

UNIVERSIDAD DEL AZUAY

ESCUELA DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN HIDROSANITARIA

Modelación hidráulica para la detección de fugas en redes de distribución de agua potable del sector Cruz Verde 2.

TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN HIDROSANITARIA

Autor:

Ing. Jenny Maribel Zhagüi Chunchi

Directora:

Ing. Gladys Verónica Chumi Buenaño, Mgtr.

CUENCA – ECUADOR

Año 2026

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por brindarme la fortaleza y la sabiduría necesarias para alcanzar esta meta.

A mi esposo e hijas quienes son la mayor inspiración de mi vida y la razón que me impulsa a superarme cada día.

A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y confianza durante todo este proceso académico.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad del Azuay y a sus docentes por los conocimientos y experiencias compartidos durante este proceso de formación.

A mi directora de tesis, por su orientación, apoyo y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo de titulación.

Finalmente, agradezco a mi familia por su paciencia, comprensión y apoyo constante, fundamentales para culminar esta etapa de mi formación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA 1
AGRADECIMIENTO 2
ÍNDICE DE CONTENIDO 3
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES 5
ÍNDICE DE TABLAS 7
RESUMEN 8
ABSTRACT 9
CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE 10
1.1 Introducción 10
1.2 Justificación 10
1.3 Objetivos 11
1.3.1 Objetivo General 11
1.3.2 Objetivos específicos 11
1.4 Definiciones y ecuaciones generales del flujo a presión 11
1.4.1 Principio de Conservación de la masa (Ecuación de continuidad) 12
1.4.2 Principio de la conservación de la energía 13
1.4.3 Línea de gradiente hidráulico (LGH) y línea de energía (LE) 14
1.4.4 Pérdidas de Energía 16
1.4.5 Período de diseño del proyecto 19
1.4.6 Población 20
1.4.7 Análisis del consumo percápita 21
1.4.8 Variaciones de consumo 22
Caudal máximo horario 23
1.5 Sistema de distribución de agua 23
1.6 Fugas y agua no contabilizada (ANC) 24
1.6.1 Componentes del Agua No Contabilizada 24
1.7 Metodologías de detección de fugas mediante modelación hidráulica 24
1.7.1 Software de simulación hidráulica WaterGEMS 25
1.7.2 Construcción del modelo topológico 25
1.7.3 Calibración del modelo hidráulico 25
1.7.4 Error medio cuadrático (RMSE) 26
1.7.5 Análisis de sensibilidad 26
1.8 Análisis de información disponible de la zona de estudio 27

1.8.1 Ubicación geográfica 27
1.8.2 Infraestructura hidráulica existente 28
1.8.3 Población actual 30
1.8.4 Asignación de demandas actuales de la red 32
CAPITULO 2: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DE LA RED DE AGUA POTABLE 34
2.1 Metodología de trabajo 34
2.2 Asignación de demandas 35
2.3 Georreferenciación de datos de presión medidos en campo 36
2.4 Vinculación de puntos de control de presión 44
2.5 Modelo hidráulico en período extendido 45
2.6 Definición del patrón de consumo horario (Curva de demanda) 45
2.7 Calibración del modelo hidráulico en período extendido 48
2.7.1 Resultados de la simulación 1 50
2.7.2 Escenario 2 de calibración 52
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS, IDENTIFICACIÓN DE FUGAS EN LA RED DE AGUA POTABLE 59
3.1 Análisis de la calibración del modelo hidráulico 59
CAPITULO 4: PROPUESTA DE MEJORA DEL MODELO DE LA RED DE AGUA POTABLE DEL SECTOR CRUZ VERDE 2. 62
4.1 Objetivo de la propuesta 62
4.2 Priorización de sectores para la detección de fugas 62
4.3 Estrategias de mejora 63
4.3.1 Priorización de campañas de detección de fugas 63
4.3.2 Fortalecimiento del mantenimiento preventivo de válvulas 63
4.3.3 Monitoreo permanente de presiones y actualización del modelo hidráulico . 63
4.4.4 Renovación progresiva de la infraestructura hidráulica 64
CONCLUSIONES 65
RECOMENDACIONES 66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 67
ANEXOS 69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Principio de conservación de la masa flujo unidimensional. 12
Ilustración 2. Ecuación de Bernoulli. 14
Ilustración 3. Línea de gradiente hidráulica (LGH) y Línea de Energía (LE) para la descarga libre de un depósito por un tubo horizontal con difusor. 15
Ilustración 4. Ubicación de la zona de estudio. 28
Ilustración 5. Disposición de la red de distribución de agua, Sector Cruz Verde 2. 29
Ilustración 6. Demanda de caudal total, sector Cruz Verde 2.Ilustración 36
Ilustración 7. Puntos de presión medidos en campo. 37
Ilustración 8. Toma de la presión, subsector 1, Hora: 12:00. 38
Ilustración 9. Toma de la presión, subsector 2, Hora: 15:00. 38
Ilustración 10. Toma de la presión, subsector 3, hora: 06:00. 38
Ilustración 11. Toma de la presión, subsector 3a, hora: 15:00 39
Ilustración 12. Toma de la presión, subsector 4, hora: 15:00. 39
Ilustración 13. Toma de la presión, subsector 5, hora: 06:00. 40
Ilustración 14. Toma de la presión, subsector 6, Hora: 12:00. 40
Ilustración 15. Toma de la presión, subsector 7, Hora: 06:00. 41
Ilustración 16. Toma de la presión, subsector 8, Hora: 15:00. 41
Ilustración 17. Toma de la presión, subsector 9, Hora: 06:00. 42
Ilustración 18. Toma de la presión, subsector 10, Hora: 15:00. 42
Ilustración 19. Toma de la presión, subsector 11, Hora: 06:00. 43
Ilustración 20. Toma de la presión, subsector 12, hora: 12:00. 43
Ilustración 21. Toma de la presión, subsector 13, Hora: 15:00. 44
Ilustración 22.Toma de la presión, subsector 14, Hora: 06:00. 44
Ilustración 23. Patrón de consumo horario para un día de la reserva, sector 3.2 Cebollar. 46
Ilustración 24. Ingreso del patrón de consumo en el software WaterGEMS 47
Ilustración 25. Asignación del patrón dinámico a cada nodo. 48
Ilustración 26. Grupos de rugosidad, caracterización según el tipo de material. 49
Ilustración 27. Rugosidades iniciales y finales, solución 1. 50

Ilustración 28. Resultados de cargas hidráulicas observadas y simuladas, ajuste del coeficiente de rugosidad - Simulación 1..... 51
Ilustración 29. Representación de pérdida de carga por apertura parcial. 54
Ilustración 30. Resultados de cargas hidráulicas observadas y simuladas, ajuste del coeficiente de rugosidad - Simulación 2..... 55
Ilustración 31. Cargas observadas y simuladas y su correlación obtenida en la simulación 2..... 56
Ilustración 32. Factor de reducción del coeficiente de rugosidad, solución 2. 56
Ilustración 33. Resultados de la validación. Simulación 3. 57
Ilustración 34. Cargas observadas y simuladas y su correlación obtenida en la validación. 58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de Chow para la fórmula de Hazen - Williams. 18
Tabla 2. Coeficiente de pérdida por accesorio, condiciones ideales. 19
Tabla 3. Vida útil sugerida para diferentes componentes de un sistema de agua potable 20
Tabla 4. Dotaciones recomendadas, según la población. 22
Tabla 5. Características físicas del sector de distribución Cruz Verde 2..... 29
Tabla 6. Longitud de la tubería del sistema de distribución, Cruz Verde 2. 30
Tabla 7. Población censal al año 2022, método de densidad poblacional. 31
Tabla 8. Proyección de la población al año 2025. 31
Tabla 9. Población actual, mediante método de densidad por conexión. 32
Tabla 10. Volumen total consumido por el sector Cruz Verde 2. 32
Tabla 11. Porcentaje de fugas para el sistema Tomebamba, período marzo 2025. 35

RESUMEN

El sector Cruz Verde 2, perteneciente al sistema de abastecimiento Tomebamba de la ciudad de Cuenca, en los últimos años ha identificado problemas en la red de distribución de agua potable, entre ellos, una disminución considerable en la presión, a ello se suman numerables reportes de la ciudadanía de la baja continuidad del servicio, lo que podría estar relacionado a fugas no identificadas dentro del sistema.

En el presente proyecto se calibra y valida un modelo hidráulico de la red de agua potable del sector Cruz Verde 2, utilizando el software WaterGEMS, con la finalidad de identificar posibles fugas que disminuyen la eficiencia del sistema de agua. Mediante el análisis de históricos e indicadores de funcionamiento, calibración del modelo hidráulico y el análisis de diferentes escenarios, se ubican zonas críticas de la red de agua potable y se proponen medidas que mitiguen el impacto.

Palabras clave: red de distribución de agua, fugas, presión, calibrar, validar, modelo hidráulico, software WaterGEMS.

ABSTRACT

The Cruz Verde 2 sector, part of the Tomebamba supply system in the city of Cuenca, has identified several issues in its drinking water distribution network in recent years. These include a significant drop in pressure, alongside numerous citizen reports regarding low service continuity, which could be linked to unidentified leaks within the system.

In this project, a hydraulic model of the Cruz Verde 2 drinking water network is calibrated and validated using WaterGEMS software, with the aim of identifying potential leaks that reduce the system's efficiency. Through the analysis of historical data and performance indicators, hydraulic model calibration, and the evaluation of different scenarios, critical zones within the network are located, and mitigation measures are proposed.

Keywords: water distribution network, leaks, pressure, calibrate, validate, hydraulic model, WaterGEMS software.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
GLADYS VERONICA
CHUMI BUENANO

CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1.1 Introducción

El agua como recurso fundamental

"El agua es un recurso fundamental para el desarrollo de la industria y la gestión doméstica, existen diversos factores, como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico y la urbanización, que ejercen presión tanto sobre los recursos hídricos como sobre la infraestructura destinada al suministro de agua potable" (Rueda Meza et al., 2025).

De manera general la demanda de agua se está incrementando y las fuentes de donde provienen están disminuyendo, el agua es ya un recurso en escasez y pese a que el 70% del planeta está cubierto de agua, apenas el 2.5% de la misma es agua potable, y de ésta menos del 1% es destinada para consumo humano, según (UNESCO, 2003).

Gestión de los sistemas de abastecimiento

El manejo y gestión de los sistemas de abastecimiento de agua potable han sido difíciles en todo su desarrollo histórico, y uno de los principales problemas en la actualidad es la gran cantidad de información desagregada referente a la infraestructura instalada. Una gestión moderna de este tipo de sistemas requiere cada vez más el uso de recursos tecnológicos y el adecuado manejo de datos, en esta línea tecnológica, es más común el uso de software especializado para el modelado hidráulico de redes de agua potable, que permite analizar y diseñar sistemas de distribución de agua, ingresando diferentes tipos de datos y combinándolos de manera que permita obtener una simulación bastante precisa del comportamiento del sistema real que se está analizando (González-Ramírez & Bejarano-Salazar, 2019).

1.2 Justificación

Las fugas o también denominadas pérdidas de agua en un sistema de agua potable representan la cantidad de agua que se pierde entre el proceso de producción, proceso de distribución, facturación al cliente y recaudación, generando impactos económicos y

operativos significativos en los sistemas de abastecimiento. Las fugas de agua no tratadas por la falta de un diagnóstico técnico preciso, pueden provocar, entre otros, el desabastecimiento de un sector de distribución, el deterioro de la infraestructura y que ésta no alcance a cubrir su vida útil.

En el caso particular en la red de agua potable del sector Cruz Verde 2, en la ciudad de Cuenca, en los últimos años se ha identificado una disminución considerable en la presión, a ello se suman numerables reportes de la ciudadanía de la baja continuidad del servicio, lo que podría estar relacionado a fugas no identificadas dentro del sistema.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Calibrar y validar un modelo hidráulico de la red de agua potable del sector Cruz Verde 2, utilizando WaterGEMS, con el fin de detectar posibles fugas mediante la comparación entre datos reales y simulados**.**

1.3.2 Objetivos específicos

- Recopilar la información necesaria del estado actual e indicadores de funcionamiento, como catastros, índice de consumos entre otros de la red de agua potable del sector Cruz Verde 2.
- Validar y calibrar el modelo hidráulico existente de la red de agua potable utilizando el software WaterGEMS,
- Evaluar el modelo hidráulico desarrollado, con la finalidad de detectar posibles fugas mediante el análisis de datos simulados.
- Proponer medidas correctivas para la mejora del sistema de agua potable del sector Cruz Verde 2.

1.4 Definiciones y ecuaciones generales del flujo a presión

El análisis del comportamiento hidráulico en redes de distribución de agua potable se fundamenta en los principios de la mecánica de fluidos, los cuales permiten describir el movimiento del agua a través de un sistema de tuberías mediante modelos matemáticos.

Según **(Mays, 2010),** estas leyes se conocen como ecuaciones gobernantes debido a que rigen las variables de presión y caudal en cada punto de la red.

1.4.1 Principio de Conservación de la masa (Ecuación de continuidad)

La ley de la conservación de la masa establece que el flujo de la masa que entra en un volumen de control debe ser igual al flujo de masa que sale, más cualquier acumulación dentro del mismo. En redes de distribución de agua potable, donde se asume que el fluido es incompresible, la ecuación se simplifica a la continuidad del caudal volumétrico.

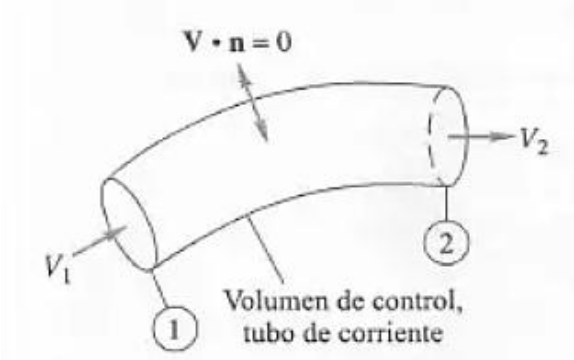


Ilustración 1. Principio de conservación de la masa flujo unidimensional.
Fuente: (White, 2008).

La ecuación de conservación de la masa para el flujo estacionario por el interior de un tubo de corriente (flujo paralelo a las paredes en todos los puntos) con una entrada unidimensional en 1 y una salida unidimensional en 2, Ilustración 1 según (White, 2008) se expresa de la siguiente manera:

$$m = \rho_1 * A_1 * v_1 = \rho_2 * A_2 * v_2 = constante$$

Dónde:

m: Masa del flujo

ρ: Densidad del fluido.

A: Área de la sección transversal de la tubería (m^2).

v: Velocidad media del fluido en la sección (m/s).

