
2.1_N_1113	316	2,660.59	23.3
2.1_N_1114	317	2,659.87	24
2.1_N_1115	319	2,639.37	28.1
2.1_N_1116	320	2,639.48	28
2.1_N_1117	322	2,555.76	38.5
2.1_N_1118	323	2,559.69	34.6
2.1_N_1119	325	2,584.09	36.1
2.1_N_1120	328	2,634.00	29.2
2.1_N_1121	330	2,584.68	32
2.1_N_1122	331	2,582.67	34
2.1_N_1123	333	2,551.88	47.7
2.1_N_1124	335	2,586.75	37.7
2.1_N_1125	336	2,588.00	36.5
2.1_N_1126	338	2,655.06	32.8
2.1_N_1127	339	2,654.21	33.6
2.1_N_1128	341	2,591.92	32.5
2.1_N_1129	342	2,590.49	33.9
2.1_N_1130	344	2,590.22	30
2.1_N_1131	347	2,644.20	23.9
2.1_N_1132	348	2,643.92	24.2
2.1_N_1133	350	2,583.30	41.2
2.1_N_1134	352	2,631.30	31.6
2.1_N_1135	353	2,627.42	35.5
2.1_N_1136	355	2,558.72	40.9
2.1_N_1137	356	2,556.45	43.1
2.1_N_1138	358	2,562.75	31.7
2.1_N_1139	360	2,635.00	28.2
2.1_N_1140	361	2,635.72	27.3
2.1_N_1141	363	2,660.82	27
2.1_N_1142	364	2,661.08	26.8
2.1_N_1143	366	2,629.61	37.3
2.1_N_1144	367	2,629.36	37.5
2.1_N_1145	370	2,568.22	48.5
2.1_N_1146	371	2,569.23	47.5
2.1_N_1147	374	2,540.29	54
2.1_N_1148	375	2,540.66	53.6
2.1_N_1149	377	2,644.71	23.4
2.1_N_1150	379	2,643.44	24.6
2.1_N_1151	380	2,642.90	25.1
2.1_N_1152	382	2,645.94	22.2
2.1_N_1153	383	2,645.25	22.8
2.1_N_1154	385	2,632.66	30.5
2.1_N_1155	387	2,570.84	45.9
2.1_N_1156	390	2,608.39	19.1
2.1_N_1157	393	2,612.70	30.1
2.1_N_1158	395	2,560.94	38.7
2.1_N_1159	398	2,646.09	22.1
2.1_N_1160	400	2,538.00	56.3
2.1_N_1161	402	2,564.22	55.9
2.1_N_1162	403	2,564.20	55.9
2.1_N_1163	406	2,627.27	35.7
2.1_N_1164	407	2,629.74	33.3
2.1_N_1165	409	2,634.78	32.1
2.1_N_1166	411	2,568.59	25.9
2.1_N_1167	412	2,572.41	22.1
2.1_N_1168	414	2,635.14	31.7
2.1_N_1169	415	2,634.61	32.2
2.1_N_1170	417	2,597.78	26.8
2.1_N_1171	419	2,560.00	34.4
2.1_N_1172	420	2,563.23	31.2
2.1_N_1173	422	2,593.56	52.9
2.1_N_1174	423	2,593.03	53.4
2.1_N_1175	425	2,568.82	47.7
2.1_N_1176	427	2,614.27	33.9
2.1_N_1177	429	2,567.59	49
2.1_N_1178	431	2,633.01	27.9
2.1_N_1179	432	2,633.01	27.8
2.1_N_1180	434	2,576.19	46.3

2.1_N_1181	436	2,631.27	30
2.1_N_1182	438	2,603.53	38
2.1_N_1183	439	2,604.29	37.3
2.1_N_1184	441	2,599.57	24.9
2.1_N_1185	442	2,598.74	25.7
2.1_N_1186	445	2,631.27	35.4
2.1_N_1187	448	2,541.65	52.6
2.1_N_1188	449	2,541.94	52.3
2.1_N_1189	451	2,607.69	40.3
2.1_N_1190	453	2,613.94	48.4
2.1_N_1191	454	2,619.35	43
2.1_N_1192	456	2,567.52	27
2.1_N_1193	458	2,635.47	25.4
2.1_N_1194	462	2,596.52	44.9
2.1_N_1195	463	2,591.12	50.2
2.1_N_1196	465	2,612.69	34.8
2.1_N_1197	466	2,602.93	44.5
2.1_N_1198	468	2,621.03	39.8
2.1_N_1199	469	2,619.54	41.3
2.1_N_1200	473	2,637.30	29.8
2.1_N_1201	474	2,635.82	31.2
2.1_N_1202	476	2,644.01	23.9
2.1_N_1203	477	2,644.10	23.8
2.1_N_1204	480	2,631.72	48.7
2.1_N_1205	481	2,632.00	48.4
2.1_N_1206	483	2,633.48	27.4
2.1_N_1207	485	2,577.21	44.3
2.1_N_1208	487	2,613.29	49.7
2.1_N_1209	489	2,633.65	33.1
2.1_N_1210	490	2,631.76	34.9
2.1_N_1211	492	2,634.97	31.8
2.1_N_1212	493	2,636.33	30.8
2.1_N_1213	495	2,638.10	29.3
2.1_N_1214	496	2,637.22	30
2.1_N_1215	499	2,558.71	35.6
2.1_N_1216	501	2,573.77	43
2.1_N_1217	503	2,598.36	49.4
2.1_N_1218	508	2,630.28	36.7
2.1_N_1219	509	2,633.69	33.3
2.1_N_1220	511	2,634.05	25.6
2.1_N_1221	513	2,636.22	30.7
2.1_N_1222	515	2,634.48	27.2
2.1_N_1223	518	2,625.79	40
2.1_N_1224	519	2,635.04	30.7
2.1_N_1225	521	2,644.66	22.7
2.1_N_1226	522	2,643.28	24.1
2.1_N_1227	525	2,570.32	29.3
2.1_N_1228	527	2,597.36	49.7
2.1_N_1229	529	2,640.27	20.8
2.1_N_1230	531	2,616.75	44.1
2.1_N_1231	532	2,608.96	51.9
2.1_N_1232	535	2,591.27	32.4
2.1_N_1233	536	2,590.70	32.7
2.1_N_1234	538	2,593.42	30.5
2.1_N_1235	540	2,596.23	27.9
2.1_N_1236	542	2,588.95	35.2
2.1_N_1237	543	2,585.88	38
2.1_N_1238	545	2,637.15	45.4
2.1_N_1239	546	2,636.39	46.2
2.1_N_1240	548	2,600.92	40.5
2.1_N_1241	550	2,611.75	54.4
2.1_N_1242	551	2,611.75	54.5
2.1_N_1243	553	2,553.28	41
2.1_N_1244	557	2,589.39	34.5
2.1_N_1245	558	2,586.30	37.8
2.1_N_1246	560	2,636.00	31.2
2.1_N_1247	563	2,574.15	42.4
2.1_N_1248	566	2,640.74	27
2.1_N_1249	569	2,639.02	43.6

