



**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 1**

**Trabajo previo a la obtención del título de:  
MÁSTER EN HIDROSANITARIA**

**Autores:  
Edisson Xavier Mejía Cornejo**

**Director:  
Ing. Verónica Chumi Buenaño  
Cuenca - Ecuador**

**2026**

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad del Azuay por la formación recibida en este programa de posgrado.

Agradezco de manera especial a la Ing. Verónica Chumi, directora de tesis, por su excelente guía, criterio técnico y por compartir sus conocimientos profesionales en el área hidrosanitaria, siendo un apoyo fundamental para el desarrollo de esta investigación.

Edisson Xavier Mejía Cornejo

## DEDICATORIA

Dedico este esfuerzo, fruto de años de estudio, dedicación y perseverancia, a mi familia, quienes han sido el motor que impulsó cada paso de este camino.

A mi esposa, Viviana, por su amor, paciencia, comprensión y apoyo incondicional durante cada etapa de este desafío. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por acompañarme siempre con fortaleza y confianza.

A mis hijos, Alexis y Emilia, quienes son la mayor inspiración de mi vida. Cada logro alcanzado tiene como propósito brindarles un ejemplo de esfuerzo, perseverancia y superación. Ustedes son la razón que me motiva a seguir creciendo tanto en lo personal como en lo profesional.

A mi padre Miguel, quien hoy me acompaña desde el cielo, dedico de manera muy especial este trabajo. Él fue el pilar fundamental que despertó en mí la pasión por esta rama de la ingeniería y sembró los valores del esfuerzo, la responsabilidad y la honestidad que han guiado mi vida. Aunque ya no esté físicamente conmigo, su legado permanece en cada una de mis metas y logros. Este trabajo también es suyo.

A mi madre, por su amor infinito, sus enseñanzas y su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida. Gracias por ser un ejemplo de fortaleza, sacrificio y dedicación, y por estar siempre presente brindándome ánimo para alcanzar cada uno de mis sueños.

Con profundo cariño y gratitud, dedico este logro a ustedes, porque son la razón y el fundamento de cada meta alcanzada.

**Edisson Xavier**

## RESUMEN

La presente investigación desarrolló un modelo hidráulico del sector Cruz Verde 1, perteneciente al sistema Tomebamba de la ciudad de Cuenca, con el objetivo de analizar el comportamiento hidráulico de la red y apoyar la identificación de posibles fugas. El modelo fue construido en WaterGEMS utilizando información de micro medición, catastro de redes, registros de presión y datos históricos de fugas proporcionados por ETAPA EP. La calibración se realizó mediante simulaciones en período extendido y ajustes de rugosidad y válvulas operativas. Los resultados permitieron identificar subsectores con mayor incidencia de fugas y evidenciaron la utilidad de la modelación hidráulica como herramienta de apoyo para la gestión de pérdidas de agua potable.

**Palabras clave:** Modelación hidráulica, agua no contabilizada , calibración hidráulica, redes de distribución, detección de fugas, WaterGEMS

## ABSTRACT

This research developed a hydraulic model for the Cruz Verde 1 sector, belonging to the Tomebamba system in the city of Cuenca, with the objective of analyzing the hydraulic behavior of the network and supporting the identification of possible leaks. The model was built in WaterGEMS using micro-metering data, network cadastre information, pressure records, and historical leak data provided by ETAPA EP. Calibration was performed through extended period simulations and adjustments of pipe roughness and operational valves. The results allowed the identification of subsectors with a higher incidence of leaks and demonstrated the usefulness of hydraulic modeling as a support tool for water loss management in drinking water distribution systems.

**Keywords:** Hydraulic modeling, non-revenue water, hydraulic calibration, distribution networks, leak detection, WaterGEMS