De manera que, en el flujo estacionario en un tubo de corriente, el gasto másico (Q) es constante a través de cualquier sección de dicho tubo y la velocidad aumenta cuando disminuye la sección. Si la densidad es constante, entonces se tiene:

$$Q = A_1 * v_1 = A_2 * v_2 = constante \qquad \text{ó} \qquad V_2 = \frac{A_1}{A_2} * v_1$$

(Azevedo Netto et al., 1998), en su clásico Manual de hidráulica, señalan que, para cualquier nudo de una red de distribución, el caudal entrante debe equilibrarse exactamente con el caudal saliente más el consumo demandado en dicho punto.

1.4.2 Principio de la conservación de la energía

La fundamentación teórica de la energía en hidráulica se basa en la Primera Ley de la Termodinámica aplicada a un volumen de control. A acuerdo con (White, 2008), la conservación de la energía establece que la tasa de transferencia de calor y trabajo debe equilibrarse con el cambio de la energía total del fluido.

La Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli representa una forma simplificada de la conservación de la energía mecánica, estableciendo una relación fundamental entre la presión, la velocidad y la elevación en regiones de flujo estacionario e incompresible. Su aplicabilidad está limitada a las denominadas “regiones no viscosas” del flujo, donde los efectos de la inercia, la gravedad y la presión predominan sobre las fuerzas de fricción netas. Dado que la viscosidad es una propiedad intrínseca de todos los fluidos reales, esta ecuación debe emplearse con cautela, reconociendo que pierde validez en zonas de alta disipación de energía, donde las fuerzas viscosas o de fricción netas son despreciablemente pequeñas en comparación con las otras fuerzas que actúan sobre las partículas del fluido (Çengel & Cimbala, 2012).

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = constante\ (a\ lo\ largo\ de\ una\ línea)$$

La ecuación puede también escribirse entre dos puntos cualesquiera sobre la misma línea de corriente de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{{v_1}^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{{v_2}^2}{2} + gz_2$$

La ecuación de Bernoulli puede concebirse como una expresión del balance de energía mecánica y se puede enunciar de la siguiente manera:

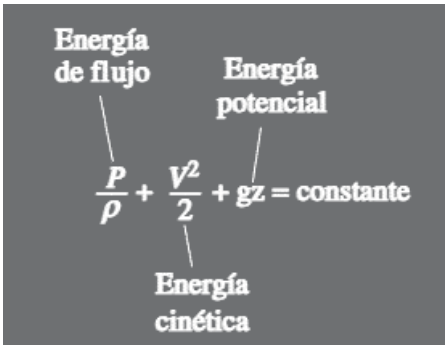


Ilustración 2. Ecuación de Bernoulli.

Fuente: (Çengel & Cimbala, 2012).

La suma de la energía cinética, la energía potencial y la energía del flujo de una partícula es constante a lo largo de una línea de corriente en el transcurso del flujo estacionario, cuando los efectos de la compresibilidad y de la fricción son despreciables.

1.4.3 Línea de gradiente hidráulico (LGH) y línea de energía (LE)

A menudo es conveniente representar de forma gráfica el nivel de la energía mecánica, usando alturas, con la finalidad de facilitar la visualización de los diversos términos de la ecuación de Bernoulli. Esto sucede cuando se divide cada término para la gravedad, obteniendo:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = H = constante$$

Siendo:

$P/\rho g$: Carga de presión que representa la altura de una columna de fluido que produce la presión estática P.

$v^2/2g$: Carga de velocidad que representa la elevación necesaria para que un fluido alcance la velocidad V durante una caída libre sin fricción.

z: Carga de elevación que representa la energía potencial del fluido.

H: Es la carga total para el flujo.

De manera que en términos de carga la ecuación de Bernoulli, se puede expresar como la suma de las cargas de presión, velocidad y de elevación a lo largo de una línea de corriente que es constante en el transcurso del flujo estacionario, cuando los efectos de la compresibilidad y de la fricción son despreciables.

La caracterización energética de un fluido se define mediante dos niveles de referencia que representan la carga (energía por unidad de peso) presente en el sistema:

Línea de Gradiente Hidráulico (LGH)

Es la representación gráfica de la energía potencial del flujo, se define como la suma de la carga de elevación y la carga de presión, representa el nivel al que subirá el líquido en un piezómetro. En la salida de una tubería a la atmósfera, la LGH coincide con el centro de la sección puesto que la presión manométrica es cero, (Çengel & Cimbala, 2012).

Línea de Energía (LE)

Es la representación de la energía total del sistema. Se obtiene sumando la carga de velocidad Línea de Gradiente Hidráulico, Ilustración 3.

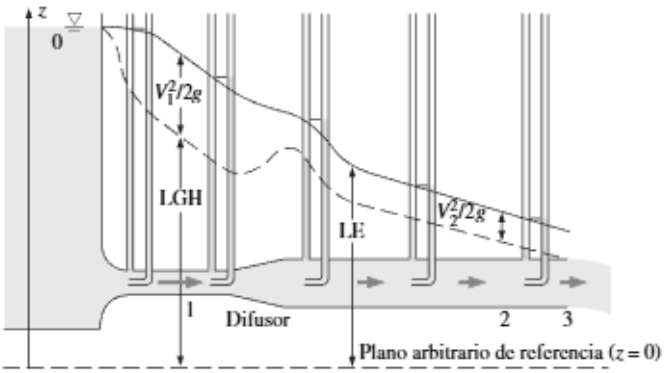


Ilustración 3. Línea de gradiente hidráulica (LGH) y Línea de Energía (LE) para la descarga libre de un depósito por un tubo horizontal con difusor.
Fuente: (Çengel & Cimbala, 2012).

La transición del modelo ideal de Bernoulli hacia sistemas hidráulicos reales se formaliza mediante la Ecuación General de la Energía, la cual expande el principio de conservación original al contabilizar las transferencias de energía entre el fluido y dispositivos mecánicos, así como la disipación de carga por fricción. Según (Mott & Untener, 2015),

esta formulación permite integrar la energía añadida por bombas (hA), la removida por motores de fluido o turbinas (hR) y las pérdidas de energía por fricción y accesorios (hL). Gráficamente, este fenómeno se traduce en una pendiente descendente en la Línea de Energía (EGL), donde la caída vertical acumulada entre dos puntos de interés representa cuantitativamente la pérdida de carga del sistema, obteniendo finalmente la ecuación general de la conservación de la energía.

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{{v_1}^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = z_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{{v_2}^2}{2g}$$

1.4.4 Pérdidas de Energía

El término hL en la ecuación general de la conservación de la energía representa la energía disipada por la fricción entre el agua y las paredes de la tubería. Según (Chaudhry, 2014)indica que la precisión de un modelo hidráulico depende directamente de la selección de la ecuación de resistencia.

1.4.4.1 Ecuación de Darcy para la pérdida de energía

Para el caso del flujo en tuberías y tubos, la fricción es proporcional a la carga de velocidad del flujo y a la relación de la longitud sobre el diámetro de la corriente del flujo**.**

$$h_L = f * \frac{L}{D} + \frac{v^2}{2g}$$

Dónde:

h_L: Pérdida de energía debida a la fricción (N*m/N, m, lb-ft/lb o ft)

L= Longitud de la corriente de flujo (m o ft).

D = Diámetro de la tubería (m o ft)

v= velocidad de flujo promedio (m/s o ft/s)

f = Factor de fricción (adimensional)

La ecuación de Darcy es aplicable a cualquier flujo newtoniano y se puede emplear para el cálculo de la pérdida de la energía debida a la fricción en las secciones rectas y largas

de la tubería redonda, para flujo laminar como para flujo turbulento, cuya diferencia está en la definición del factor de fricción adimensional (f), (Mott & Untener, 2015).

Factor de fricción para flujo laminar

Para valores por debajo de 2000 f se puede calcular a partir de la ecuación:

$$f = \frac{64}{N_R}$$

Factor de fricción para flujo turbulento

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{1}{3.7\,(D/\varepsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}}\right)\right]^2}$$

La ecuación descrita produce valores para f que están dentro de +- 1.0 por ciento dentro del rango de rugosidad relativa D/ε a partir de 100 hasta 1x10^6 y para número de Reynolds desde 5x10^3 hasta 1x10^8.

1.4.4.2 Ecuación de Hazen Williams para la pérdida de carga

Para el cálculo de tuberías a presión, se aplica también la fórmula experimental de Hazen-Williams para la obtención de pérdidas de carga, la misma viene dada por la expresión:

$$hf = \frac{10.665 * L * Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.87}}$$

Dónde:

hf = pérdida de carga
C= coeficiente de Hazen Williams
Q= Caudal en m3/s.
D = Diámetro en m.

El coeficiente C depende del material de la tubería, la Norma CO 10.07-601, recomienda los siguientes valores:

Tabla 1. Coeficientes de Chow para la fórmula de Hazen - Williams.

TIPO DE CONDUCTO	COEFICIENTE CHOW
Acero corrugado	60
Acero galvanizado	125
Asbesto – cemento	140
Cobre	130
PVC	140
Hormigón liso	130
Hormigón ordinario	120
Hiero fundido nuevo	130
Hierro fundido viejo	90

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias, 1992) Norma: CO 10.07-601.

1.4.4.3 Pérdidas en accesorios.

Para el cálculo de las pérdidas menores producidas en accesorios colocados en la conducción (válvulas, codos, tees, reducciones, etc) se determinará por medio de la siguiente expresión:

$$H_{facc} = k * \frac{v^2}{2 * g}$$

Dónde:

Hf_{acc} = pérdidas en accesorios (m)

k = coeficiente de pérdida por accesorio.

V = velocidad (m/s)

g = aceleración de la gravedad m/s2

En la siguiente tabla se presenta los valores de K para diferentes accesorios.

Tabla 2. Coeficiente de pérdida por accesorio, condiciones ideales.

Accesorio	K
Válvula de globo, completamente abierta	10,0
Válvula de mariposa, completamente abierta	1,2
Válvula de cheque, completamente abierta	2,5
Válvula de compuerta, completamente abierta	0,2
Válvula de retención	1,5
Codo de radio corto	0,9
Codo de radio medio	0,8
Codo de gran radio	0,6
Codo de 45º	0,4
Tee, en sentido recto	0,3
Tee, a través de la salida lateral	1,8
Tee, con reducción	0,56
Unión	0,3
Ye de 45º, en sentido recto	0,3
Ye de 45º, salida lateral	0,8
Entrada recta a tope	0,5
Entrada con boca acampanada	0,1
Entrada con tubo entrante	0,9
Salida	1,0

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias, 1992) Norma: CO 10.07-601.

1.4.5 Período de diseño del proyecto

El Código Ecuatoriano de la Construcción, Norma CO 10.07-601, lo define como el lapso durante el cual una obra o estructura puede funcionar sin la necesidad de ampliaciones, el mismo depende de los siguientes factores:

- La vida útil de las estructuras considerando su desgaste.
- La facilidad o dificultad de la ampliación de las obras existentes.
- Las tendencias de crecimiento de la población futura.
- El comportamiento de las obras durante los primeros años.

En la siguiente tabla, se muestra la vida útil sugerida por la Norma CO-10.07-601, para diferentes componentes de un sistema de agua potable.

Tabla 3. Vida útil sugerida para diferentes componentes de un sistema de agua potable.

COMPONENTE	VIDA UTIL
Diques grandes y túneles	50 a 100 años
Obras de captación	25 a 50 años
Pozos	10 a 25 años
Conducción de Hierro Dúctil	40 a 50 años
Conducciones AC O PVC	20 a 30 años
Plantas de tratamiento	30 a 40 años
Tanques de Almacenamiento	30 a 40 años
Tuberías principales y secundarias de la red	
De hierro Dúctil	40 a 50 años
De AC o PVC	20 a 25 años
Otros Materiales	De acuerdo a especificaciones de fabricante

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias, 1992) Norma: CO 10.07-601

1.4.6 Población

1.4.6.1 Población actual

La población actual corresponde al número de habitantes existentes en el área de estudio al momento de realizar el diagnóstico. Este valor constituye la base para la estimación de la población futura mediante los métodos de proyección demográfica.

1.4.6.2 Población de diseño

La población futura es la cantidad de personas que se estima tener en una localidad al final del período de diseño del sistema de agua potable, la misma se establece con base en una población inicial (Comisión Nacional del Agua, 2015).

La estimación de la población futura es un proceso analítico que busca modelar el comportamiento demográfico a largo plazo. La literatura técnica y las normativas de diseño hidráulico establecen diferentes modelos matemáticos, cuya aplicación depende de la tendencia histórica de crecimiento y las características socioeconómicas de la localidad.

Según (López Cualla, 2003), los métodos más comunes para el cálculo de la población futura son el aritmético, el geométrico y el exponencial, cada uno con una interpretación distinta de la dinámica de crecimiento poblacional.

Método Aritmético

Este modelo se basa en la hipótesis de que la población crece de forma lineal, es decir, que el incremento poblacional por unidad de tiempo es constante. Es una representación simplificada que se aplica preferentemente en poblaciones rurales que presentan un crecimiento estable y no disponen de grandes áreas de expansión. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$Pf = Po(1 + \frac{i * t}{100})$$

Dónde:

Po= Población actual.
i = Tasa de crecimiento poblacional
t = Tiempo

Método Geométrico

El modelo geométrico asume que el crecimiento de la población es proporcional a la población actual, funcionando de manera análoga al interés compuesto. Es el método más utilizado en el diseño de sistemas de agua potable, ya que refleja de mejor manera el dinamismo de poblaciones jóvenes o en procesos de consolidación urbana. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$Pf = Po(1 + \frac{i}{100})\text{^}t$$

Método Exponencial

Este método considera que el crecimiento es una función continua del tiempo y de la población. Se emplea comúnmente en zonas con tasas de crecimiento elevadas y sostenidas, donde existe una fuerte presión migratoria que impulsa el desarrollo demográfico de forma acelerada, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Pf = Po * e^{\frac{i*t}{100}}$$

1.4.7 Análisis del consumo percápita

(López Cualla, 2003) define a la dotación como: "… *la cantidad de agua asignada a un habitante para satisfacer sus necesidades y se expresa en litros por persona por día (l/hab/día)*", manifiesta que la determinación de la demanda de agua es el punto de partida para el dimensionamiento de todos los componentes de un acueducto, desde la captación hasta la distribución.

De acuerdo a la normativa técnica vigente en el Ecuador, el valor de la dotación no es fijo, sino que depende de factores como la región geográfica (Costa, Sierra, Amazonía), el clima y el tamaño de la población del sector en análisis., en la siguiente tabla se muestran las dotaciones recomendadas en función a su población y el clima.

Tabla 4. Dotaciones recomendadas, según la población.

Población (habitantes)	**Clima**	**Dotación media futura (l/hab/día)**
Hasta 5000	Frío Templado Cálido	120 – 150 130 – 160 170 – 200
5000 a 50000	Frío Templado Cálido	180 – 200 190 – 220 200 - 230
Más de 50000	Frío Templado Cálido	> 200 > 220 > 230

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias, 1992) Norma: CO 10.07-601

1.4.8 Variaciones de consumo

Caudal medio

Es el resultado de una estimación del consumo per cápita para la población futura del período de diseño, será calculado mediante la ecuación:

$$Qm = \frac{f * (P * D)}{86400}$$

Dónde

Qm = Caudal medio (l/s)

f = Factor de fugas

P = Población al final del período de diseño.