2.1_N_1250	571	2,571.69	44.8
2.1_N_1251	575	2,634.46	32.5
2.1_N_1252	577	2,548.75	45.5
2.1_N_1253	579	2,564.68	29.8
2.1_N_1254	582	2,568.89	25.7
2.1_N_1255	583	2,575.87	18.7
2.1_N_1256	585	2,593.43	30.2
2.1_N_1257	587	2,659.99	27.9
2.1_N_1258	589	2,638.40	24.6
2.1_N_1259	591	2,563.02	31.5
2.1_N_1260	593	2,556.62	37.9
2.1_N_1261	596	2,569.49	25.3
2.1_N_1262	598	2,651.19	32.3
2.1_N_1263	599	2,653.73	29.8
2.1_N_1264	601	2,545.60	48.7
2.1_N_1265	603	2,581.31	35.6
2.1_N_1266	606	2,614.15	52
2.1_N_1267	607	2,626.87	39.3
2.1_N_1268	609	2,575.18	47.7
2.1_N_1269	611	2,602.66	38.8
2.1_N_1270	613	2,598.87	48.9
2.1_N_1271	615	2,639.15	28.3
2.1_N_1272	617	2,643.86	24.3
2.1_N_1273	620	2,571.31	23.2
2.1_N_1274	622	2,612.60	53.8
2.1_N_1275	624	2,581.56	37.6
2.1_N_1276	625	2,590.00	29.2
2.1_N_1277	630	2,638.04	29.2
2.1_N_1278	631	2,637.50	29.6
2.1_N_1279	633	2,590.11	37.5
2.1_N_1280	634	2,606.00	21.6
2.1_N_1281	636	2,631.02	36
2.1_N_1282	637	2,635.00	32.1
2.1_N_1283	639	2,598.75	28.7
2.1_N_1284	643	2,599.00	26
2.1_N_1285	645	2,565.46	34.1
2.1_N_1286	647	2,636.96	45.6
2.1_N_1287	649	2,619.08	28.1
2.1_N_1288	651	2,576.21	43.8
2.1_N_1289	652	2,564.06	55.9
2.1_N_1290	657	2,638.56	22.3
2.1_N_1291	660	2,569.48	53.7
2.1_N_1292	661	2,566.33	56.8
2.1_N_1293	664	2,638.16	28.8
2.1_N_1294	666	2,641.16	26.7
2.1_N_1295	668	2,642.35	24.3
2.1_N_1296	670	2,626.80	33
2.1_N_1297	674	2,572.52	47.7
2.1_N_1298	676	2,632.94	27.9
2.1_N_1299	678	2,572.18	44.4
2.1_N_1300	680	2,574.31	53.3
2.1_N_1301	682	2,588.38	29.3
2.1_N_1302	685	2,626.18	40.8
2.1_N_1303	687	2,634.62	32.1
2.1_N_1304	690	2,562.08	58
2.1_N_1305	692	2,628.76	38.2
2.1_N_1306	694	2,642.22	23.9
2.1_N_1307	696	2,636.48	30.6
2.1_N_1308	698	2,593.08	25.1
2.1_N_1309	702	2,640.66	20.7
2.1_N_1310	704	2,653.89	5.9
2.1_N_1311	705	2,636.18	23.6
2.1_N_1312	707	2,634.42	26.9
2.1_N_1313	716	2,601.88	23.2
2.1_N_1314	719	2,604.01	56.8
2.1_N_1315	721	2,588.98	32.4
2.1_N_1316	722	2,596.76	24.6
2.1_N_1317	725	2,612.92	54
2.1_N_1318	727	2,580.10	36.7

2.1_N_1319	730	2,588.13	39.5
2.1_N_1320	731	2,577.03	50.6
2.1_N_1321	734	2,629.18	37.3
2.1_N_1322	737	2,551.39	43.1
2.1_N_1323	739	2,587.56	35.7
2.1_N_1324	741	2,664.61	23.2
2.1_N_1325	744	2,644.00	18.2
2.1_N_1326	745	2,633.87	28.3
2.1_N_1327	749	2,626.47	40.3
2.1_N_1328	753	2,555.62	38.7
2.1_N_1329	757	2,608.92	52.1
2.1_N_1330	758	2,608.57	52.5
2.1_N_1331	760	2,608.66	53.6
2.1_N_1332	761	2,627.09	35.2
2.1_N_1333	763	2,586.49	41.1
2.1_N_1334	765	2,633.05	27.8
2.1_N_1335	767	2,637.84	44.4
2.1_N_1336	768	2,628.20	54
2.1_N_1337	771	2,619.99	40.8
2.1_N_1338	772	2,627.22	33.5
2.1_N_1339	774	2,567.06	32.6
2.1_N_1340	776	2,579.56	37.4
2.1_N_1341	779	2,606.39	53.5
2.1_N_1342	780	2,610.59	49.2
2.1_N_1343	783	2,602.64	17.8
2.1_N_1344	786	2,603.61	23.8
2.1_N_1345	788	2,593.45	53.6
2.1_N_1346	791	2,598.17	62.6
2.1_N_1347	794	2,614.82	46.3
2.1_N_1348	797	2,553.16	41.1
2.1_N_1349	804	2,611.47	54.7
2.1_N_1350	806	2,598.98	28.5
2.1_N_1351	808	2,643.44	17.9
2.1_N_1352	813	2,599.82	27.6
2.1_N_1353	814	2,601.29	26.1
2.1_N_1354	819	2,639.50	26.6
2.1_N_1355	823	2,580.14	36.6
2.1_N_1356	825	2,631.41	28.8
2.1_N_1357	829	2,578.33	43
2.1_N_1358	831	2,609.53	50.9
2.1_N_1359	836	2,594.09	66.7
2.1_N_1360	840	2,617.93	49.9
2.1_N_1361	842	2,596.55	64.2
2.1_N_1362	845	2,597.98	25.9
2.1_N_1363	847	2,594.16	33.3
2.1_N_1364	850	2,623.90	37.1
2.1_N_1365	861	2,610.16	52.1
2.1_N_1366	863	2,589.50	37.9
2.1_N_1367	870	2,599.06	24.8
2.1_N_1368	872	2,641.24	26.8
2.1_N_1369	884	2,586.59	54.8
2.1_N_1370	894	2,605.90	54.8
2.1_N_1371	896	2,558.86	60.1
2.1_N_1372	898	2,574.76	49.7
2.1_N_1373	917	2,586.25	33.8
2.1_N_1374	926	2,582.62	34.4
2.1_N_1375	928	2,627.89	40.1
2.1_N_1376	941	2,590.89	54.7
J-1	969	2,612.49	54.5
J-2	972	2,610.39	36.4
J-3	975	2,610.09	36.4
J-5	993	2,603.16	21.9
J-6	997	2,597.21	30.4
J-7	1003	2,561.47	61.7