## TABLA DE CONTENIDO

### Contenido

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| AGRADECIMIENTOS .....                                                             | 2  |
| RESUMEN .....                                                                     | 4  |
| ABSTRACT .....                                                                    | 5  |
| TABLA DE CONTENIDO .....                                                          | 6  |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....                                                     | 9  |
| 1. INTRODUCCIÓN .....                                                             | 10 |
| 1.1. ANTECEDENTES .....                                                           | 11 |
| 1.2. OBJETIVOS .....                                                              | 13 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                | 13 |
| 2. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE .....                                          | 14 |
| 2.1. EL AGUA COMO RECURSO PRIMARIO .....                                          | 14 |
| 2.2. REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE .....                                  | 15 |
| 2.3. PÉRDIDAS DE AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.....                               | 16 |
| 2.4. FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE .....                         | 18 |
| 2.5. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE ..... | 19 |
| 2.6. MODELACIÓN HIDRÁULICA APLICADA A LA DETECCIÓN DE FUGAS .....                 | 20 |
| 3. METODOLOGIA Y CONSTRUCCIÓN DE MODELO HIDRÁULICO .....                          | 22 |
| 3.1. AREA DE ESTUDIO .....                                                        | 23 |
| 3.2. INFORMACIÓN BASE Y FUENTES DE DATOS .....                                    | 24 |
| 3.2.1. INFORMACIÓN DE INFRAESTRUCTURA DE LA RED .....                             | 24 |
| 3.2.2. INFORMACIÓNN TOPOGRAFICA.....                                              | 25 |
| 3.2.3. INFORMACIÓN DE DEMANDA Y CONSUMOS.....                                     | 25 |
| 3.2.4. INFORMACIÓN DE OPERACIÓN DEL SECTOR .....                                  | 26 |
| 3.3. CONSTRUCCION DEL MODELO HIDRÁULICO.....                                      | 26 |
| 3.3.1. REPRESENTACIÓN DE LA RED .....                                             | 27 |
| 3.3.2. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS .....                                 | 27 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.3. CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN EN PERÍODO EXTENDIDO .....      | 27 |
| 3.3.4. VERIFICACIÓN INICIAL DEL MODELO .....                          | 28 |
| 3.4. ASIGNACIÓN DE DEMANDAS Y PATRONES DE CONSUMO .....               | 28 |
| 3.4.1. REGISTRO DE USUARIOS Y CONSUMOS DEL SECTOR.....                | 28 |
| 3.4.2. DEFINICIÓN DEL PATRÓN HORARIO DE CONSUMO .....                 | 31 |
| 3.4.3. SECTORIZACIÓN INTERNA Y UBICACIÓN DE SENSORES DE PRESIÓN ..... | 33 |
| 3.5. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO.....                           | 39 |
| 3.5.1. DISTRIBUCIÓN DE FUGAS .....                                    | 40 |
| 3.5.2. PRESIONES.....                                                 | 43 |
| 3.5.3. AJUSTE DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS.....                          | 46 |
| 3.5.4. VALIDACION DEL MODELO HIDRÁULICO .....                         | 49 |
| 3.6. VERIFICACIÓN ESPACIAL CON REGISTROS DE FUGAS .....               | 50 |
| 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DETECCIÓN DE POSIBLES FUGAS .....         | 52 |
| 4.1. EVALUACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO CALIBRADO.....                  | 52 |
| 4.2. ANÁLISIS ESPACIAL DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO .....            | 52 |
| 4.3. IDENTIFICACIÓN DE SUBSECTORES CRÍTICOS .....                     | 54 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                               | 55 |
| 5.1. CONCLUSIONES .....                                               | 55 |
| 5.2. RECOMENDACIONES.....                                             | 56 |
| 5.3. BIBLIOGRAFÍA .....                                               | 58 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Esquema metodológico para la detección de fugas mediante modelación hidráulica .....    | 22 |
| Tabla 2 Datos área de estudio .....                                                              | 24 |
| Tabla 3 Infraestructura de la red.....                                                           | 25 |
| Tabla 4. Conexiones año 2025 .....                                                               | 30 |
| Tabla 5. Indicador de agua no contabilizada del Sistema Tomebamba .....                          | 31 |
| Tabla 6. Ajuste de demanda considerando agua no contabilizada .....                              | 31 |
| Tabla 7. Patrón de consumo horario para un día de la reserva Cruz Verde 4B1 .....                | 32 |
| Tabla 8. Criterios para valorar la calibración de modelos sugerido por Walski et al (2007) ..... | 40 |
| Tabla 9. Distribución de fugas .....                                                             | 41 |
| Tabla 10. Registro de presiones .....                                                            | 43 |
| Tabla 11. Rugosidades iniciales y ajustadas luego de la calibración - simulación 2 .....         | 49 |
| Tabla 12. Subsectores para validación del modelo. ....                                           | 49 |