D= Dotación futura (l/hab*día)

Caudal máximo diario

Se define como el día de máximo consumo de una serie de registros observados durante los 365 días del año, se calcula con la siguiente ecuación:

$$QMD = KMD * Qm$$

Dónde:

QMD = Caudal máximo diario (l/s)

KMD = Factor de mayoración máximo diario. (Tiene un valor de 1.25 para todos los niveles de servicio).

Caudal máximo horario

Se define como la hora de máximo consumo del día de máximo consumo, se determina con la siguiente ecuación

$$QMH = KMH * Qm$$

Dónde:

QMH = Caudal máximo horario (l/s)

KMH = Factor de mayoración máximo horario. (Tiene un valor de 3 para todos los niveles de servicio).

1.5 Sistema de distribución de agua

Un sistema de distribución comprende las obras y trabajos auxiliares construidos desde la salida de la planta de tratamiento hasta la acometida domiciliaria. El fundamento de

cualquier sistema de distribución es la protección de la salud pública. La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que la red de distribución es la parte más sensible en la cadena de suministro debido al riesgo de contaminación secundaria. Sostiene también que la red de distribución debe diseñarse para mantener una presión positiva constante y una concentración mínima de desinfectante residual para evitar la intrusión de patógenos.

1.6 Fugas y agua no contabilizada (ANC)

Se denomina agua no contabilizada a la cantidad de agua que se pierde entre el proceso de producción, distribución, facturación al cliente y recaudación, en este contexto se hace referencia al agua que no se factura y que no genera ingresos al prestador, dicho de otro modo es el indicador que permite establecer el porcentaje de volumen de agua tratada que se pierde desde que sale a la red de distribución del sistema hasta que llega a los consumidores del servicio de agua y posterior factura por ese servicio (ARCA, 2025).

1.6.1 Componentes del Agua No Contabilizada

Allan Lambert uno de los autores más citados en la materia, establece que el ANC se divide en dos grandes categorías:

1. **Pérdidas aparentes (comerciales):** Incluyen errores en la medición (micromedición defectuosa), consumos no autorizados y errores en el manejo de datos.
2. **Pérdidas reales (físicas):** Son los volúmenes de agua que se escapan del sistema a través de fugas en tuberías principales, conexiones domiciliarias y desbordamientos en tanques (Walski et al., 2003) (Lambert, 2000). Estas son las que serán objeto de modelación en esta tesis.

1.7 Metodologías de detección de fugas mediante modelación hidráulica

La construcción de un modelo hidráulico confiable para la detección de fugas requiere un proceso sistemático de transformación de datos físicos en un entorno matemático. Según (Walski et al., 2003), un modelo no calibrado constituye únicamente una representación teórica que puede conducir a conclusiones erróneas sobre la ubicación de las pérdidas.

1.7.1 Software de simulación hidráulica WaterGEMS

WaterGEMS es una plataforma de modelación hidráulica, caracterizada por su capacidad para operar de manera integrada con sistemas de información geográfica (GIS) y herramientas de diseño asistido (CAD). Esta arquitectura permite que el modelo hidráulico actúe como una extensión directa del entorno geoespacial, facilitando la sincronización de datos topográficos y de infraestructura en tiempo real para el análisis de redes de distribución (Bentley, 2022)

1.7.2 Construcción del modelo topológico

La precisión de la modelación en el sector en estudio depende de la integridad de los datos de entrada, (Boulos et al., 2006) clasifican estos datos en dos grupos:

- **Datos estáticos:** Longitudes, diámetros, material de tubería (coeficientes de rugosidad) y cotas topográficas de los nudos.
- **Datos dinámicos:** Niveles de operación en tanques y curvas de demanda horaria.

La integración de estos datos en el software WaterGEMS permite establecer la línea base del sistema, sin embargo, para la detección de fugas, se debe considerar que la rugosidad de la tubería no es un valor fijo de manual, sino que varía con la edad y el estado de conservación del material (Saldarriaga, 2019)

1.7.3 Calibración del modelo hidráulico

La calibración consiste en ajustar los parámetros del modelo para que los resultados simulados coincidan con las observaciones de campo (presiones y caudales medidos). Savic et al., (2009) definen la calibración como un problema de optimización donde se busca minimizar la diferencia entre los valores observados y los calculados.

En WaterGEMS este proceso se puede realizar mediante:

1. **Calibración manual:** Ajuste iterativo de la rugosidad y la demanda.
2. **Algoritmos genéticos (Darwin Calibrator):** WaterGEMS utiliza algoritmos de optimización para encontrar la combinación de rugosidad y demandas de fuga que mejor se ajusten a las presiones medidas en el sector (Bentley, 2022).

1.7.4 Error medio cuadrático (RMSE)

Es una medida de precisión que cuantifica la magnitud media de los errores entre los datos simulados por el modelo y las presiones o caudales medidos físicamente. A diferencia de otros indicadores, el RMSE penaliza con mayor fuerza las desviaciones grandes, lo que lo convierte en un indicador ampliamente utilizado para evaluar la precisión de la calibración hidráulica. Un valor de RMSE cercano a cero indica un ajuste óptimo del modelo a la realidad física de la red de agua (Walski et al., 2003).

1.7.5 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad establece el estudio sistemático de cómo la variabilidad e incertidumbre en los parámetros de entrada de un modelo matemático impactan en los resultados de las variables de respuesta. De acuerdo con (Saltelli et al., 2007), en el ámbito de la ingeniería hidráulica, este procedimiento resulta fundamental para jerarquizar los parámetros del sistema, permitiendo identificar aquellos que demandan una mayor precisión en las mediciones de campo para garantizar la representatividad del modelo. El análisis de sensibilidad cumple tres funciones principales:

1. **Identificación de parámetros críticos:** Permite determinar si un cambio del 10% en la rugosidad de una tubería vieja de hierro fundido afecta más a la presión del nodo crítico que un cambio del 10% en la demanda horaria.
2. **Validación de la detección de fugas:** Ayuda a entender si una caída de presión medida en campo es realmente causada por una fuga o si pudiera ser simplemente el resultado de una fluctuación normal en el patrón de consumo.
3. **Reducción del error de calibración:** Al conocer qué nodos son más "sensibles" a los cambios de presión, es posible priorizar la instalación de esos puntos específicos para obtener mejores datos para la herramienta Darwin Calibrator del software WaterGEMS.

Antes de iniciar un proceso de calibración automática, el modelador debe realizar un análisis de sensibilidad manual o automatizado. Si el modelo es poco sensible a los cambios de rugosidad, pero muy sensible a los cambios de demanda, los esfuerzos de calibración deben centrarse en los patrones de consumo del sector para no obtener falsos positivos en la localización de fugas.

1.8 Análisis de información disponible de la zona de estudio

La construcción de un modelo hidráulico robusto y sobre todo representativo para el sector Cruz Verde 2 (4B2), que se abastece del sistema de agua del Tomebamba, depende intrínsecamente de la calidad, integridad y resolución de la información base proporcionada por la empresa pública ETAPA EP.

Este apartado tiene como finalidad sistematizar, evaluar y describir el conjunto de datos técnicos, operativos y comerciales disponibles y que serán utilizados para la modelación hidráulica y posterior calibración de la red de distribución de este sector, a continuación, se detalla las principales características de la infraestructura hidráulica existe y delimitación del sector.

1.8.1 Ubicación geográfica

El sistema Tomebamba, al cual pertenece el sector en estudio, opera bajo un régimen de conducción y distribución por gravedad, cuyo funcionamiento hidráulico del sector depende del caudal proveniente de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) El Cebollar.

Dentro de esta configuración, el sector seleccionado para el análisis hidráulico y posterior calibración, se denomina Cruz Verde 2 (4B2), cuenta con un área de 402.07 Ha, y un perímetro de 11387.90 m, se encuentra delimitado geográficamente de la siguiente manera:

- Al Norte: Río Tomebamba a lo largo de la Av. 12 de Abril.
- Al Sur: Río Yanuncay, a lo largo de la Av. 1ero. de mayo, sector Parque Lineal de Yanuncay, y Av. 24 de mayo, sector Jardín Botánico de Cuenca.
- Al Este: Calle de Las Retamas, sector parque del Arupo.
- Al Oeste: Av. Unidad Nacional

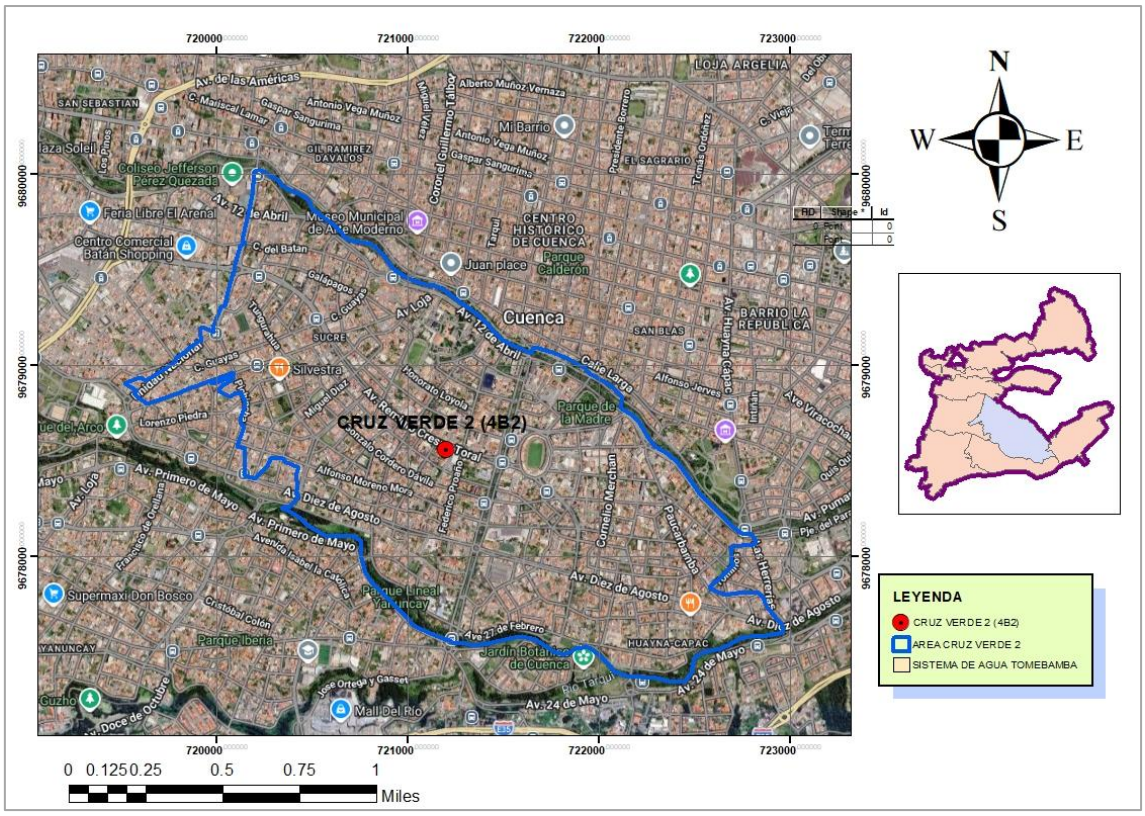


Ilustración 4. Ubicación de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

1.8.2 Infraestructura hidráulica existente

La distribución de agua al sector Cruz Verde 2, se realiza a través de una configuración de malla y ramificada, como se muestra en la siguiente ilustración.

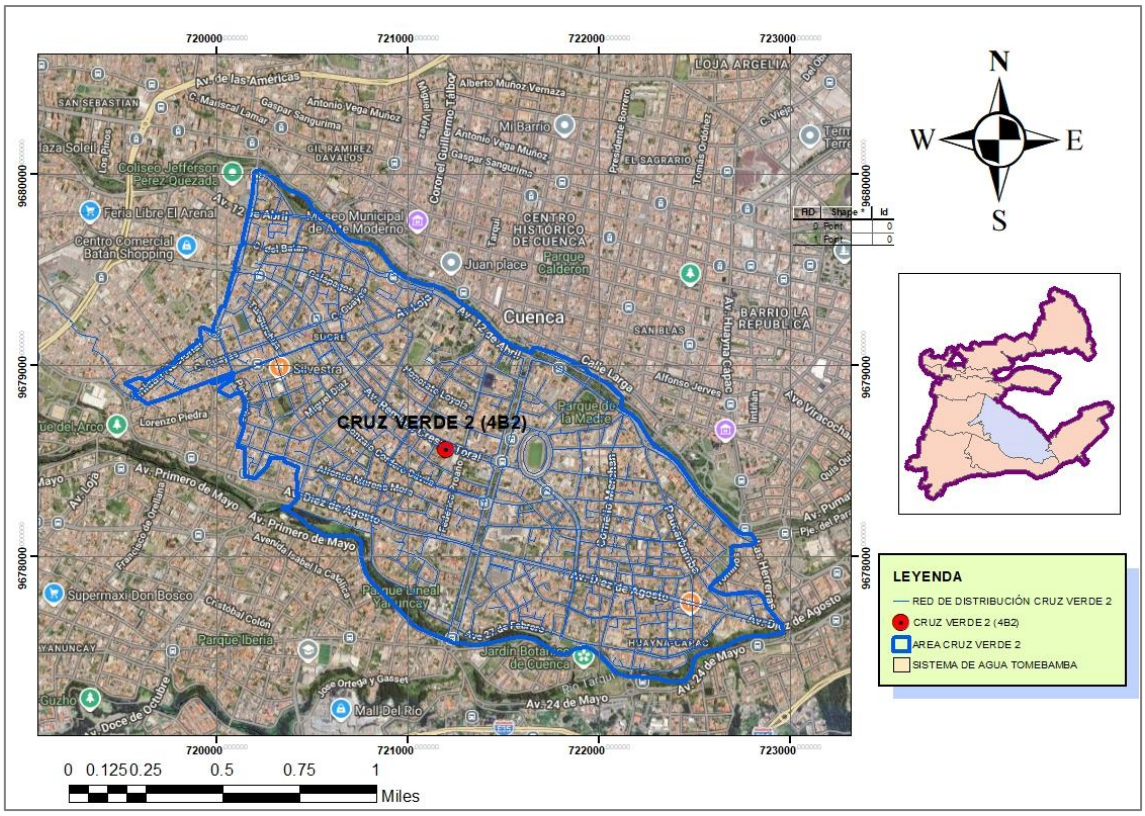


Ilustración 5. Disposición de la red de distribución de agua, Sector Cruz Verde 2.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez actualizado el modelo hidráulico, de conformidad a la información proporcionada por ETAPA EP, como el Manual de Operación de la Subsectorización de la Red de Distribución, Sector 4B2 o Cruz Verde 2, las principales características físicas del sistema son las que se describen a continuación, en la tabla 5.