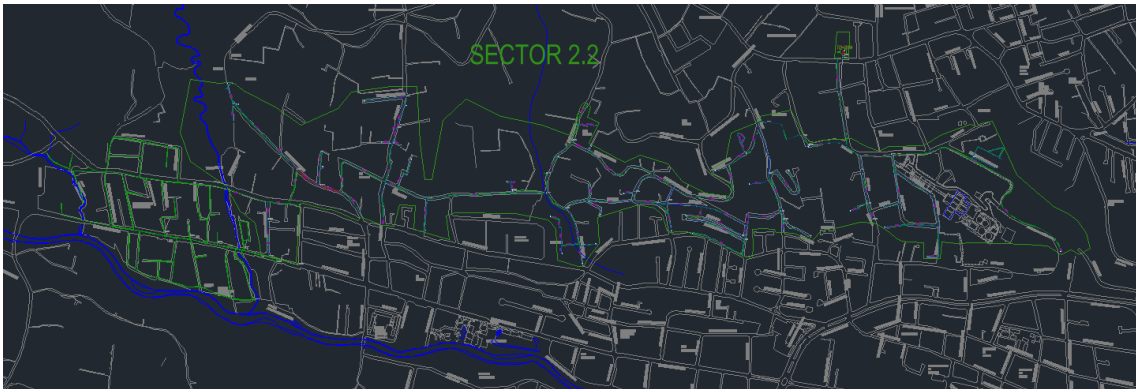
Fuente: Elaboración propia

Anexos 5: Configuración hidráulica final del Sector 2.1 mediante regulación con PRV y ajuste de diámetros



Fuente: Elaboración propia

Anexos 6: Planimetría y trazado de la red hidráulica actual sobre base catastral, Sector 2.2



Fuente: Elaboración propia

Anexos 7: Planimetría y trazado de la red hidráulica optimizada sobre base catastral, Sector 2.2



Fuente: Elaboración propia

Anexos 8: Tabla general de la red de distribución final, Sector 2.2

ID	Label	Lenght (m)	Diameter (mm)	Flow (L/s)	Velocity (m/s)	Headloss Gradient (m/km)
74	2.2_T_1001	85.08	63	0	0	0
77	2.2_T_1002	157.97	63	0	0	0
80	2.2_T_1003	0.98	110	2	0.18	0.305
83	2.2_T_1004	1.6	200	12	0.38	0.744
86	2.2_T_1005	2.47	160	1	0.04	0.121
89	2.2_T_1006	2.74	110	0	0	0
91	2.2_T_1007	2.93	63	0	0	0
94	2.2_T_1008	3.12	110	0	0	0
96	2.2_T_1009	3.35	110	0	0	0
99	2.2_T_1010	4.5	63	0	0.01	0
102	2.2_T_1011	4.79	63	1	0.28	1.679
105	2.2_T_1012	4.84	110	4	0.42	1.905
107	2.2_T_1013	5.75	63	0	0	0
110	2.2_T_1014	5.79	63	0	0.1	0.257
113	2.2_T_1015	5.95	63	0	0	0
116	2.2_T_1016	6.16	63	0	0	0
119	2.2_T_1017	6.41	63	0	0.02	0.046
122	2.2_T_1018	6.7	63	0	0.04	0.044
125	2.2_T_1019	6.74	110	0	0	0
127	2.2_T_1020	6.85	63	0	0.02	0
130	2.2_T_1021	7.11	63	1	0.2	0.922
133	2.2_T_1022	7.3	63	0	0.03	0
136	2.2_T_1023	7.41	110	0	0	0
138	2.2_T_1024	7.81	63	0	0	0
141	2.2_T_1025	7.83	63	0	0	0
144	2.2_T_1026	7.87	160	1	0.04	0.038
147	2.2_T_1027	8.07	63	0	0	0
150	2.2_T_1028	8.29	63	0	0	0
152	2.2_T_1029	8.66	63	0	0.01	0
155	2.2_T_1030	8.79	63	0	0.01	0
157	2.2_T_1031	9	63	0	0.01	0
160	2.2_T_1032	9.12	250	15	0.31	0.424
162	2.2_T_1033	9.63	63	0	0.02	0
165	2.2_T_1034	9.91	63	0	0	0
167	2.2_T_1035	10.18	63	0	0.14	0.468
170	2.2_T_1036	11.01	63	0	0	0
172	2.2_T_1037	11.01	63	0	0.09	0.189
175	2.2_T_1038	11.41	250	15	0.31	0.417
177	2.2_T_1039	11.51	63	0	0.03	0.026
179	2.2_T_1040	11.92	63	0	0.03	0.025
182	2.2_T_1041	12.13	300	26	0.37	0.466
185	2.2_T_1042	12.41	63	1	0.47	4.508
188	2.2_T_1043	12.89	63	0	0.04	0.046
191	2.2_T_1044	13.06	110	1	0.13	0.205
193	2.2_T_1045	13.61	110	0	0	0
196	2.2_T_1046	14.07	63	0	0.04	0.042
198	2.2_T_1047	14.28	63	2	0.48	4.753
201	2.2_T_1048	14.48	63	0	0.04	0.041
203	2.2_T_1049	15.13	110	2	0.26	0.787
206	2.2_T_1050	16.25	63	0	0	0
208	2.2_T_1051	17.06	160	1	0.04	0.017
210	2.2_T_1052	17.56	63	0	0	0
213	2.2_T_1053	19.64	63	1	0.21	1
216	2.2_T_1054	18.24	63	0	0.04	0.033
218	2.2_T_1055	18.28	63	0	0	0
221	2.2_T_1056	18.58	160	1	0.05	0.016
224	2.2_T_1057	20.75	63	0	0.01	0
226	2.2_T_1058	20.88	63	0	0	0
229	2.2_T_1059	22.42	160	1	0.05	0.027
231	2.2_T_1060	24.45	63	0	0	0
233	2.2_T_1061	24.52	110	6	0.65	4.236
236	2.2_T_1062	24.89	63	0	0.05	0.06
239	2.2_T_1063	25.23	160	1	0.03	0
241	2.2_T_1064	27.42	63	0	0.03	0.033
243	2.2_T_1065	27.37	63	1	0.18	0.772