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. Área de estudio Cruz Verde 1 .....                                            | 24 |
| Ilustración 2. Mapa de subsectores del sector Cruz Verde 1.....                              | 26 |
| Ilustración 3. Usuarios dentro del sector Cruz Verde 1 .....                                 | 29 |
| Ilustración 4. Tipo de consumo 2025 .....                                                    | 30 |
| Ilustración 5. Consumo distribuido en WaterGems.....                                         | 31 |
| Ilustración 6. Variación de demanda vs presión. ....                                         | 33 |
| Ilustración 7. Puntos de registro de presión.....                                            | 34 |
| Ilustración 8. Curvas de variación de presión registradas en los subsectores .....           | 39 |
| Ilustración 9. Presión media, modelo inicial. ....                                           | 42 |
| Ilustración 10. Selección de los 80 nodos, dentro del modelo hidráulico. ....                | 42 |
| Ilustración 11. Registro de presiones en subsectores para calibración .....                  | 44 |
| Ilustración 12. Simulación inicial.....                                                      | 45 |
| Ilustración 13. Correlación entre cargas hidráulicas observadas y simuladas en Darwin .....  | 45 |
| Ilustración 14. Resultados de la segunda simulación. (Calibración).....                      | 47 |
| Ilustración 15. Correlación entre cargas hidráulicas observadas y simuladas (Simulación 2) . | 47 |
| Ilustración 16. Resultados de validación. ....                                               | 50 |
| Ilustración 17. Puntos geofonados en Cruz Verde 1 .....                                      | 51 |
| Ilustración 18. Zonas de presión de Cruz Verde 1. ....                                       | 53 |
| Ilustración 19. Relación entre fugas registradas y zonas de presión elevadas.....            | 54 |

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente de los sistemas de distribución de agua potable constituye uno de los principales desafíos para las empresas operadoras de servicios de agua en zonas urbanas. A pesar de los avances tecnológicos en el monitoreo y control de redes, una parte significativa del agua producida no llega a ser consumida por los usuarios finales debido a pérdidas que ocurren dentro de los sistemas de distribución. Estas pérdidas, conocidas como agua no contabilizada, pueden estar asociadas a fugas en las tuberías, fallas en la medición, conexiones no registradas u otros factores operativos.

En redes de distribución urbanas consolidadas, la detección de fugas representa una tarea compleja debido a la extensión de las redes, la heterogeneidad de los materiales de las tuberías y la limitada visibilidad de muchas pérdidas que ocurren de manera subterránea. En este contexto, la modelación hidráulica se ha convertido en una herramienta técnica de gran utilidad para analizar el comportamiento de los sistemas de distribución y apoyar la identificación de zonas con posibles pérdidas de agua.

La modelación hidráulica permite representar el funcionamiento de la red mediante simulaciones que integran información de infraestructura, demandas de consumo y condiciones de operación. Cuando estos modelos son calibrados adecuadamente utilizando mediciones de campo, como registros de presión y caudal, es posible evaluar el desempeño hidráulico del sistema e identificar anomalías que podrían estar asociadas a la presencia de fugas.

En la ciudad de Cuenca, el servicio de agua potable es operado por la Empresa Pública Municipal ETAPA EP, la cual administra un sistema de distribución complejo que abastece a diversos sectores urbanos. Dentro de este sistema, el sector Cruz Verde 1, perteneciente al sistema Tomebamba, presenta características representativas de redes urbanas consolidadas, tales como variaciones topográficas, ampliaciones progresivas de la red y la coexistencia de tuberías de distintas edades y materiales.

En este contexto, la presente investigación propone el desarrollo de un modelo hidráulico del sector Cruz Verde 1, utilizando información de micro medición, registros de presión y datos de infraestructura proporcionados por la empresa operadora. El

Edisson Xavier Mejía Cornejo

modelo fue calibrado siguiendo criterios técnicos recomendados por la American Water Works Association (AWWA), con el objetivo de representar de manera adecuada el comportamiento hidráulico del sistema.

A partir del modelo calibrado se realizó un análisis del comportamiento de presiones y demandas dentro del sector, identificando subsectores con posibles anomalías hidráulicas. Posteriormente, estos resultados fueron comparados con registros históricos de fugas disponibles en formato geoespacial, con el fin de evaluar la correspondencia entre las zonas críticas identificadas por el modelo y los eventos de fuga registrados en la red.