Tabla 5. Características físicas del sector de distribución Cruz Verde 2.

Parámetro	Cantidad	Unidad
Área	402.07	Ha
Perímetro	11387.90	m
Conexiones a marzo de 2025	10347	Nro. usuarios
Consumo total	204867.93	m3/mes

Fuente: ETAPA EP.

La red de distribución que inicia desde el tanque de almacenamiento hasta la zona urbana, denominada Cruz Verde 2, está compuesta por tuberías de diferentes materiales y diámetros, que van desde los 50 mm hasta los 500 mm, con un total de 87.49 km de

tubería, como se detalla en la tabla 6, incluye también una serie de accesorios como válvulas de corte, válvulas de operación entre otros.

Tabla 6. Longitud de la tubería del sistema de distribución, Cruz Verde 2.

DIAMETRO	**LONGITUD SEGÚN EL MATERIAL (m)**				**LONGITUD TOTAL**
(mm)	**AC**	**PVC**	**HF**	**HD**	**(m)**
50	7197.24	10800.12			17997.36
60		60.54			60.54
63		31924.23			31924.23
75			50.99		50.99
100	2017.36	724.74			2742.10
110		13777.21			13777.21
150	608.63	2795.19			3403.82
160		2035.94			2035.94
200	2266.86	5604.87			7871.73
250	3138.03	520.59			3658.62
300	585.64				585.64
315		1019.99			1019.99
355		219.95			219.95
400		973.53		634.12	1607.65
500				538.46	538.46
TOTAL	**15813.76**	**70456.90**	**50.99**	**634.12**	**87494.23**

Fuente: Elaboración propia.

1.8.3 Población actual

Se determina a través de datos censales que proporciona el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), para el caso del sector Cruz Verde 2, se identificó que el área de intervención se emplaza sobre las parroquias urbanas de Sucre y Huayna Cápac. Tomando como referencia el Portal Geográfico del GAD Municipal de Cuenca, se identifica que el proyecto se registra mayoritariamente en la parroquia Sucre.

Debido a que las dos parroquias presentan características sociales, demográficas y de consolidación urbana similares, se ha adoptado el índice de densidad de 59 Hab/Ha reportado en el PDOT de la ciudad de Cuenca actualización 2024, para la parroquia Sucre, la población actual se determina multiplicando el área del sector por el índice de densidad poblacional por Hectárea.

Tabla 7. Población censal al año 2022, método de densidad poblacional.

SECTOR DE SERVICIO	ÁREA (Ha)	ÍNDICE DE DENSIDAD POBLACIONAL (hab/Ha)	POBLACIÓN CENSAL AL AÑO 2022 (hab)
Cruz Verde 2	402.068	59	23723

Fuente: (INEC, 2024).

Para determinar la población actual al año 2025 se aplica el método geométrico de proyección en dónde la Tasa de crecimiento promedio Anual para la ciudad de Cuenca es de 1.34% (INEC, 2024).

Tabla 8. Proyección de la población al año 2025.

SECTOR DE SERVICIO	POBLACIÓN CENSAL AL AÑO 2022 (hab)	TASA DE CRECIMIENTO POBLACIONAL (%)	POBLACIÓN AL AÑO 2025 (hab)
Cruz Verde 2	23723	1.34	24690

Fuente: (INEC, 2024).

Adicionalmente, la población actual se estimó mediante el método de densidad por conexión, tomando como fuente primaria el catastro de usuarios de ETAPA EP, para el Sistema Tomebamba, al mes de marzo de 2025. Con el fin de garantizar que el cálculo refleje exclusivamente la demanda doméstica permanente, no se incluyen aquellas conexiones destinadas a usos no residenciales (comercial, industria y servicios especiales). Bajo este criterio se aplicó un índice de densidad poblacional de 3.12 habitante por vivienda, valor proporcionado por la empresa ETAPA EP, entidad prestadora del servicio.

Tabla 9. Población actual, mediante método de densidad por conexión.

ÁREA DE SERVICIO	ÁREA (Ha)	NÚMERO DE MEDIDORES RESIDENCIALES (u)	ÍNDICE DE DENSIDAD POBLACIONAL (hab/vivienda)	POBLACIÓN ACTUAL 2025
Cruz Verde 2	402.07	10347	3.12	32283

Fuente: ETAPA EP.

Al comparar ambos métodos de estimación se observa una diferencia de 8560 habitantes, de manera que para el presente análisis se tomará el valor obtenido a través del número de medidores residenciales instalados al año 2025, por considerarse una decisión bajo el principio de seguridad hidráulica, pues diseñar con datos del censo implicaría subestimar la carga hidráulica real que soporta la red de distribución.

1.8.4 Asignación de demandas actuales de la red

Para el modelo se requiere el número total de medidores instalados en un período de un mes, para el sector en análisis en este caso Cruz Verde 2, es decir la micro medición para la zona de estudio, información que se escribe a continuación para el período marzo de 2025.

Tabla 10. Volumen total consumido por el sector Cruz Verde 2.

Año	Mes de análisis	Nro. Total de conexiones	Consumo (m3/mes)	Consumo Qmed (l/s)
2025	marzo	10347	204867.93	76.49

Fuente: ETAPA EP.

Para el modelo inicial es indispensable determinar los caudales, para ello se procede con el cálculo, considerando como caudal de consumo actual Qc, al consumo del mes de marzo de 2025, utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_{med} = \frac{Q_c}{f}$$

Dónde:

Qmed= Caudal medio diario en (l/s).

Qc= Consumo actual (l/s)

F= Es el factor de fugas.

El porcentaje de Agua No Contabilizada, para el período marzo de 2025, para el Sistema Tomebamba, es del 31%, según información proporcionada por la empresa (ETAPA EP, 2025), de manera que el factor de fugas se determina mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{(1 - \%ANC)}$$

que representa un factor de mayoración de 1.45, lo que significa que por cada litro que se consume, el sistema debe entregar 1.45 litros para cubrir las fugas.

CAPITULO 2: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DE LA RED DE AGUA POTABLE

La calibración es el proceso iterativo de ajustar los parámetros de entrada del modelo hidráulico, como son la rugosidad, las demandas, el estado de diferentes accesorios, entre otros; para que los resultados de salida como las presiones y caudales coincidan con las mediciones de campo. Walski et al., (2003) establece que el objetivo no es solo "hacer que los números coincidan", sino identificar inconsistencias físicas, como válvulas cerradas que el plano indica abiertas o fugas no detectadas.

La confiabilidad de un modelo hidráulico para la detección de fugas está en su capacidad para replicar las condiciones físicas reales. Según (Savic et al., 2009)**,** este proceso transforma un modelo matemático universal en una herramienta de toma de decisiones específica para un sistema.

2.1 Metodología de trabajo

Previo a la modelación hidráulica, se actualizó toda la red de distribución del sector 4B2, en concordancia con el Manual de operación de la subsectorización de la red de distribución, información del Departamento de Aseguramiento de ingresos de agua potable y saneamiento de la empresa ETAPA EP.

Para ello se trabajó con el software AutoCAD, en donde se digitalizaron tramos de tuberías, accesorios y elementos de control que no constaban en el modelo inicial, así también algunos tramos y accesorios han sido eliminados, una vez consolidada la topología de la red, se realizó la migración hacia el software de modelación WaterGEMS.

Este procedimiento permitió:

- Insertar válvulas y accesorios cuya función es determinante en la regulación de las presiones que se analizarán en la fase de calibración.
- Asignar materiales y diámetros reales a los nuevos tramos de conformidad con los registros de ETAPA EP.
- Establecer las demandas promedio para cada nodo, luego de un análisis de la macro y micro medición del sistema.

- Disponer de un modelo hidráulico en período estático, en donde se conservan las propiedades físicas a lo largo del tiempo, que se convierte en período extendido, a través de la curva de consumo horario establecida para el sector.
- El modelo hidráulico se calibra empleando el software WaterGEMS a través de la herramienta Darwin Calibrator, tomando como puntos de referencia las presiones tomadas en campo y la variación de los coeficientes de rugosidad iniciales de las tuberías, así como las pérdidas de la carga de las válvulas de operación de cada subsector.
- Cuando el modelo hidráulico ha sido validado, se procede con el análisis de vulnerabilidades del sistema, que permite plantear una propuesta de mejora del sistema de distribución.

2.2 Asignación de demandas

Para la modelación hidráulica del sector Cruz Verde 2, la asignación de caudales en los nodos se basó inicialmente en los registros de consumo facturado (micromedición). Sin embargo, para que la simulación refleje las condiciones reales de operación, se integró el porcentaje de fuga para el sector en el período marzo de 2025, igual al 31%, reportado de manera general para el sistema Tomebamba, información entregada por la empresa ETAPA EP, como se detalla a continuación en la tabla 11:

Tabla 11. Porcentaje de fugas para el sistema Tomebamba, período marzo 2025.

PERIODO	SISTEMA TOMEBAMBA			
	MACROMEDIDON (m3/mes)	MICROMEDICION (m3/mes)	CONEXIONES	IANC(%)
mar-25	1529228.1	1059721.32	61114	31%

Fuente: ETAPA EP.

Para el presente estudio la asignación de consumos para el sector Cruz Verde 2, se realizó de forma espacial a través de la herramienta LoadBuilder de WaterGEMS, que permite la interoperatividad entre el Sistema de Información Geográfica (SIG) y el software de cálculo hidráulico. Esta herramienta facilitó la migración de información comercial como número de medidores registrados dentro del polígono, transformándolos en cargas hidráulicas puntuales dentro del modelo.

La asignación se realiza mediante el método del nodo más cercano, de modo que cada medidor es vinculado al nodo de la red con menor distancia. El software de cálculo suma

algebraicamente los consumos de todos los medidores asignados a un mismo nodo, generando una demanda base consolidada.

Una vez concluido el proceso de asignación se procede a realizar una validación mediante la herramienta Demand Control Center, constatando que la sumatoria total de las demandas en los nodos sea igual al volumen total facturado más el porcentaje de pérdidas, esto es un total de 110.38 l/s, verificación que se presenta a continuación, ilustración 6.:

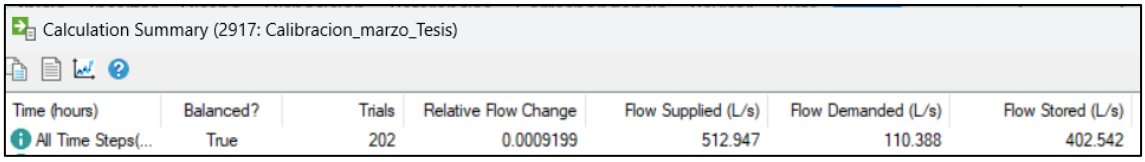


Ilustración 6. Demanda de caudal total, sector Cruz Verde 2.Ilustración

Fuente: Autor

2.3 Georreferenciación de datos de presión medidos en campo

La importancia de contar con registros de presión de campo georreferenciados está en establecer una línea base comparativa necesaria para la validación del modelo hidráulico. Estos datos son una herramienta fundamental para la identificación de zonas con pérdidas físicas de agua; al diferenciar la presión simulada frente a la presión medida en campo, es posible detectar anomalías hidráulicas en sectores donde la caída de presión observada supera a la calculada.

En este sentido para el proceso de calibración del modelo hidráulico, se realizó tomas de presiones en campo en diferentes puntos en cada subsector delimitado dentro del sector Cruz Verde 2. En cada uno de estos puntos se realizaron mediciones en tres horarios: 06:00, 12:00 y 15:00. Las lecturas obtenidas fueron ingresadas directamente en el software WaterGEMS, vinculándolos a sus respectivos nodos, para evaluar el comportamiento hidráulico de la red frente a las variaciones de la demanda horaria.

En la ilustración 7, se puede observar la ubicación de cada uno de los puntos en los que se tomaron los datos de presión.

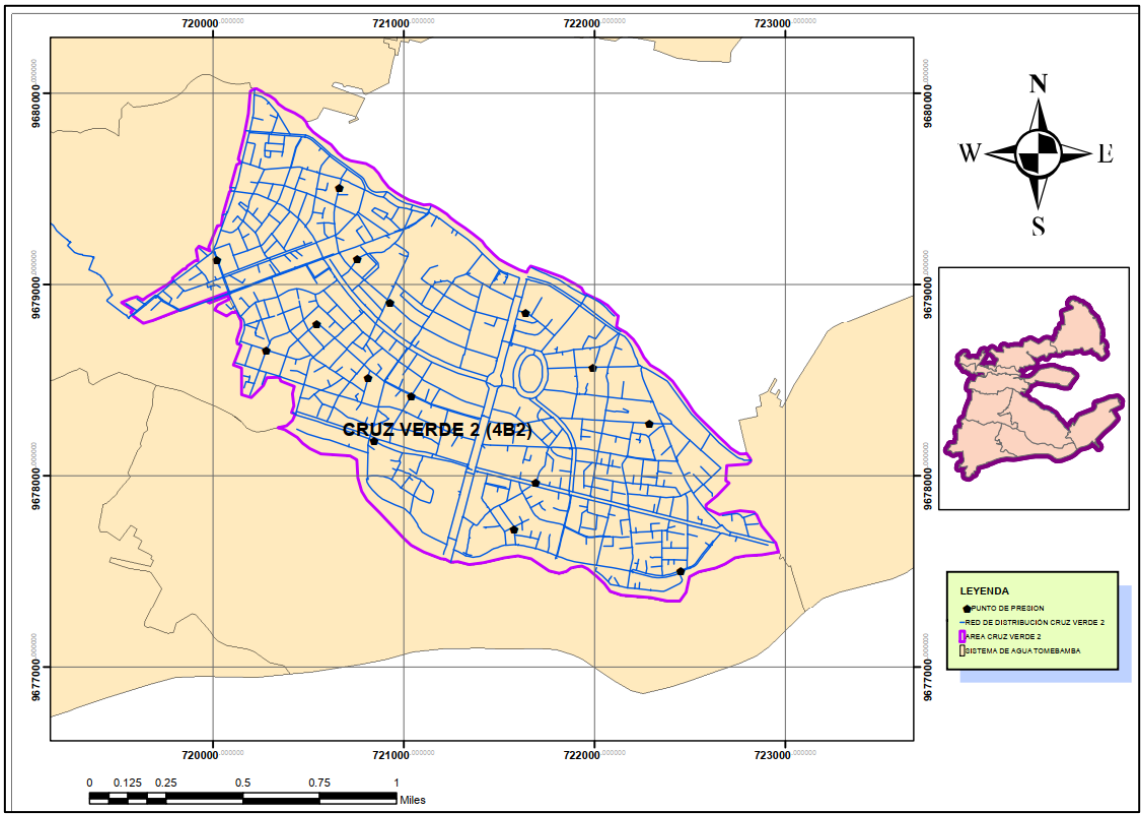


Ilustración 7. Puntos de presión medidos en campo.