244	2.2_T_1066	28.32	63	1	0.24	1.324
247	2.2_T_1067	29.42	160	0	0.02	0.01
248	2.2_T_1068	37.64	63	-1	0.41	3.463
250	2.2_T_1069	30.5	160	0	0.01	0
253	2.2_T_1070	31.31	110	0	0.04	0.019
256	2.2_T_1071	32.61	63	0	0.05	0.073
257	2.2_T_1072	32.82	110	4	0.4	1.741
260	2.2_T_1073	33.6	63	0	0.08	0.177
262	2.2_T_1074	33.62	63	2	0.58	6.586
265	2.2_T_1075	33.76	63	0	0.01	0.009
267	2.2_T_1076	34.68	110	4	0.42	1.914
269	2.2_T_1077	34.76	63	0	0.06	0.103
271	2.2_T_1078	35.01	63	0	0.06	0.111
272	2.2_T_1079	35.03	63	0	0.05	0.068
275	2.2_T_1080	35.39	160	0	0.01	0
276	2.2_T_1081	44.12	63	0	0.15	0.533
277	2.2_T_1082	35.54	160	0	0.01	0
280	2.2_T_1083	35.53	63	0	0.03	0.017
282	2.2_T_1084	36.07	63	0	0.05	0.083
284	2.2_T_1085	37.97	63	0	0.03	0.024
285	2.2_T_1086	38.2	63	0	0.03	0.031
287	2.2_T_1087	38.96	200	13	0.41	0.894
289	2.2_T_1088	40.01	63	0	0	0
291	2.2_T_1089	40.65	63	0	0.01	0.007
292	2.2_T_1090	85.77	63	0	0	0
294	2.2_T_1091	41.01	63	0	0	0
295	2.2_T_1092	42.44	63	0	0.04	0.042
298	2.2_T_1093	42.99	160	1	0.03	0.007
299	2.2_T_1094	43.16	63	1	0.24	1.345
300	2.2_T_1095	43.71	200	2	0.07	0.034
303	2.2_T_1096	44.9	250	0	0	0
306	2.2_T_1097	46.25	63	0	0.16	0.592
308	2.2_T_1098	46.6	63	0	0.06	0.109
311	2.2_T_1099	47.16	250	15	0.31	0.41
312	2.2_T_1100	65.99	63	0	0.06	0.108
313	2.2_T_1101	47	63	0	0.01	0.006
316	2.2_T_1102	47.03	63	0	0.04	0.044
318	2.2_T_1103	47.58	63	1	0.46	4.323
319	2.2_T_1104	52.74	50	0	0.05	0.107
321	2.2_T_1105	49.76	63	0	0	0
323	2.2_T_1106	50	63	0	0.03	0.024
325	2.2_T_1107	50.25	63	0	0	0
328	2.2_T_1108	50.71	110	3	0.28	0.898
331	2.2_T_1109	51.04	110	0	0.03	0.012
333	2.2_T_1110	53.11	63	0	0.07	0.151
335	2.2_T_1111	52.31	160	1	0.06	0.028
336	2.2_T_1112	53.05	63	0	0.1	0.241
338	2.2_T_1113	53.05	63	0	0.02	0.006
340	2.2_T_1114	53.18	63	0	0.02	0.011
341	2.2_T_1115	53.88	110	3	0.27	0.829
345	2.2_T_1116	54.71	63	1	0.23	1.197
346	2.2_T_1117	55.68	63	0	0.11	0.326
347	2.2_T_1118	55.7	160	1	0.05	0.027
348	2.2_T_1119	62.2	63	0	0.01	0.01
351	2.2_T_1120	56.56	250	15	0.3	0.395
353	2.2_T_1121	56.66	63	0	0.04	0.053
355	2.2_T_1122	56.92	63	1	0.23	1.156
357	2.2_T_1123	57.15	63	0	0.04	0.042
359	2.2_T_1124	57.42	250	16	0.32	0.435
360	2.2_T_1125	58.32	110	0	0.02	0.005
361	2.2_T_1126	58.09	63	0	0	0
363	2.2_T_1127	58.49	63	0	0.14	0.478
365	2.2_T_1128	59.19	110	3	0.35	1.348
366	2.2_T_1129	59.92	110	0	0.03	0.01
367	2.2_T_1130	202.62	63	0	0.07	0.138
369	2.2_T_1131	70.79	63	0	0.03	0.034
371	2.2_T_1132	62.9	250	15	0.3	0.402
372	2.2_T_1133	62.83	63	0	0.13	0.426
373	2.2_T_1134	62.89	63	0	0.04	0.043