Los resultados de este estudio buscan aportar herramientas de análisis que contribuyan a mejorar la gestión de pérdidas de agua en redes de distribución y apoyar los procesos de planificación y operación del sistema de agua potable administrado por ETAPA EP.

### **1.1. ANTECEDENTES**

La gestión de pérdidas de agua en sistemas de distribución ha sido ampliamente estudiada en las últimas décadas debido a su impacto en la eficiencia operativa de los servicios de agua potable. Diversos estudios han demostrado que una parte significativa del agua producida en los sistemas urbanos se pierde antes de llegar al usuario final, lo que representa un desafío técnico y económico para las empresas operadoras.

En este contexto, la International Water Association (IWA) ha desarrollado metodologías y lineamientos para la gestión del agua no contabilizada, promoviendo estrategias como la sectorización hidráulica, el monitoreo de presiones, la detección activa de fugas y el uso de modelos hidráulicos como herramientas de análisis y planificación.

La modelación hidráulica ha sido utilizada en numerosos estudios para evaluar el comportamiento de redes de distribución de agua potable. Estos modelos permiten simular el funcionamiento del sistema bajo distintas condiciones de demanda y operación, facilitando el análisis de presiones, caudales y pérdidas dentro de la red. Cuando los modelos son calibrados utilizando mediciones de campo, pueden convertirse en herramientas confiables para la toma de decisiones en la gestión del sistema.

Investigaciones previas han demostrado que la comparación entre valores simulados y observados en modelos hidráulicos puede ayudar a identificar anomalías hidráulicas asociadas a la presencia de fugas. En particular, el análisis de diferencias entre presiones simuladas y medidas ha sido utilizado como un indicador para detectar zonas donde podrían existir pérdidas reales dentro de la red.

En el contexto latinoamericano, diversas empresas de agua han incorporado herramientas de modelación hidráulica y sistemas de información geográfica para mejorar el control de pérdidas en redes urbanas. Estas herramientas permiten integrar información de infraestructura, consumos, mediciones de campo y registros históricos de fugas, facilitando la identificación de sectores críticos dentro del sistema.

En la ciudad de Cuenca, la Empresa Pública Municipal ETAPA EP ha desarrollado diferentes iniciativas orientadas a mejorar la gestión del sistema de agua potable, incluyendo la implementación de sistemas de monitoreo, el fortalecimiento de la micro medición y el desarrollo de modelos hidráulicos para el análisis del comportamiento de la red.

En este marco, el presente trabajo se enfoca en aplicar técnicas de modelación hidráulica y análisis de información operativa para evaluar el comportamiento del sistema de distribución en el sector Cruz Verde 1, con el propósito de identificar zonas con mayor probabilidad de presentar fugas y aportar información técnica que contribuya a la gestión del sistema.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Calibrar y validar un modelo hidráulico de la red de agua potable del sector Cruz Verde 1, utilizando WaterGEMS, con el fin de detectar posibles fugas mediante la comparación entre datos reales y simulados.

#### 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 1.
- Desarrollar un modelo hidráulico dinámico de la zona.
- Validar y calibrar el modelo hidráulico de la red de agua potable
- 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 1.

## 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1. EL AGUA COMO RECURSO PRIMARIO

El agua es un recurso natural esencial para la vida, el desarrollo social y el crecimiento económico de las poblaciones. Su disponibilidad, calidad y continuidad en el servicio constituyen factores determinantes para la salud pública, la sostenibilidad ambiental y la adecuada planificación urbana (ONU, 2003). En la actualidad, la gestión eficiente del recurso hídrico se ha convertido en un desafío prioritario para las ciudades, especialmente en contextos de crecimiento poblacional acelerado y de variabilidad climática (Garnier & Holman, 2019).

En este sentido, los sistemas de abastecimiento de agua potable enfrentan una presión creciente como consecuencia del incremento de la demanda, la expansión urbana y los efectos del cambio climático, tales como la alteración de los patrones de precipitación y la reducción de la disponibilidad de fuentes superficiales y subterráneas (Ji et al., 2020). Dentro de este contexto, las redes de distribución de agua potable cumplen un rol fundamental, al constituir el vínculo directo entre la fuente de abastecimiento y el usuario final.