Fuente: Elaboración propia.

Para la toma de presiones en los puntos de control, se utilizó un manómetro analógico portátil con sensor de tubo Bourdon, rango de escala de 0 a 16 bar (0 a 240 psi) y una clase de precisión CL 2.5, parte de los resultados obtenidos se detallan a continuación:



Ilustración 8. Toma de la presión, subsector 1, Hora: 12:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 9. Toma de la presión, subsector 2, Hora: 15:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 10. Toma de la presión, subsector 3, hora: 06:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 11. Toma de la presión, subsector 3a, hora: 15:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 12. Toma de la presión, subsector 4, hora: 15:00.

Fuente: Autor.

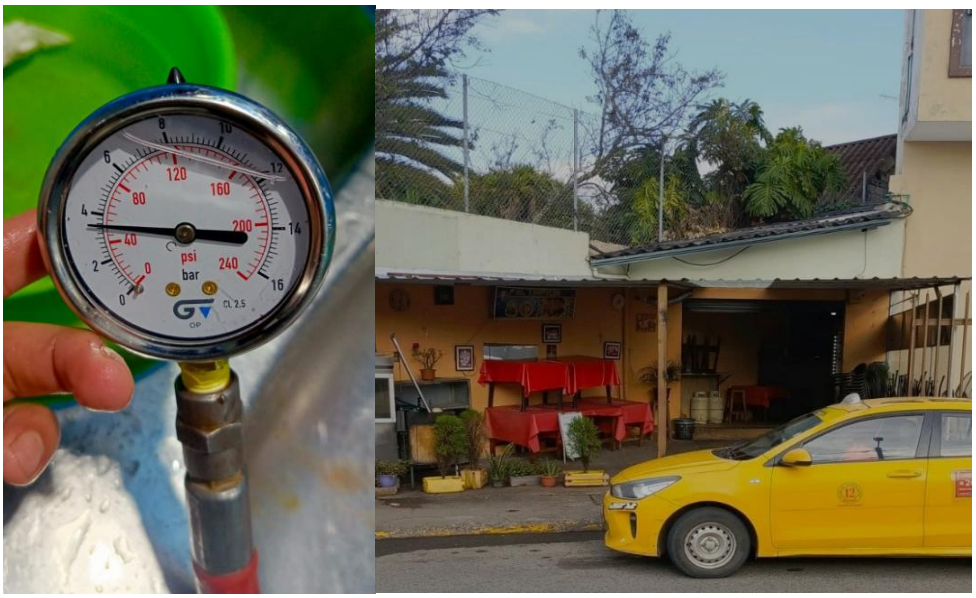


Ilustración 13. Toma de la presión, subsector 5, hora: 06:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 14. Toma de la presión, subsector 6, Hora: 12:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 15. Toma de la presión, subsector 7, Hora: 06:00.

Fuente: Autor.

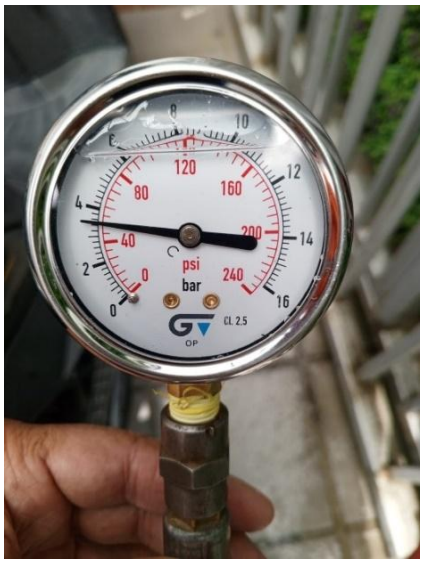


Ilustración 16. Toma de la presión, subsector 8, Hora: 15:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 17. Toma de la presión, subsector 9, Hora: 06:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 18. Toma de la presión, subsector 10, Hora: 15:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 19. Toma de la presión, subsector 11, Hora: 06:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 20. Toma de la presión, subsector 12, hora: 12:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 21. Toma de la presión, subsector 13, Hora: 15:00.

Fuente: Autor.



Ilustración 22.Toma de la presión, subsector 14, Hora: 06:00.

Fuente: Autor.

2.4 Vinculación de puntos de control de presión

Cada punto de control de presión se vinculó al nodo más cercano del modelo hidráulico si la distancia se encontraba a máximo 10m, aquellos que se encontraban lejos de los nodos, pero muy cercanos o sobre el trazado de una tubería, se optó por insertar un nuevo nodo en la tubería, de manera que se mantenga la continuidad hidráulica, que permita comparar los resultados de presión de forma directa, con ello se puede garantizar que el modelo no solo sea una representación geométrica de la red, sino una herramienta de

predicción confiable capaz de simular escenarios de operación e identificar zonas con déficit de presión.

2.5 Modelo hidráulico en período extendido

Inicialmente se emplearon todos los documentos en formato shape que fueron proporcionados por la empresa ETAPA EP, para la ubicación de válvulas de control, válvulas de operación, válvulas reductoras de presión, hidrantes entre otros accesorios, mismos que fueron configurados de acuerdo con el Manual de operación y mantenimiento del sector Cruz Verde 2, en donde se establece las condiciones de operación.

La American Water Works Association, establece que la calibración consiste en ajustar el modelo hidráulico hasta obtener una adecuada concordancia entre las presiones y caudales medidos y simulados (AWWA, 2012). Diversos autores consideran aceptables diferencias de presión del orden de +- 5psi (aproximadamente +- 3.5 m.c.a), valor empleado en procesos de calibración de redes de distribución de agua (Walski et al., 2003)

La modelación en período extendido consiste en una serie de simulaciones en estado permanente vinculadas entre sí, donde las condiciones finales de un intervalo de tiempo, de manera especial en los niveles en los tanques, se convierten en las condiciones iniciales del siguiente intervalo, permitiendo analizar la dinámica de presiones y caudales ante patrones de consumo variables (Saldarriaga, 2019).

2.6 Definición del patrón de consumo horario (Curva de demanda)

Para la transición del modelo de un estado estático a una simulación de período extendido (EPS), se procedió a la definición de un patrón de consumo. En este caso se adoptó la curva de demanda, del sector 3.2 Cebollar (Ilustración 23), que tiene un comportamiento residencial similar al del sector en estudio.

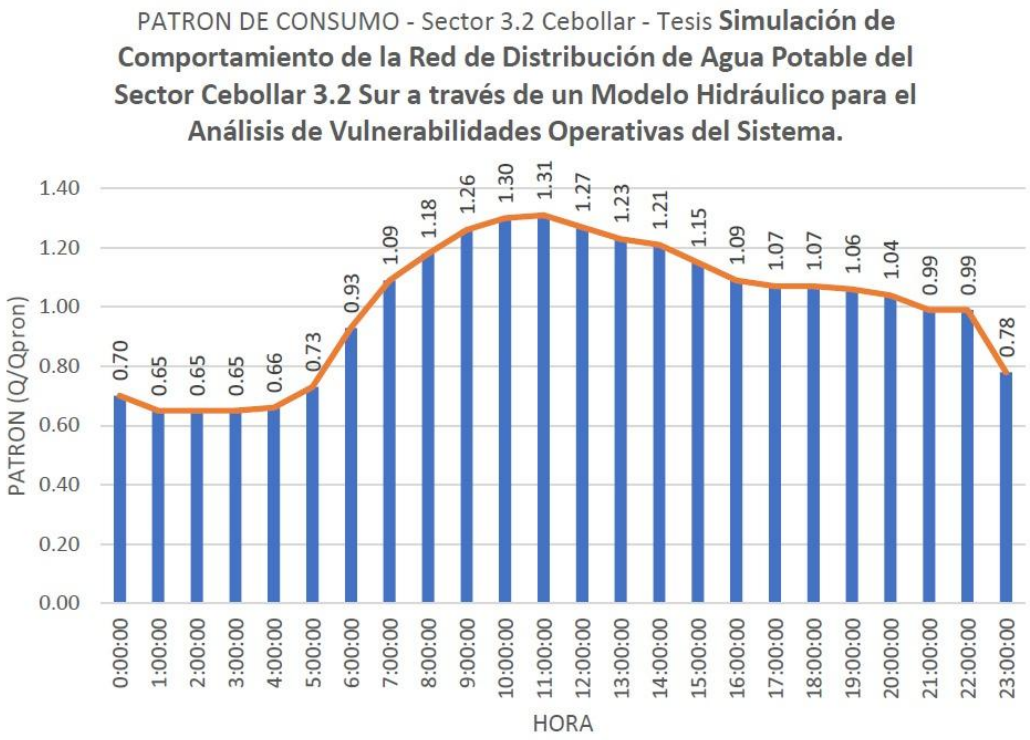


Ilustración 23. Patrón de consumo horario para un día de la reserva, sector 3.2 Cebollar.

Fuente: .(Cazar & Serpa, 2022).

Valores de consumo que fueron ingresados en el software WaterGEMS a través de la herramienta Patterns, como se presenta en la ilustración 24. El patrón consta de 24 intervalos horarios con un paso de tiempo de una hora, permitiendo que el software ajuste los caudales en cada nodo de manera automática durante el ciclo de simulación de 24 horas.

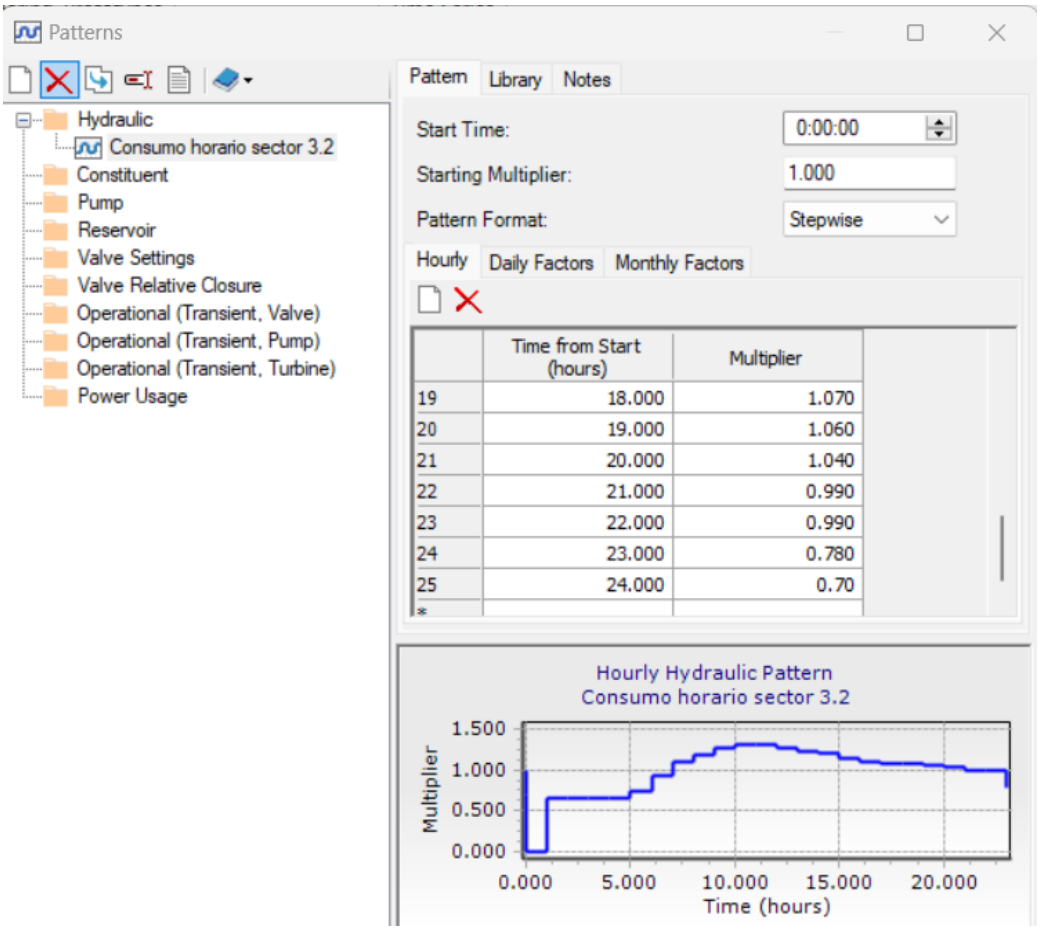


Ilustración 24. Ingreso del patrón de consumo en el software WaterGEMS.

Fuente: Autor.

Una vez definido el patrón de consumo, se precedió a la vinculación de las demandas base mediante la herramienta Demand Control Center. A cada nodo de consumo se le asignó el patrón dinámico correspondiente, como se observa en la ilustración 25.

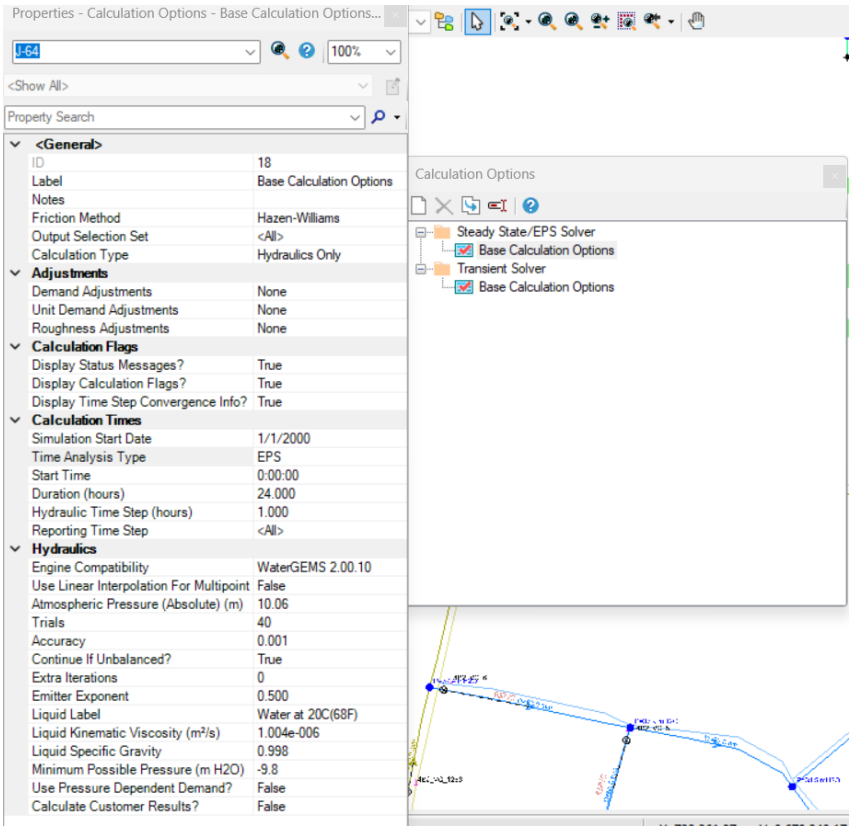


Ilustración 25. Asignación del patrón dinámico a cada nodo.