374	2.2_T_1135	63	63	0	0.02	0.014
377	2.2_T_1136	63.17	63	0	0.02	0.009
379	2.2_T_1137	63.96	250	23	0.46	0.861
380	2.2_T_1138	64.13	63	0	0.01	0.005
382	2.2_T_1139	75.12	63	0	0.04	0.036
384	2.2_T_1140	67.18	63	0	0.03	0.027
385	2.2_T_1141	66.17	110	7	0.74	5.402
387	2.2_T_1142	66.51	160	0	0	0
389	2.2_T_1143	66.56	63	1	0.19	0.814
390	2.2_T_1144	68.44	160	1	0.03	0.009
392	2.2_T_1145	69.47	110	4	0.44	2.031
393	2.2_T_1146	68.69	110	0	0	0
395	2.2_T_1147	70.11	63	0	0.01	0.004
397	2.2_T_1148	71.97	63	1	0.43	3.788
399	2.2_T_1149	70.66	63	0	0	0
401	2.2_T_1150	71.45	63	0	0.02	0.017
404	2.2_T_1152	72.81	110	10	1	9.578
406	2.2_T_1153	74.24	250	22	0.45	0.846
408	2.2_T_1154	74.1	63	0	0.01	0.004
410	2.2_T_1155	74.29	63	1	0.33	2.304
411	2.2_T_1156	75.86	63	0	0.1	0.251
413	2.2_T_1158	77.37	63	0	0.12	0.335
414	2.2_T_1159	80.67	160	0	0.02	0.007
415	2.2_T_1160	86.64	110	8	0.89	7.699
417	2.2_T_1161	88.95	63	0	0.01	0.003
419	2.2_T_1162	87.19	63	1	0.2	0.942
420	2.2_T_1163	89.98	63	0	0.01	0.003
422	2.2_T_1164	90.85	63	1	0.28	1.779
423	2.2_T_1165	92.36	63	0	0.04	0.042
424	2.2_T_1166	93.51	63	0	0.08	0.162
425	2.2_T_1167	107.34	63	0	0.06	0.092
427	2.2_T_1168	102.77	63	0	0.07	0.136
429	2.2_T_1169	99.76	63	0	0.08	0.188
431	2.2_T_1170	119.61	63	0	0.12	0.358
433	2.2_T_1171	102.32	250	23	0.46	0.881
435	2.2_T_1172	99.25	200	13	0.42	0.927
437	2.2_T_1173	98.77	63	0	0.03	0.036
438	2.2_T_1174	105.66	63	-1	0.34	2.533
439	2.2_T_1175	101.07	63	1	0.18	0.745
441	2.2_T_1176	101.37	63	0	0.07	0.15
442	2.2_T_1177	129.62	63	0	0.02	0.011
445	2.2_T_1178	102.1	63	0	0.01	0.003
446	2.2_T_1179	102.97	160	2	0.08	0.061
447	2.2_T_1180	113.05	63	0	0.06	0.105
449	2.2_T_1181	106.38	110	1	0.13	0.204
452	2.2_T_1183	107.62	63	0	0	0
454	2.2_T_1184	109.88	200	15	0.47	1.151
456	2.2_T_1186	110.73	110	4	0.39	1.64
457	2.2_T_1187	141.22	63	1	0.18	0.727
458	2.2_T_1188	120.94	63	1	0.38	3.108
459	2.2_T_1189	132.2	63	0	0.01	0.007
461	2.2_T_1190	120.36	63	0	0.12	0.334
462	2.2_T_1191	123.76	63	1	0.36	2.725
463	2.2_T_1192	163.66	63	0	0.15	0.544
465	2.2_T_1193	129.23	250	24	0.48	0.944
466	2.2_T_1194	123.2	63	2	0.54	5.767
467	2.2_T_1195	123.32	63	0	0.09	0.196
468	2.2_T_1196	138.14	110	1	0.11	0.155
469	2.2_T_1197	132.2	63	0	0.12	0.371
471	2.2_T_1198	135.33	63	0	0.14	0.486
473	2.2_T_1199	137.27	63	2	0.61	7.251
474	2.2_T_1200	242.59	200	10	0.33	0.615
475	2.2_T_1201	148.26	63	1	0.48	4.608
476	2.2_T_1202	152.19	63	2	0.55	5.918
477	2.2_T_1203	152.79	63	0	0.12	0.355
478	2.2_T_1204	160.42	63	1	0.17	0.707
479	2.2_T_1205	158.86	63	0	0	0
480	2.2_T_1206	161.14	63	0	0.07	0.148
481	2.2_T_1207	217.03	63	1	0.17	0.713

484	2.2_T_1208	174.53	63	0	0.07	0.13
485	2.2_T_1209	169.45	110	1	0.16	0.311
486	2.2_T_1210	198.1	63	0	0.13	0.445
489	2.2_T_1212	188.62	110	5	0.54	3.003
490	2.2_T_1213	196.04	63	0	0.08	0.161
492	2.2_T_1214	247.6	250	16	0.32	0.444
494	2.2_T_1216	264.43	200	14	0.45	1.064
495	2.2_T_1217	271.82	63	0	0.11	0.286
496	2.2_T_1218	304.12	250	26	0.53	1.123
497	2.2_T_1219	473.68	110	0	0.03	0.011
500	2.2_T_1220	3.07	63	0	0.02	0
501	2.2_T_1221	1.84	63	0	0.03	0
502	2.2_T_1222	34.8	250	24	0.48	0.932
504	2.2_T_1223	54.17	110	2	0.21	0.517
505	2.2_T_1224	51.7	110	1	0.15	0.282
506	2.2_T_1225	51.98	63	0	0.05	0.074
507	2.2_T_1226	2.41	63	0	0.05	0.123
508	2.2_T_1227	151.65	250	24	0.48	0.932
509	2.2_T_1228	33.77	250	24	0.48	0.934
512	2.2_T_1229	8.2	300	1,116	15.78	487.851
524	2.2_T_1211(1)	280.82	250	22	0.46	0.855
525	2.2_T_1211(2)	6.86	250	22	0.46	0.868
528	2.2_T_1151(2)	63.03	63	0	0	0
531	2.2_T_1182(2)	102.46	63	0	0	0
533	2.2_T_1157(1)	77.08	110	6	0.67	4.464
534	2.2_T_1157(2)	4.86	110	6	0.67	4.467
539	2.2_T_1215(1)	229.63	63	0	0.04	0.054
540	2.2_T_1215(2)	4.33	63	0	0.04	0.069
542	2.2_T_1185(1)	102.72	110	8	0.79	6.207
543	2.2_T_1185(2)	7.97	110	8	0.79	6.202