Uno de los principales problemas asociados a la distribución de agua potable es la pérdida de agua durante su transporte, fenómeno que afecta de manera directa la eficiencia del sistema. Estas pérdidas, comúnmente conocidas como agua no contabilizada, representan un desperdicio significativo de un recurso cada vez más limitado, además de generar impactos económicos y operativos para las empresas prestadoras del servicio (EurEau, 2021).

La eficiencia en la distribución de agua potable no debe limitarse únicamente al diseño y a la garantía del suministro continuo, sino que debe orientarse a la optimización del funcionamiento hidráulico de la red, el mantenimiento de presiones adecuadas, la reducción de fugas y la minimización de los costos operativos. En este contexto, la identificación temprana de ineficiencias hidráulicas y de pérdidas reales resulta fundamental para una gestión integral del sistema (Rueda et al., 2025).

Adicionalmente, resulta necesario impulsar la incorporación de herramientas tecnológicas orientadas a la digitalización y al análisis de los sistemas de distribución. Entre estas herramientas, la modelación hidráulica se presenta como un instrumento clave para evaluar el comportamiento de la red, analizar distintos escenarios operativos y apoyar la toma de decisiones técnicas. El uso de modelos hidráulicos permite comprender la interacción entre caudales, presiones y demandas, facilitando la identificación

de anomalías que pueden estar asociadas a fugas u otros problemas propios de la infraestructura hidráulica existente (Pagano & Antonino, 2024).

En consecuencia, la gestión eficiente del agua potable no requiere únicamente inversiones en infraestructura, sino también el desarrollo de metodologías técnicas y tecnológicas que permitan mejorar el desempeño de las redes existentes. En este sentido, el estudio de la eficiencia hidráulica y la reducción de pérdidas en los sistemas de distribución de agua potable se consolidan como aspectos fundamentales para garantizar la sostenibilidad del servicio y la adecuada administración del recurso hídrico (Koppel & Vassiljev, 2008).

## **2.2. REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

Las redes de distribución de agua potable constituyen el conjunto de infraestructuras destinadas a transportar el agua desde los puntos de almacenamiento o regulación hasta los usuarios finales, garantizando condiciones adecuadas de presión, caudal y continuidad del servicio. Su correcto funcionamiento es determinante para la calidad del servicio que reciben las poblaciones y para la eficiencia operativa de las entidades encargadas de su gestión (Mays, 2000).

Desde el punto de vista técnico, una red de distribución está conformada por diversos elementos hidráulicos, entre los que se incluyen tuberías, nodos de consumo, válvulas de control, hidrantes, tanques de almacenamiento y otros dispositivos complementarios. Cada uno de estos componentes cumple una función específica dentro del sistema y su interacción define el comportamiento hidráulico global de la red (Walski et al., 2003). Cualquier alteración en uno de estos elementos puede repercutir directamente en las condiciones de operación del sistema.

El diseño y la operación de las redes de distribución deben considerar múltiples factores, como la topografía del terreno, las características físicas de las tuberías, la variabilidad de la demanda y las condiciones de operación establecidas. En redes urbanas consolidadas, estos factores suelen verse condicionados por procesos de crecimiento no planificado, ampliaciones progresivas y envejecimiento de la infraestructura, lo que incrementa la complejidad del sistema y dificulta su control hidráulico (Ramírez & Salazar, 2019).

Uno de los aspectos más relevantes en la operación de una red de distribución es el manejo de las presiones. Presiones excesivamente bajas pueden generar problemas de continuidad del servicio,

mientras que presiones elevadas favorecen la aparición de fugas, roturas y un mayor desgaste de los materiales. Por esta razón, el control y análisis de la presión dentro de la red constituye un elemento clave para evaluar su desempeño hidráulico y su nivel de eficiencia (Koppel & Vassiljev, 2008).

Asimismo, las demandas de agua asociadas a los usuarios presentan una variación temporal significativa a lo largo del día, lo que provoca cambios constantes en los caudales y presiones del sistema. Estas variaciones deben ser adecuadamente representadas para comprender el comportamiento real de la red y detectar posibles anomalías. Cuando las demandas reales difieren de las condiciones de diseño o cuando existen pérdidas no controladas, el sistema puede presentar desequilibrios hidráulicos que se manifiestan en forma de bajas presiones, discontinuidades del servicio o consumos no justificados (Walski et al., 2003).