Fuente: Autor.

2.7 Calibración del modelo hidráulico en período extendido

Para la optimización del modelo hidráulico del sector Cruz Verde 2, se empleó la herramienta Darwin Calibrator de WaterGEMS, a diferencia de un ajuste manual esta herramienta utiliza algoritmos genéricos para encontrar la solución hidráulica que mejor se aproxima a la información medida en campo.

Para que la herramienta procese la información, se configuraron los siguientes parámetros:

Grupos de rugosidad: Se definieron grupos de rugosidad, que corresponden al tipo de material de las tuberías que forman parte del sistema de distribución, (Ilustración 26). Esta caracterización es fundamental, ya que permite al software ajustar el coeficiente de Hazen – Williams (C) dentro de rangos físicamente aceptables.

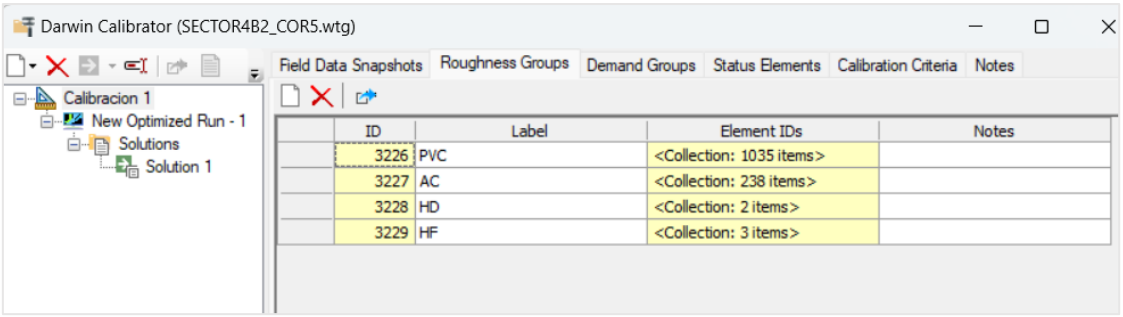


Ilustración 26. Grupos de rugosidad, caracterización según el tipo de material.

Fuente: Autor.

La asignación de los rangos de rugosidad para el proceso de calibración se fundamentó en los valores sugeridos por diferentes autores, y en estudios desarrollados en sistemas de distribución de agua de sectores cercanos al área de influencia del presente estudio. Según los datos históricos el sistema de distribución de agua en el sector Cruz Verde 2, tiene alrededor de 30 años de vida útil, en función a esta información se ha determinado un rango de coeficiente de rugosidad para los diferentes materiales.

Para el PVC se establece un rango de (C: 110 – 150) debido a que los materiales plásticos no sufren corrosión interna, su pérdida de capacidad hidráulica se debe principalmente a sedimentación.

En sistemas de asbesto cemento (AC) para el período establecido, se adoptó un coeficiente de rugosidad de: (75 - 90), debido al desgaste producido por los años de servicio. En igual rango se ha considerado en las tuberías de hierro fundido, en donde puede incrementar los procesos de corrosión interna.

Para las tuberías de hierro dúctil (HD) se estableció un rango de (90-140), debido a que su comportamiento hidráulico depende en gran medida del estado del revestimiento interno.

Datos de campo: Se ingresaron 3 grupos de presiones tomadas en campo, en los horarios de 06:00, 12:00 y 15:00, de los Subsectores: 02, 03, 05, 07, 08, 09, 10, 12 y 13, a cada sector corresponde un nodo georreferenciad. Los nodos de los subsectores 01, 04, 06, 11 y 14 se considerarán para realizar la validación respectiva una vez calibrado el modelo hidráulico, estos puntos han sido seleccionados considerando una diferencia de altura de aproximadamente 15m entre nodo y nodo lo que garantiza una cobertura espacial y de presión representativa de la red.

2.7.1 Resultados de la simulación 1

Los resultados de la **Solución 1,** muestran un ajuste significativo de los coeficientes de rugosidad, en los materiales metálicos en comparación con los valores teóricos iniciales, como se puede observar en la ilustración 27

Solution | Simulated Results

Adjustment Results

Adjustment Group Type
Demand
Roughness
Status

	Adjustment Group	Hazen-Williams C
1	PVC	120.0
2	AC	90.0
3	HD	95.0
4	HF	75.0

Adjustment Groups

	Adjustment Group	Link	Original Roughness	Adjusted Roughness
1028	PVC	4B2_T_2090(1)	150.000	120.000
1029	PVC	4B2_T_2090(2)	150.000	120.000
1030	PVC	4B2_T_1820(1)	150.000	120.000
1031	PVC	4B2_T_1820(2)	150.000	120.000
1032	PVC	4B2_T_2164(1)	150.000	120.000
1033	PVC	4B2_T_2164(2)	150.000	120.000
1034	PVC	4B2_T_2000(1)	150.000	120.000
1035	PVC	4B2_T_2000(2)	150.000	120.000
1036	AC	4B2_T_1001	140.000	90.000
1037	AC	4B2_T_1008	140.000	90.000
1038	AC	4B2_T_1016	140.000	90.000
1039	AC	4B2_T_1025	140.000	90.000
1040	AC	4B2_T_1035	140.000	90.000
1041	AC	4B2_T_1036	140.000	90.000
1042	AC	4B2_T_1045	140.000	90.000
1043	AC	4B2_T_1052	140.000	90.000

Ilustración 27. Rugosidades iniciales y finales, solución 1.

Fuente: Autor.

La optimización realizada con la herramienta Darwin Calibrator, determinó un coeficiente de rugosidad final de 120 para el PVC, partiendo de un valor original de 150.

El acero al carbono AC, presentó el ajuste más drástico reduciendo el coeficiente C de Hazen-Williams de un valor teórico de 140 a un valor calibrado de 90. El coeficiente del hierro dúctil pasó de un valor de 130 a 120, en tanto que el hierro fundido también tuvo una disminución considerable al pasar de 130 a 75.

Los coeficientes de rugosidad de la tubería en la simulación 1, como se puedo observar en la ilustración 27 han disminuido con respecto a su valor inicial, con este ajuste se logra minimizar la diferencia existente entre las presiones observadas y simuladas, resultados que se muestran a continuación:

Solution | Simulated Results

Simulated Results Browser

Attribute:
Hydraulic Grade
Flow

	Snapshot	Hydraulic Grade RMSE (m)
1	Mediciones_06_4B2	4.64
2	Mediciones_12_4B2	5.51
3	Mediciones_15_4B2	5.86

Simulated Results

	Field Data Snapshot	Junction	Observed Hydraulic Grade (m)	Simulated Hydraulic Grade (m)	Difference (m)
1	Mediciones_06_4B2	PP2	2,551.07	2,553.12	2.06
2	Mediciones_06_4B2	PP3	2,551.89	2,559.22	7.33
3	Mediciones_06_4B2	PP3a	2,564.92	2,570.74	5.83
4	Mediciones_06_4B2	PP5	2,554.93	2,555.05	0.12
5	Mediciones_06_4B2	PP7	2,562.76	2,558.29	-4.47
6	Mediciones_06_4B2	PP8	2,572.78	2,579.61	6.83
7	Mediciones_06_4B2	PP9	2,577.70	2,580.55	2.85
8	Mediciones_06_4B2	PP10	2,577.79	2,574.78	-3.02
9	Mediciones_06_4B2	PP12	2,579.53	2,585.20	5.67
10	Mediciones_06_4B2	PP13	2,576.42	2,573.75	-2.67
11	Mediciones_12_4B2	PP2	2,547.56	2,553.12	5.56
12	Mediciones_12_4B2	PP3	2,550.48	2,559.22	8.74
13	Mediciones_12_4B2	PP3a	2,560.89	2,570.74	9.85
14	Mediciones_12_4B2	PP5	2,551.79	2,555.05	3.26
15	Mediciones_12_4B2	PP7	2,557.14	2,558.29	1.15
16	Mediciones_12_4B2	PP8	2,577.24	2,579.61	2.37
17	Mediciones_12_4B2	PP9	2,577.70	2,580.55	2.85
18	Mediciones_12_4B2	PP10	2,574.75	2,574.78	0.03
19	Mediciones_12_4B2	PP12	2,577.42	2,585.20	7.78
20	Mediciones_12_4B2	PP13	2,570.10	2,573.75	3.65
21	Mediciones_15_4B2	PP2	2,546.86	2,553.12	6.26
22	Mediciones_15_4B2	PP3	2,550.48	2,559.22	8.74
23	Mediciones_15_4B2	PP3a	2,562.29	2,570.74	8.45
24	Mediciones_15_4B2	PP5	2,547.91	2,555.05	7.13
25	Mediciones_15_4B2	PP7	2,560.66	2,558.29	-2.36
26	Mediciones_15_4B2	PP8	2,573.73	2,579.61	5.88
27	Mediciones_15_4B2	PP9	2,574.89	2,580.55	5.66
28	Mediciones_15_4B2	PP10	2,574.75	2,574.78	0.03
29	Mediciones_15_4B2	PP12	2,579.53	2,585.20	5.67
30	Mediciones_15_4B2	PP13	2,572.90	2,573.75	0.85

Ilustración 28. Resultados de cargas hidráulicas observadas y simuladas, ajuste del coeficiente de rugosidad - Simulación 1.

Fuente: Autor.

En la simulación 1, se determinó un Error Medio Cuadrático (RMSE) para las 06:00 de 4.64, en tanto que para las 12:00 se registra un error 5.51 y para las 15:00 un valor de 5.86, como ya se indicó en párrafos anteriores, un valor de RMSE cercano a cero indica un ajuste perfecto.

De acuerdo con los criterios de aceptación del Manual M32 de la American Water Works Association, el objetivo en una calibración hidráulica es bajar el RMSE hasta los siguientes valores:

≤ 2.00 mca: Considerándose un modelo excelente, siendo el estándar para modelos de diseño y operación de alta precisión.

≤ 3.50 mca: Considerándose un modelo aceptable para planificación a largo plazo o planes maestros.

Bajo estas consideraciones los resultados de la primera simulación establecen una la línea base para refinamientos posteriores. El análisis de los resultados simulados frente a los observados en el sector 4B2, muestra una tendencia a la sobrepresión en los nodos ubicados en zonas bajas, con diferencias de hasta 9 mca, como es el caso del nodo de control de presión en el subsector 3a.

En la primera calibración se evidencia que la mayoría de los datos simulados son mayores a los observados, y que es fundamental reducir el error RMSE de manera que la diferencia entre las presiones simuladas y observadas alcancen el rango sugerido.

2.7.2 Escenario 2 de calibración

Luego de realizar el análisis de los resultados del primer escenario de calibración, al determinar que las presiones simuladas superan a las observadas en un rango que va desde (0.03 y 9.85), con el firme propósito de ajustarse a los lineamientos de la AWWA, se identifica que la diferencia actual no puede ser corregida únicamente mediante el ajuste de rugosidad de las tuberías.

De tal manera que, el segundo escenario se fundamenta a más de ajustar el coeficiente de rugosidad en la identificación de pérdidas de carga en los accesorios de control, como ajustar las pérdidas de carga en válvulas de operación de cada subsector. En sistemas de distribución con años de servicio, como es el caso del sector Cruz Verde 2 (4B2), las

válvulas de compuerta o mariposa puede presentar un cierre parcial debido a la acumulación de sedimentos o desgaste mecánico, en este caso actuarían como una restricción en el flujo no contabilizado en el modelo teórico inicial.

Metodología de ajuste

Se integrarán coeficientes de pérdida local en las válvulas de entrada a los subsectores en donde se registran mayores desviaciones, para el caso de estudio se consideran los subsectores 2, 3, 3a, 5 y 12.

Según (Mays, 2010), las pérdidas menores en accesorios y válvulas son a menudo ignoradas en modelos de planeación, pero resultan críticas en la calibración de modelos operativos.

Para el caso en estudio las válvulas de control de ingreso a cada subsector descrito anteriormente se consideran abiertas 1/4 y a ½ de su capacidad total, valor que se ingresa manualmente en las propiedades de cada accesorio, como se muestra a continuación:

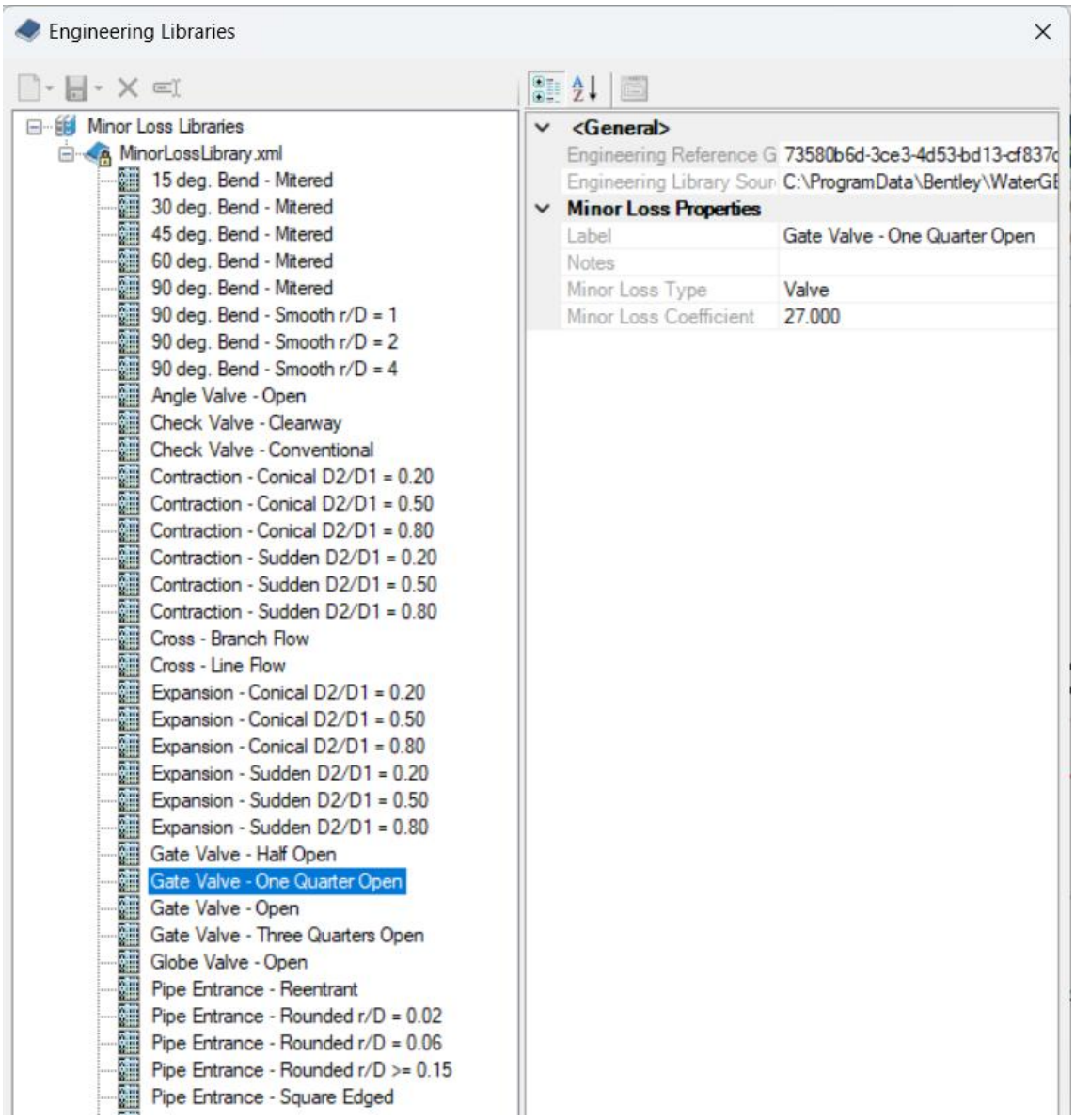


Ilustración 29. Representación de pérdida de carga por apertura parcial.