Fuente: Elaboración propia

Anexos 9: Tabla de nodos optimizados, Sector 2.2

Label	ID	Elevation (m)	Pressure (m H2O)
2.2_N_1001	75	2,659.90	29.3
2.2_N_1002	76	2,659.90	29.3
2.2_N_1003	78	2,608.61	37.4
2.2_N_1004	79	2,608.56	37.5
2.2_N_1005	81	2,620.96	25.1
2.2_N_1006	82	2,620.91	25.2
2.2_N_1007	84	2,622.05	51.9
2.2_N_1008	85	2,622.04	51.9
2.2_N_1009	87	2,609.62	36.4
2.2_N_1010	88	2,609.60	36.4
2.2_N_1011	90	2,658.62	31
2.2_N_1012	92	2,614.45	48.2
2.2_N_1013	93	2,614.18	48.5
2.2_N_1014	95	2,617.47	28.9
2.2_N_1015	97	2,629.33	16.8
2.2_N_1016	98	2,628.98	17.1
2.2_N_1017	100	2,612.82	33.4
2.2_N_1018	101	2,612.85	33.4
2.2_N_1019	103	2,636.55	37.1
2.2_N_1020	104	2,636.86	36.8
2.2_N_1021	106	2,617.44	28.9
2.2_N_1022	108	2,601.53	44.5
2.2_N_1023	109	2,601.73	44.3
2.2_N_1024	111	2,602.00	53.5
2.2_N_1025	112	2,602.00	53.5
2.2_N_1026	114	2,645.80	26.6
2.2_N_1027	115	2,645.36	27
2.2_N_1028	117	2,663.83	25.7

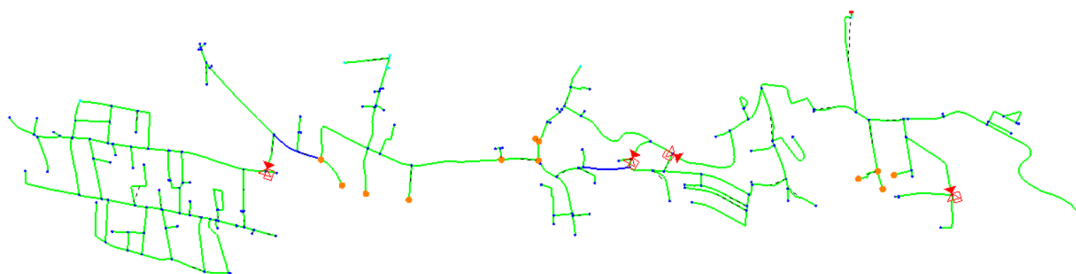
2.2_N_1029	118	2,664.37	25.1
2.2_N_1030	120	2,627.56	45.5
2.2_N_1031	121	2,626.85	46.2
2.2_N_1032	123	2,623.53	50.8
2.2_N_1033	124	2,624.16	50.2
2.2_N_1034	126	2,627.11	47.4
2.2_N_1035	128	2,641.92	30.5
2.2_N_1036	129	2,642.17	30.2
2.2_N_1037	131	2,642.34	31.2
2.2_N_1038	132	2,643.56	30
2.2_N_1039	134	2,607.67	38.6
2.2_N_1040	135	2,607.69	38.5
2.2_N_1041	137	2,606.73	39.3
2.2_N_1042	139	2,620.34	54.2
2.2_N_1043	140	2,621.02	53.5
2.2_N_1044	142	2,657.86	15.7
2.2_N_1045	143	2,657.05	16.5
2.2_N_1046	145	2,607.39	38.6
2.2_N_1047	146	2,607.71	38.3
2.2_N_1048	148	2,649.08	40.4
2.2_N_1049	149	2,648.00	41.5
2.2_N_1050	151	2,645.06	27.3
2.2_N_1051	153	2,660.13	29.4
2.2_N_1052	154	2,661.03	28.5
2.2_N_1053	156	2,644.88	28.7
2.2_N_1054	158	2,624.49	31.4
2.2_N_1055	159	2,626.26	29.6
2.2_N_1056	161	2,626.45	48.1
2.2_N_1057	163	2,654.02	19.5
2.2_N_1058	164	2,656.22	17.3
2.2_N_1059	166	2,612.20	50.5
2.2_N_1060	168	2,654.86	34.7
2.2_N_1061	169	2,655.71	33.8
2.2_N_1062	171	2,646.72	25.7
2.2_N_1063	173	2,605.37	40.6
2.2_N_1064	174	2,605.47	40.5
2.2_N_1065	176	2,630.79	43.8
2.2_N_1066	178	2,627.98	46.6
2.2_N_1067	180	2,620.83	25.3
2.2_N_1068	181	2,621.35	24.7
2.2_N_1069	184	2,689.00	1
2.2_N_1070	186	2,609.14	46.8
2.2_N_1071	187	2,606.72	49.2
2.2_N_1072	189	2,638.00	51.1
2.2_N_1073	190	2,639.16	50
2.2_N_1074	192	2,658.37	31.2
2.2_N_1075	194	2,612.92	61.6
2.2_N_1076	195	2,614.62	59.9
2.2_N_1077	197	2,643.10	30.5
2.2_N_1078	199	2,616.58	39.6
2.2_N_1079	200	2,618.23	38.1
2.2_N_1080	202	2,625.13	49.2
2.2_N_1081	204	2,618.47	27.7
2.2_N_1082	205	2,619.93	26.2
2.2_N_1083	207	2,646.88	25.5
2.2_N_1084	209	2,608.05	38
2.2_N_1085	211	2,640.31	34.3
2.2_N_1086	212	2,641.44	33.2
2.2_N_1087	214	2,612.14	34.1
2.2_N_1088	215	2,611.70	34.5
2.2_N_1089	217	2,642.96	29.4
2.2_N_1090	219	2,640.11	49.4
2.2_N_1091	220	2,635.29	54.2
2.2_N_1092	222	2,612.59	33.4
2.2_N_1093	223	2,612.46	33.6
2.2_N_1094	225	2,611.92	34.3
2.2_N_1095	227	2,621.23	24.9
2.2_N_1096	228	2,621.90	24.2
2.2_N_1097	230	2,606.20	39.8