En este contexto, el análisis detallado de las redes de distribución de agua potable resulta fundamental para identificar debilidades estructurales y operativas. La comprensión del funcionamiento hidráulico de la red permite establecer criterios técnicos para la toma de decisiones, orientadas a mejorar la eficiencia del sistema, optimizar la operación y reducir pérdidas. Este análisis constituye la base para la aplicación de herramientas de modelación hidráulica, las cuales permiten representar de manera integrada el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación (Mays, 2000).

### **2.3. PÉRDIDAS DE AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN**

Las pérdidas de agua en los sistemas de distribución de agua potable constituyen uno de los principales problemas operativos que enfrentan las entidades prestadoras del servicio. Estas pérdidas corresponden a volúmenes de agua producida que no llegan a ser facturados ni utilizados de manera efectiva, lo que afecta directamente la eficiencia hidráulica, económica y energética del sistema. En la práctica, la presencia de pérdidas limita la capacidad operativa de las redes y reduce la posibilidad de atender una mayor demanda sin incrementar la producción de agua potable (EurEau, 2021).

Desde el punto de vista técnico, las pérdidas de agua se clasifican generalmente en pérdidas aparentes y pérdidas reales. Las pérdidas aparentes están asociadas principalmente a errores de medición, fallas en los sistemas de facturación o conexiones no autorizadas, mientras que las pérdidas reales corresponden al agua que se pierde físicamente del sistema debido a fugas, roturas o fallas estructurales



en las tuberías y accesorios que conforman la red de distribución (Rueda et al., 2025). Dentro de esta clasificación, las pérdidas reales suelen tener un impacto más significativo sobre el comportamiento hidráulico del sistema.

La presencia de fugas en las tuberías genera alteraciones en el régimen hidráulico de la red, manifestándose principalmente a través de variaciones en las presiones y caudales. Estas alteraciones pueden provocar disminuciones localizadas de presión, incrementos en los caudales circulantes y un mayor esfuerzo sobre los elementos de la infraestructura, lo que acelera los procesos de deterioro y aumenta la probabilidad de fallas adicionales en el sistema (Qi et al., 2018).

En sistemas urbanos consolidados, la identificación de pérdidas reales resulta particularmente compleja debido a la extensión de las redes, la operación continua del servicio y, en muchos casos, la falta de información actualizada sobre el estado real de la infraestructura. Adicionalmente, no todas las fugas se manifiestan de manera superficial o visible, lo que dificulta su detección mediante inspecciones directas o métodos tradicionales de control. Como consecuencia, estas pérdidas pueden mantenerse activas durante períodos prolongados, incrementando progresivamente los volúmenes de agua no contabilizada (Chen et al., 2008).

Desde una perspectiva de gestión, la reducción de pérdidas reales constituye una acción prioritaria para mejorar la eficiencia global de los sistemas de distribución de agua potable. El control de este tipo de pérdidas permite optimizar el uso del recurso hídrico, reducir costos operativos y mejorar las condiciones de presión y continuidad del servicio. Para ello, resulta fundamental disponer de herramientas técnicas que permitan analizar el comportamiento hidráulico de la red e identificar anomalías asociadas a posibles fugas.

En el contexto de los sistemas urbanos de abastecimiento de agua potable operado por la Empresa Pública Municipal ETAPA EP., entidad responsable de la prestación del servicio en la ciudad de Cuenca, Ecuador, la gestión de las pérdidas reales adquiere particular relevancia. En la ciudad, el crecimiento urbano ha dado lugar, en muchos sectores, a extensiones progresivas de las matrices principales y a la coexistencia de tramos de red con diferentes edades y condiciones hidráulicas. En determinadas zonas, las redes de distribución superan los treinta años de antigüedad, lo que incrementa la probabilidad de la presencia de fugas no visibles y de ineficiencias hidráulicas. Estas condiciones hacen necesaria la aplicación de metodologías técnicas que permitan identificar y analizar las pérdidas reales desde un enfoque hidráulico, apoyando la gestión operativa del sistema

## 2.4. FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Las fugas en los sistemas de distribución de agua potable constituyen el principal componente de las pérdidas físicas dentro del agua no contabilizada. Una fuga se define como una falla no planificada en cualquier elemento de la infraestructura hidráulica que provoca la pérdida de agua durante su transporte, pudiendo presentarse en conducciones principales, redes de distribución, reservorios, válvulas, hidrantes o acometidas domiciliarias. Desde el punto de vista de la gestión del agua, no existe una diferencia técnica entre los términos fuga, rotura, ya que todos representan pérdidas reales del sistema