Fuente: Autor.

Se integró una pérdida localizada en los nodos correspondientes a las válvulas de operación, de los subsectores seleccionados simulando la resistencia hidráulica de una apertura de un cuarto y de media. Este valor se fundamenta en la necesidad de asimilar la caída de presión crítica observada en campo.

Los resultados del escenario 2, son los que se describen a continuación:

Solution | Simulated Results

Simulated Results Browser

Attribute:
Hydraulic Grade
Flow

	Snapshot	Hydraulic Grade RMSE (m)
1	Mediciones_06_4B2	3.71
2	Mediciones_12_4B2	2.78
3	Mediciones_15_4B2	3.82

Simulated Results

	Field Data Snapshot	Junction	Observed Hydraulic Grade (m)	Simulated Hydraulic Grade (m)	Difference (m)
1	Mediciones_06_4B2	PP2	2,551.07	2,551.01	-0.05
2	Mediciones_06_4B2	PP3	2,551.89	2,554.27	2.38
3	Mediciones_06_4B2	PP3a	2,564.92	2,561.75	-3.17
4	Mediciones_06_4B2	PP5	2,554.93	2,554.62	-0.30
5	Mediciones_06_4B2	PP7	2,562.76	2,556.79	-5.97
6	Mediciones_06_4B2	PP8	2,573.09	2,578.16	5.07
7	Mediciones_06_4B2	PP9	2,577.70	2,579.35	1.66
8	Mediciones_06_4B2	PP10	2,577.79	2,572.91	-4.89
9	Mediciones_06_4B2	PP12	2,579.53	2,583.13	3.60
10	Mediciones_06_4B2	PP13	2,576.42	2,571.84	-4.58
11	Mediciones_12_4B2	PP2	2,547.56	2,551.01	3.45
12	Mediciones_12_4B2	PP3	2,550.48	2,554.27	3.79
13	Mediciones_12_4B2	PP3a	2,560.89	2,561.75	0.85
14	Mediciones_12_4B2	PP5	2,551.79	2,554.62	2.84
15	Mediciones_12_4B2	PP7	2,557.14	2,556.79	-0.35
16	Mediciones_12_4B2	PP8	2,577.55	2,578.16	0.61
17	Mediciones_12_4B2	PP9	2,577.70	2,579.35	1.66
18	Mediciones_12_4B2	PP10	2,574.75	2,572.91	-1.84
19	Mediciones_12_4B2	PP12	2,577.42	2,583.13	5.71
20	Mediciones_12_4B2	PP13	2,570.10	2,571.84	1.74
21	Mediciones_15_4B2	PP2	2,546.86	2,551.01	4.15
22	Mediciones_15_4B2	PP3	2,550.48	2,554.27	3.79
23	Mediciones_15_4B2	PP3a	2,562.29	2,561.75	-0.54
24	Mediciones_15_4B2	PP5	2,547.91	2,554.62	6.71
25	Mediciones_15_4B2	PP7	2,560.66	2,556.79	-3.87
26	Mediciones_15_4B2	PP8	2,574.04	2,578.16	4.12
27	Mediciones_15_4B2	PP9	2,574.89	2,579.35	4.46
28	Mediciones_15_4B2	PP10	2,574.75	2,572.91	-1.84
29	Mediciones_15_4B2	PP12	2,579.53	2,583.13	3.60
30	Mediciones_15_4B2	PP13	2,572.90	2,571.84	-1.07

Ilustración 30. Resultados de cargas hidráulicas observadas y simuladas, ajuste del coeficiente de rugosidad - Simulación 2.

Fuente: Autor.

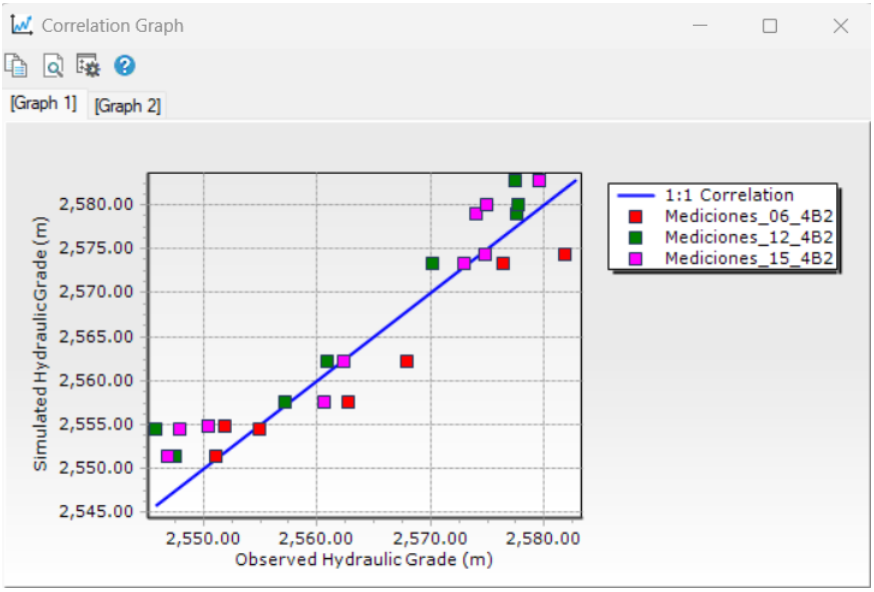


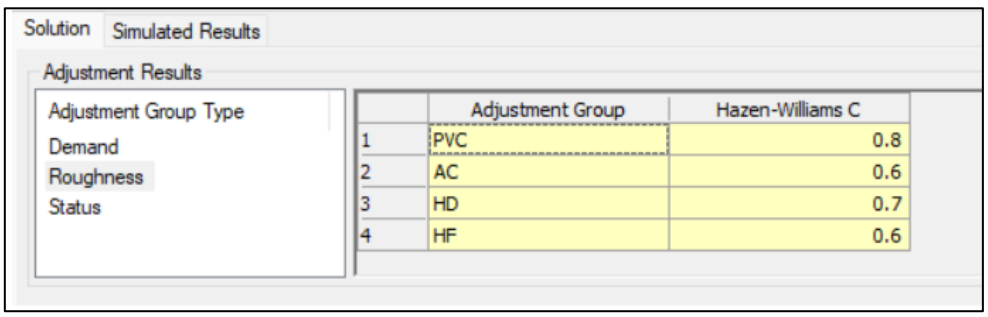
Ilustración 31. Cargas observadas y simuladas y su correlación obtenida en la simulación 2.

Fuente: Autor.

La ilustración 31, muestra la correlación entre las presiones registradas en campo y las obtenidas mediante la simulación 2.

Con los ajustes descritos, en la simulación 2, se ha alcanzado un valor de RMSE promedio igual a 3.44 m, alineándose con los criterios recomendados con la norma AWWA. Este valor establece una línea base técnica aceptable, permitiendo que el modelo refleje con fidelidad el comportamiento dinámico de la red bajo las condiciones operativas actuales.

Los coeficientes de rugosidad resultantes de la calibración en el escenario 2, disminuyeron en comparación con los valores iniciales, los mismos se ajustan a materiales que presentan un desgaste significativo por el período de servicio del sistema.



	Adjustment Group	Hazen-Williams C
1	PVC	0.8
2	AC	0.6
3	HD	0.7
4	HF	0.6

Ilustración 32. Factor de reducción del coeficiente de rugosidad, solución 2.

Fuente: Autor.

2.83 Validación del modelo hidráulico

Una vez realizada la calibración del modelo hidráulico, el siguiente paso indispensable es validarlo, con ello se puede comprobar que los datos obtenidos reflejen el funcionamiento real de la red de distribución en el sector Cruz Verde 2, lo que permitirá usar el modelo para planificar mejoras o evaluar la operación del sistema. De esta manera la validación se realizó mediante una simulación 3, donde se considera los valores ajustados del coeficiente de rugosidad, así como las pérdidas de carga en diferentes válvulas de cada sector.

En la validación se consideraron los datos de presión medidos en campo, de los nodos PP1, PP4, PP6, PP11 y PP14 seleccionados de un total de 14 puntos, debido a su ubicación estratégica, con desniveles de aproximadamente 15 m entre un punto y otro, que permite abarcar todo el rango de elevaciones del proyecto, logrando que los datos de presión seleccionados sean una muestra representativa de toda la red.

Bajo las consideraciones descritas, en la ilustración 33, se presentan los resultados obtenidos en la simulación 3.

Solution | Simulated Results

Simulated Results Browser

Attribute:
Hydraulic Grade
Flow

	Snapshot	Hydraulic Grade RMSE (m)
1	Mediciones 06_4B2	1.36
2	Mediciones 12_4B2	2.38
3	Mediciones 15_4B2	3.91

Simulated Results

	Field Data Snapshot	Junction	Observed Hydraulic Grade (m)	Simulated Hydraulic Grade (m)	Difference (m)
1	Mediciones 06_4B2	PP1	2,552.19	2,551.04	-1.15
2	Mediciones 06_4B2	PP4	2,553.50	2,551.06	-2.44
3	Mediciones 06_4B2	PP6	2,579.95	2,579.64	-0.31
4	Mediciones 06_4B2	PP11	2,585.80	2,585.63	-0.17
5	Mediciones 12_4B2	PP1	2,547.99	2,551.04	3.05
6	Mediciones 12_4B2	PP4	2,551.40	2,551.06	-0.34
7	Mediciones 12_4B2	PP6	2,577.14	2,579.64	2.51
8	Mediciones 12_4B2	PP11	2,583.00	2,585.63	2.63
9	Mediciones 15_4B2	PP1	2,545.18	2,551.04	5.86
10	Mediciones 15_4B2	PP4	2,547.88	2,551.06	3.18
11	Mediciones 15_4B2	PP6	2,575.74	2,579.64	3.90
12	Mediciones 15_4B2	PP11	2,584.42	2,585.63	1.22

Ilustración 33. Resultados de la validación. Simulación 3.

Fuente: Autor.

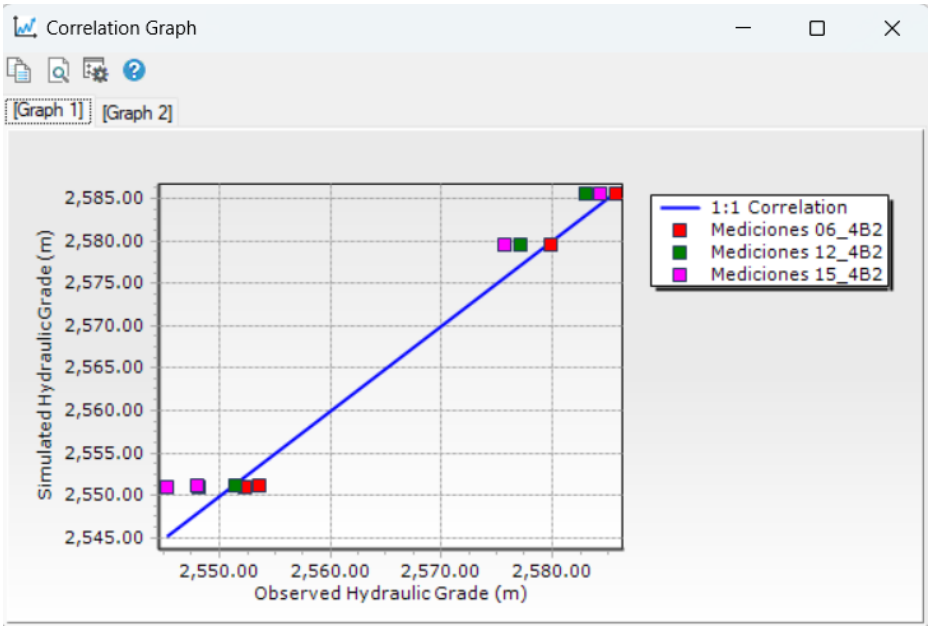


Ilustración 34. Cargas observadas y simuladas y su correlación obtenida en la validación.

Fuente: Autor

Según se muestra en la Ilustración 33, una vez realizada la simulación, el valor promedio del RMSE es de 2.55 estando dentro del rango recomendado para considerarse un modelo calibrado.

En consecuencia, se considera validado el modelo hidráulico, para su aplicación en las fases siguientes de simulación y propuestas de optimización.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS, IDENTIFICACIÓN DE FUGAS EN LA RED DE AGUA POTABLE.

3.1 Análisis de la calibración del modelo hidráulico

La calibración del modelo hidráulico es una de las etapas más importantes dentro del proceso de modelación de una red de distribución de agua potable, ya que permite reproducir de manera confiable las condiciones reales de operación del sistema. En el presente estudio, el proceso de calibración se desarrolló mediante la herramienta Darwin Calibrator del software WaterGEMS, utilizando como variables de ajuste los coeficientes de rugosidad de las tuberías y las pérdidas de carga asociadas a los accesorios de control existentes en la red de distribución.

Para la caracterización del modelo hidráulico base del sector Cruz Verde 2, perteneciente al sistema de abastecimiento Tomebamba de la empresa pública ETAPA EP, la asignación de caudales se ejecutó mediante la distribución espacial del consumo facturado durante el mes de marzo de 2025, a través de la herramienta LoadBuilder del software WaterGEMS, empleando el método del nodo más cercano, considerando un total de 10347 conexiones activas, con un volumen total registrado de 204867.93 m3/mes, lo que equivale a un caudal neto de consumo de 76.49 l/s. De acuerdo con la información proporcionada por la empresa ETAPA EP, el porcentaje de agua no contabilizada general o pérdidas generales para el sistema Tomebamba en el período en análisis se definió en un 31%, correspondiente a la diferencia entre el volumen total inyectado y el volumen total facturado, dando como resultado un factor de mayoración de 1.45 litros para compensar el volumen perdido en todo el sistema, totalizando un caudal de diseño de 110.38 l/s para el sector Cruz Verde 2.