2.2_N_1098	232	2,606.21	39.8
2.2_N_1099	234	2,622.71	34.6
2.2_N_1100	235	2,627.21	30.2
2.2_N_1101	237	2,606.27	49.2
2.2_N_1102	238	2,605.51	50
2.2_N_1103	240	2,608.24	37.8
2.2_N_1104	242	2,639.79	33.8
2.2_N_1105	245	2,615.00	40.6
2.2_N_1106	246	2,612.40	43.2
2.2_N_1107	249	2,619.40	36.6
2.2_N_1108	251	2,608.52	37.5
2.2_N_1109	252	2,609.00	37
2.2_N_1110	254	2,610.05	37.2
2.2_N_1111	255	2,611.34	36
2.2_N_1112	258	2,615.73	41.4
2.2_N_1113	259	2,619.62	37.5
2.2_N_1114	261	2,619.00	55.3
2.2_N_1115	263	2,633.32	23.6
2.2_N_1116	264	2,621.88	34.8
2.2_N_1117	266	2,617.02	29.1
2.2_N_1118	268	2,615.99	30.4
2.2_N_1119	270	2,654.06	35.1
2.2_N_1120	273	2,604.88	41.1
2.2_N_1121	274	2,605.61	40.4
2.2_N_1122	278	2,610.67	35.4
2.2_N_1123	279	2,610.21	35.8
2.2_N_1124	281	2,609.31	46.2
2.2_N_1125	283	2,640.45	33.2
2.2_N_1126	286	2,630.21	27.2
2.2_N_1127	288	2,625.31	48.7
2.2_N_1128	290	2,609.85	36.2
2.2_N_1129	293	2,654.18	35.3
2.2_N_1130	296	2,604.70	41.3
2.2_N_1131	297	2,605.29	40.7
2.2_N_1132	301	2,660.24	29.3
2.2_N_1133	302	2,657.51	32.1
2.2_N_1134	304	2,661.01	28.1
2.2_N_1135	305	2,657.88	31.2
2.2_N_1136	307	2,634.30	38.7
2.2_N_1137	309	2,605.37	40.6
2.2_N_1138	310	2,606.50	39.5
2.2_N_1139	314	2,624.38	21.7
2.2_N_1140	315	2,621.55	24.6
2.2_N_1141	317	2,607.66	38.3
2.2_N_1142	320	2,617.23	39.4
2.2_N_1143	322	2,624.78	21.3
2.2_N_1144	324	2,603.22	52.3
2.2_N_1145	326	2,617.28	28.8
2.2_N_1146	327	2,615.90	30.2
2.2_N_1147	329	2,618.00	28.2
2.2_N_1148	330	2,618.45	27.7
2.2_N_1149	332	2,624.73	21.4
2.2_N_1150	334	2,626.89	29.4
2.2_N_1151	337	2,655.19	34.4
2.2_N_1152	339	2,627.21	62.3
2.2_N_1153	343	2,622.66	66.8
2.2_N_1154	344	2,621.91	67.5
2.2_N_1155	349	2,639.91	34.7
2.2_N_1156	350	2,649.93	24.7
2.2_N_1157	352	2,609.75	64.7
2.2_N_1158	354	2,611.90	34.1
2.2_N_1159	356	2,620.80	52.3
2.2_N_1160	358	2,602.13	53.4
2.2_N_1161	362	2,634.19	40.6
2.2_N_1162	364	2,621.71	24.4
2.2_N_1163	368	2,648.07	41
2.2_N_1164	370	2,626.04	63.4
2.2_N_1165	375	2,620.32	25.8
2.2_N_1166	376	2,623.32	22.8

2.2_N_1167	378	2,615.89	30.3
2.2_N_1168	381	2,637.38	35
2.2_N_1169	383	2,612.29	43.9
2.2_N_1170	386	2,612.80	34.1
2.2_N_1171	388	2,603.40	42.6
2.2_N_1172	391	2,613.96	32.1
2.2_N_1173	394	2,657.98	16.6
2.2_N_1174	396	2,643.53	45.6
2.2_N_1175	398	2,605.87	50.1
2.2_N_1176	400	2,606.36	39.6
2.2_N_1177	402	2,600.86	45.1
2.2_N_1178	405	2,617.80	56
2.2_N_1179	407	2,630.56	44.1
2.2_N_1180	409	2,646.80	42.7
2.2_N_1181	416	2,625.25	47.2
2.2_N_1182	418	2,625.24	20.9
2.2_N_1183	421	2,603.24	42.7
2.2_N_1184	426	2,638.09	35.9
2.2_N_1185	428	2,608.47	47.1
2.2_N_1186	430	2,609.66	64.1
2.2_N_1187	432	2,607.34	48.1
2.2_N_1188	434	2,656.00	33.3
2.2_N_1189	436	2,628.18	45.9
2.2_N_1190	440	2,612.45	61.5
2.2_N_1191	443	2,642.49	20.2
2.2_N_1192	444	2,608.70	54
2.2_N_1193	448	2,606.27	50.8
2.2_N_1194	453	2,615.32	30.8
2.2_N_1195	460	2,612.51	33.5
2.2_N_1196	464	2,616.48	29.5
2.2_N_1197	470	2,655.87	17.6
2.2_N_1198	472	2,609.05	64.8
2.2_N_1199	482	2,606.59	49.2
2.2_N_1200	487	2,618.04	27.9
2.2_N_1201	491	2,616.33	39.6
2.2_N_1202	498	2,619.52	69.9
J-1	526	2,609.18	46.7
J-2	529	2,627.63	28

Fuente: Elaboración propia

Anexos 10: Configuración hidráulica final del Sector 2.2 mediante regulación con PRV y ajuste de diámetros



Fuente: Elaboración propia

Anexos 11: Resumen consolidado de los 41 tramos de tubería intervenidos en la propuesta final

Identificador	Sector	Long. (m)	Ø original (mm)	Ø final (mm)	Observación
2.1_T_1018	2.1	3.10	110	160	—
2.1_T_1033	2.1	5.06	110	160	—
2.1_T_1038	2.1	6.09	110	160	—
2.1_T_1041	2.1	6.52	110	160	—
2.1_T_1054	2.1	8.24	110	160	—
2.1_T_1058	2.1	8.73	110	160	—
2.1_T_1074	2.1	12.38	110	160	—
2.1_T_1091	2.1	20.91	63	110	—
2.1_T_1098	2.1	22.36	63	110	—
2.1_T_1102	2.1	22.82	63	110	—
2.1_T_1104	2.1	24.75	110	160	—
2.1_T_1121	2.1	30.11	110	160	—
2.1_T_1144	2.1	34.93	63	110	—
2.1_T_1159	2.1	38.67	110	200	—
2.1_T_1207	2.1	50.24	63	110	—
2.1_T_1224	2.1	54.81	63	110	—
2.1_T_1231	2.1	56.18	63	110	—
2.1_T_1244	2.1	60.07	110	160	—
2.1_T_1256	2.1	66.68	63	110	—
2.1_T_1273	2.1	68.09	63	110	—
2.1_T_1282	2.1	69.23	63	160	—
2.1_T_1305	2.1	77.98	63	110	—
2.1_T_1315	2.1	81.15	110	160	—
2.1_T_1318	2.1	87.56	63	110	—
2.1_T_1320	2.1	85.63	63	100	—
2.1_T_1350	2.1	96.69	50	63	—
2.1_T_1355	2.1	101.80	63	110	—
2.1_T_1357	2.1	105.41	110	160	—
2.1_T_1374	2.1	123.51	63	110	—
2.1_T_1381	2.1	125.77	63	110	—
2.1_T_1382	2.1	127.24	110	160	—
2.1_T_1387	2.1	132.68	63	110	—
2.1_T_1394	2.1	163.21	63	110	—
2.1_T_1396	2.1	203.38	110	160	—
2.1_T_1400	2.1	186.89	63	100	—
2.1_T_1408	2.1	229.82	110	160	—
2.1_T_1409	2.1	214.87	110	160	—
2.1_T_1418	2.1	357.97	63	110	—
2.1_T_1424	2.1	466.67	63	100	—
2.2_T_1152	2.2	72.81	63	110	—
2.2_T_1160	2.2	86.64	63	100	—
2.1_T_1154	2.1	37.54	63	100	Refinamiento posterior
2.1_T_1225	2.1	55.37	100	110	Refinamiento posterior
2.1_T_1238	2.1	57.67	63	100	Refinamiento posterior
P-9	2.1	24.68	110	160	Refinamiento posterior
TOTAL		3972.91	—	—	—

Fuente: Elaboración propia

Anexos 12: Configuración de las catorce válvulas reductoras de presión propuestas

Etiqueta	Sector	Elev. (m.s.n.m.)	Ø (mm)	Consigna (m.c.a.)	Q (L/s)	LP entrada (m)	LP salida (m)	ΔH (m)	Estado
VRP-1	2.1	2663.98	152.4	20	74	2687.77	2684.03	3.74	Activa
PRV-1	2.1	2647.32	152.4	21	21	2683.28	2668.37	14.91	Activa
PRV-2	2.1	2633.21	152.4	30	52	2679.95	2663.28	16.67	Activa
PRV-3	2.1	2613.24	152.4	35	8	2664.42	2648.32	16.09	Activa
PRV-4	2.1	2612.83	152.4	30	13	2662.10	2642.90	19.20	Activa
PRV-6	2.1	2593.25	152.4	25	9	2641.61	2618.31	23.30	Activa
PRV-7	2.1	2605.08	152.4	20	20	2659.27	2625.12	34.15	Activa
PRV-8	2.1	2574.92	152.4	20	5	2622.66	2594.97	27.69	Activa
PRV-9	2.1	2597.63	152.4	30	4	2663.13	2627.70	35.43	Activa
VRP-2	2.1	2599.73	152.4	—	0	—	—	—	Cerrada
PRV-1	2.2	2634.76	152.4	40	22	2688.94	2674.85	14.09	Activa
PRV-2	2.2	2627.41	152.4	30	6	2674.44	2657.48	16.96	Activa
PRV-3	2.2	2642.72	152.4	20	0	2689.62	2662.77	26.85	Activa
PRV-4	2.2	2612.34	152.4	35	8	2671.89	2647.42	24.46	Activa

Fuente: Elaboración propia.

Anexos 13: Verificación de cavitación de las catorce válvulas reductoras de presión

PRV	Sector	P ₁ (m.c.a.)	P ₂ (m.c.a.)	ΔH (m)	R = P ₁ /P ₂	σ	Diagnóstico
VRP-1	2.1	23.79	20.05	3.74	1.19	4.39	Sin riesgo
PRV-1	2.1	35.96	21.05	14.91	1.71	1.30	Sin riesgo
PRV-2	2.1	46.74	30.07	16.67	1.55	1.74	Sin riesgo
PRV-3	2.1	51.18	35.08	16.09	1.46	2.13	Sin riesgo
PRV-4	2.1	49.27	30.07	19.20	1.64	1.55	Sin riesgo
PRV-6	2.1	48.36	25.06	23.30	1.93	1.07	Sin riesgo
PRV-7	2.1	54.19	20.04	34.15	2.70	0.58	Sin riesgo
PRV-8	2.1	47.74	20.05	27.69	2.38	0.71	Sin riesgo
PRV-9	2.1	65.50	30.07	35.43	2.18	0.84	Sin riesgo
PRV-1	2.2	54.18	40.09	14.09	1.35	2.84	Sin riesgo
PRV-2	2.2	47.03	30.07	16.96	1.56	1.77	Sin riesgo
PRV-3	2.2	46.90	20.05	26.85	2.34	0.74	Sin riesgo
PRV-4	2.2	59.55	35.09	24.46	1.70	1.43	Sin riesgo

Fuente: Elaboración propia.

Anexos 14: Detalle de los cinco tramos refinados en el Sector 2.1

Identificador	Posición topológica	hf antes (m/km)	hf después (m/km)	Reducción (%)
2.1_T_1154	Conexión secundaria sobre Calle Antonio Neumane	13.04	1.38	89.4
2.1_T_1159	Arteria principal Av. Yaupi (tramo 38,67 m)	12.19	4.11	66.3
2.1_T_1225	Tramo de transición entre subdistritos de PRV	13.74	9.84	28.4
2.1_T_1238	Conexión sobre Calle Cumaná	12.03	2.20	81.7
P-9	Tramo aguas abajo de la PRV-7	12.03	2.16	82.0

Fuente: Elaboración propia.