Luego de realizar el ajuste del coeficiente de rugosidad para cada tipo de tubería, el modelo hidráulico en la simulación 1, dio como resultado un error medio cuadrático (RMSE) de 4.64 m.c.a para las 06:00, 5.51 m.c.a para las 12:00 y 5.86 para las 15:00, de manera que al evaluar estos resultados bajo los estándares de internacionales de la American Water Works Association, la cual establece un umbral técnico de tolerancia máximo +- 3.5 para que un modelo sea apto para planificación, bajo este criterio el escenario se considera fuera de rango o en condición de desviación moderada. La red simulada evidenció una clara tendencia a la sobrepresión en los nodos de las zonas bajas

en comparación con la realidad física, registrándose diferencias de hasta 9.85 m.c.a como es el caso del subsector 3a, durante los horarios de 12:00 y 15:00.

El análisis de la primera calibración evidenció además una tendencia del modelo a sobreestimar las presiones en determinados puntos de control, especialmente en los sectores de menor cota topográfica, este comportamiento indicó que la caída de presión real en campo no podía justificarse de forma exclusiva por la fricción lineal de las tuberías.

Como consecuencia se desarrolló un segundo escenario de calibración en donde se consideró un desgaste severo de algunos materiales como consecuencia del período de vida útil del sistema, incorporando también pérdidas localizadas en las válvulas de operación de los subsectores que registraban mayores diferencias entre las presiones simuladas y observadas.

En este sentido para corregir la sobrepresión del modelo hidráulico, se ajustó el coeficiente de rugosidad de las tuberías y se identificó la necesidad de integrar coeficientes de pérdida local debido al cierre parcial de válvulas de operación especialmente aquellas que sirven de ingreso a los subsectores 2, 3, 3a, 5 y 12, así, con ello simular también la acumulación de sedimentos o fallas mecánicas.

Con las consideraciones descritas el RMSE resultante para el segundo escenario, es de 3.71 m.c.a para las 06:00, 2.78 m.c.a para las 12:00 y 3.82 para las 15:00, de manera que si se toma un promedio para los 3 horarios se obtiene un RMSE de 3.47 m.c.a, logrando el nivel de calibración requerido por la norma AWWA M32.

La validación del modelo hidráulico se desarrolló bajo los mismos criterios y parámetros de pérdidas establecidas en el escenario 2, pero considerando los puntos de control de presión de los subsectores PP1, PP4, PP6, PP11 y PP14, en el proceso de validación el RMSE resultante es de 1.36 para las 06H00, de 2.38 a las 12H00, y de 3.91 para las 15H00, obteniendo un RMSE promedio de 2.76 m.c.a.

En consecuencia, el modelo calibrado constituye una herramienta técnica confiable para analizar el comportamiento hidráulico del sector Cruz Verde 2, permitiendo identificar zonas donde las diferencias de presión podrían estar relacionadas con pérdidas físicas de agua.

3.2 Identificación de zonas con mayor probabilidad de pérdidas físicas de agua.

A partir de los resultados de la calibración y validación del modelo hidráulico en periodo extendido y el comportamiento de las presiones resultantes, se identificaron de manera analítica los sectores con alta vulnerabilidad a pérdidas físicas reales (fugas).

Es importante señalar que la incorporación de pérdidas localizadas durante el proceso de calibración no demuestra por sí sola la existencia de una fuga de agua. La pérdida de carga adicional representa un parámetro de ajuste del modelo que puede estar asociado al estado de operación de válvulas, obstrucciones parciales, incrustaciones o pérdidas físicas presentes en la red. Sin embargo, considerando que estos sectores fueron los únicos que requirieron dicho ajuste para lograr una adecuada representación del comportamiento hidráulico, se los identifica como zonas con mayor probabilidad de presentar pérdidas físicas de agua.

El análisis del modelo hidráulico determinó que los focos de fugas se concentran en los siguientes puntos dentro de los subsectores correspondientes:

- Subsectores 3 y 3a, en estos puntos se detectó la presencia de fugas de carácter continuo. El modelo hidráulico calibrado demostró que durante las horas de máxima demanda (12:00 y 15:00), las lecturas de presión tomadas en campo en los puntos PP3 Y PP3a, registran caídas de presión críticas que no pueden ser justificadas únicamente por la fricción lineal de las tuberías ni por pérdidas asociadas al cierre parcial de las válvulas de frontera. Este comportamiento fuera de lo normal denota un egreso constante de caudal no facturado que puede ser provocado por roturas ocultas o fallas en las juntas de la red de distribución.

- Bajo este criterio, la ubicación de las válvulas de ingreso a los subsectores 2, 3, 3a, 5 y 12 representan las zonas prioritarias para la ejecución de campañas de detección de fugas mediante geófonos, correladores acústicos u otras técnicas de inspección empleadas por la empresa prestadora del servicio de agua potable.

CAPITULO 4: PROPUESTA DE MEJORA DEL MODELO DE LA RED DE AGUA POTABLE DEL SECTOR CRUZ VERDE 2.

4.1 Objetivo de la propuesta

La presente propuesta tiene como finalidad establecer un conjunto de acciones técnicas orientadas a disminuir las pérdidas físicas de agua en el sistema de distribución del sector Cruz Verde 2, tomando como base los resultados obtenidos durante la calibración del modelo hidráulico desarrollado.

La propuesta se plantea considerando que un modelo hidráulico calibrado no constituye únicamente una herramienta para representar el comportamiento de una red de distribución, sino también una herramienta para apoyar la toma de decisiones relacionadas con la operación, mantenimiento y control de pérdidas de agua. En este contexto, los sectores identificados durante el proceso de calibración como zonas con comportamiento hidráulico extraño constituyen la base para definir las prioridades de intervención.

4.2 Priorización de sectores para la detección de fugas

Los resultados obtenidos durante la calibración hidráulica permitieron identificar cinco subsectores donde fue necesario incorporar pérdidas de carga localizadas para reproducir adecuadamente las presiones medidas en campo. Bajo este criterio, dichos sectores fueron considerados como prioritarios para la ejecución de campañas de detección de pérdidas físicas.

La priorización propuesta no implica que las fugas se encuentren exactamente en las válvulas de ingreso, sino que se identifican como áreas de inspección los tramos comprendidos entre las válvulas de operación y los puntos de control de presión de cada subsector.

Considerando el comportamiento hidráulico observado durante la calibración, el subsector 3a presenta la mayor prioridad de intervención, debido a que registró las mayores diferencias entre las presiones simuladas y observadas. Los subsectores 3 y 5 constituyen el segundo nivel de prioridad, mientras que los subsectores 2 y 12 deberán ser incorporados dentro del programa de inspección preventiva de la red.

4.3 Estrategias de mejora

Las acciones propuestas a continuación buscan fortalecer la gestión de pérdidas de agua mediante intervenciones preventivas y correctivas orientadas a incrementar la eficiencia hidráulica de la red.

4.3.1 Priorización de campañas de detección de fugas

Se propone que los sectores 2, 3, 3ª, 5 y 12 sean considerados como áreas prioritarias para la ejecución de campañas de detección de fugas.

Las inspecciones deberán iniciarse en los tramos comprendidos entre las válvulas de ingreso de cada subsector y los puntos de control de presión, debido a que en estas zonas el modelo presentó las mayores discrepancias hidráulicas. La aplicación de equipos como geófonos, correladores acústicos o registradores de ruido permitirá verificar si las anomalías detectadas mediante la modelación corresponden efectivamente a pérdidas físicas de agua.

4.3.2 Fortalecimiento del mantenimiento preventivo de válvulas

Se propone implementar un programa periódico de inspección y mantenimiento preventivo de válvulas, que considere la verificación de su grado de apertura, estado mecánico, hermeticidad y condiciones de operación. Estas actividades permitirán reducir pérdidas de carga innecesarias y garantizar un funcionamiento hidráulico acorde con las condiciones consideradas en el modelo.

4.3.3 Monitoreo permanente de presiones y actualización del modelo hidráulico

Las condiciones de funcionamiento de una red de distribución cambian continuamente debido al crecimiento de la demanda, incorporación de nuevos usuarios, renovación de infraestructura y variaciones en las condiciones de operación.

Por este motivo, se propone establecer un programa permanente de monitoreo de presiones, complementado con la actualización periódica del modelo hidráulico. La comparación continua entre los datos medidos en campo y los resultados simulados permitirá identificar oportunamente nuevas anomalías hidráulicas y mejorar la planificación de actividades de mantenimiento e inversión.

4.4.4 Renovación progresiva de la infraestructura hidráulica

Los resultados obtenidos durante la calibración evidenciaron que las tuberías metálicas presentaron una disminución significativa en sus coeficientes de rugosidad respecto a los valores teóricos iniciales, comportamiento asociado al envejecimiento de la infraestructura y a la presencia de procesos de corrosión e incrustación. Estas condiciones incrementan las pérdidas de carga y pueden favorecer la aparición de pérdidas físicas en la red.

En este sentido, se propone que la empresa prestadora del servicio incorpore dentro de sus programas de inversión la renovación progresiva de los tramos de tubería que presenten mayor antigüedad o que hayan sido identificados como críticos mediante el modelo hidráulico. La sustitución de estas tuberías permitirá mejorar la capacidad hidráulica del sistema, disminuir la probabilidad de roturas y contribuir a la reducción del porcentaje de Agua No Contabilizada.

CONCLUSIONES

La actualización de la topología de la red, la asignación de demandas a partir de la micromedición y la incorporación del patrón horario de consumo permitieron desarrollar un modelo hidráulico que representa el comportamiento operativo del sector Cruz Verde 2, siendo una base confiable para el análisis de la red.

El proceso de calibración demostró que el ajuste de los coeficientes de rugosidad por sí solo no fue suficiente para reproducir las presiones medidas en campo. La incorporación de pérdidas de carga en las válvulas de operación permitió reducir las diferencias de presión entre los valores observados y simulados, demostrando que estos elementos tienen una influencia significativa en el comportamiento hidráulico del sistema.

Los coeficientes de rugosidad obtenidos al finalizar la calibración estuvieron de acorde con el material y la antigüedad de las tuberías, representando de manera adecuada las condiciones reales de funcionamiento de la red y permitiendo mejorar el ajuste del modelo hidráulico.

La disminución progresiva del Error Medio Cuadrático (RMSE) durante las diferentes etapas de calibración ratifica que el modelo reproduce satisfactoriamente las condiciones de operación del sistema, por lo que representa una herramienta técnica confiable para evaluar el comportamiento hidráulico de la red y analizar escenarios de operación.

RECOMENDACIONES

La empresa prestadora del servicio de agua potable ETAPA EP, deberá:
Mantener actualizado el modelo hidráulico del sistema de distribución, mediante la incorporación de las modificaciones que se realicen en la red, así como de nuevos registros de presión y caudal, con el fin de conservar su representatividad y confiabilidad.

Realizar campañas periódicas de medición de presiones y caudales en diferentes condiciones de operación, ya que una mayor cantidad de información obtenida en campo permite mejorar los procesos de calibración y reducir la incertidumbre de las simulaciones.

Verificar periódicamente el estado operativo de las válvulas de control y de operación, debido a que su condición influye directamente en la distribución de presiones y en las pérdidas de carga del sistema.

Utilizar el modelo hidráulico calibrado como una herramienta de apoyo para la planificación de intervenciones, evaluación de alternativas de operación, sectorización e identificación de zonas con posibles problemas hidráulicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCA, A. de R. y C. del A. (2025). Documento técnico de agua no contabilizada (ANC).

AWWA, A. W. W. A. (2012). Manual of Water Supply Practices (3rd ed.). American Water Works Association.

Azevedo Netto, J. M. de, Acosta Álvarez, G., Melo Porto, R. de, & Rocha, B. G. (1998). Manual de Hidráulica. McGraw-Hill Interamericana.

Bentley. (2022). WaterGEMS CONNECT Edition. Bently Systems, Inc.

Boulos, P. F., Lansey, K. E., & Karney, B. W. (2006). Comprehensive Water Distribution Systems Analysis Handbook for Engineers and Planners (2nd. Edition). MWH Soft Press.

Cazar, F. E., & Serpa, E. A. (2022). Simulación del Comportamiento de la Red de Distribución de Agua Potable del sector Cebollar 3.2 Sur a través de un Modelo Hidráulico para el Análisis de Vulnerabilidades Operativas del Sistema. Universidad del Azuay.

Çengel, Y. A. ., & Cimbala, J. M. . (2012). Mecánica de fluidos : fundamentos y aplicaciones (2nd ed.). McGraw Hill.

Chaudhry, M. Hanif. (2014). Applied hydraulic transients (3rd ed.). Springer.

Comisión Nacional del Agua. (2015). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado.

González-Ramírez, E. A., & Bejarano-Salazar, E. (2019). Sistemas de información geográfica y modelado hidráulico de redes de abastecimiento de agua potable: estudios de caso en la provincia de Guanacaste, Costa Rica. Revista Geográfica de América Central, 2(63), 293–318. https://doi.org/10.15359/rgac.63-2.11

INEC, I. N. de E. y C. (2024). Proyecciones Poblacionales – Revisión 2024.

Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias. (1992). Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes (CO 10.07-601).

Lambert, A. H. W. (2000). Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures.

López Cualla, R. Alfredo. (2003). Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. Escuela Colombiana de Ingeniería .

Mays, L. W. (2010). Water transmission and distribution (Asociación Estadounidense de Obras Hidráulicas, Ed.; 4th ed.). American Water Works Association.

Mott, R. L., & Untener, J. A. (2015). Mecánica de fluidos. Pearson Educación.

Rueda Meza, E. J., González Carrillo, B. D., Delgado Yánez, M. S., & Paredes Méndez, D. F. (2025). Métodos de Intervención Centrales para Combatir Pérdidas Reales y

Aparentes de Agua en Sistemas de Distribución. INGENIO, 8(1), 52–70. https://doi.org/10.29166/ingenio.v8i1.6789

Saldarriaga, J. G. (2019). Hidráulica de tuberías: Abastecimiento de agua, redes y riegos (4th ed.). Alfaomega.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2007). Global Sensitivity Analysis. The Primer. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470725184

Savic, D. A., Kapelan, Z. S., & Jonkergouw, P. M. R. (2009). Quo vadis water distribution model calibration? Urban Water Journal, 6(1), 3–22. https://doi.org/10.1080/15730620802613380

UNESCO. (2003). Water for people, water for life. UNESCO Publishing.

Walski, T. M. ., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W. M., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). Advanced water distribution modeling and management. Haestad Press.

White, F. (2008). Mecánica de Fluidos (6th ed.). McGraw-Hill Interamericana de España S.L.

ANEXOS

Manual de operación

Plano del sistema de distribución sector 4B2_2025

Modelo hidráulico de la red de distribución 4B2.