Las pérdidas físicas asociadas a fugas se manifiestan incluso en redes nuevas; sin embargo, su magnitud aumenta en sistemas urbanos consolidados, donde existen extensiones de matrices, existencia de tuberías de distintas edades y variaciones significativas de presión. En estos sistemas, las fugas no solo generan desperdicio del recurso hídrico, sino que alteran el comportamiento hidráulico de la red, incrementando caudales no controlados y provocando descensos localizados de presión, lo que puede afectar la continuidad y calidad del servicio.

Desde una perspectiva operativa, las fugas pueden clasificarse en fugas visibles y fugas no visibles. Las fugas visibles suelen aflorar a la superficie y son reportadas oportunamente por los usuarios o el personal operativo, por lo que su tiempo de permanencia en el sistema es relativamente corto. En contraste, las fugas no visibles ocurren generalmente bajo tierra, no presentan señales evidentes en superficie y permanecen activas durante períodos prolongados, representando el mayor volumen de pérdidas reales en los sistemas de distribución.

Un aspecto clave en la caracterización de las fugas es el tiempo de permanencia de estas en la red, el cual se compone de tres etapas: detección, localización y reparación. Este concepto, conocido como ALR (Awareness, Location and Repair), establece que el volumen total de agua perdida depende directamente del tiempo que una fuga permanece activa en el sistema. La reducción de cualquiera de estas etapas contribuye de manera significativa a disminuir las pérdidas físicas, aun cuando no se eliminan completamente las causas estructurales de las fugas

Las causas que originan las fugas pueden agruparse en factores de infraestructura y factores de presión. Los factores de infraestructura están relacionados con la antigüedad de las tuberías, los materiales

empleados, las condiciones de instalación, la calidad del suelo y las políticas de mantenimiento y reparación. Por su parte, los factores de presión incluyen presiones excesivas, variaciones bruscas de caudal, llenados rápidos de tuberías y fenómenos transitorios como el golpe de ariete, los cuales incrementan la frecuencia y magnitud de las roturas en la red.

La experiencia en la gestión de agua no contabilizada ha demostrado que la mayoría de las fugas se producen en las acometidas domiciliarias y que una proporción significativa de estas no aflora a la superficie. La ausencia de un programa de control activo de fugas es, por tanto, un indicador de elevados niveles de pérdidas físicas en el sistema. En este contexto, la simple reparación de fugas reportadas resulta insuficiente para reducir de manera sostenible las pérdidas reales

En sistemas urbanos como el de la ciudad de Cuenca, operado por la Empresa Pública Municipal ETAPA EP, donde el servicio se presta de manera continua y existen sectores con redes que superan los treinta años de servicio, la gestión de las fugas constituye un desafío técnico prioritario. La extensión de matrices y la heterogeneidad de la infraestructura incrementan la probabilidad de fugas no visibles, lo que hace necesaria la aplicación de metodologías avanzadas de análisis hidráulico y control de pérdidas.

En este sentido, la gestión moderna de fugas se basa en estrategias integrales que incluyen la sectorización hidráulica, el monitoreo de caudales nocturnos, la gestión de presiones y la implementación de programas de control activo de fugas. Estas estrategias permiten reducir los tiempos de detección, localización y reparación, optimizando el desempeño hidráulico del sistema y contribuyendo a una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico.

## **2.5. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

La detección de fugas en redes de distribución de agua potable comprende el conjunto de métodos técnicos orientados a identificar, localizar y precisar la ubicación de pérdidas reales dentro del sistema. En el marco de la gestión del agua no contabilizada, estos métodos tienen como objetivo principal reducir el volumen de pérdidas físicas mediante la identificación temprana de fugas, especialmente aquellas que no presentan manifestaciones visibles en superficie (Lambert & Hirner, 2000).

Desde el enfoque de gestión moderna, la detección de fugas se apoya en el concepto ALR (Awareness, Location and Repair), el cual establece que el volumen total de agua perdida depende directamente del

tiempo que una fuga permanece activa en la red. En este sentido, la reducción de los tiempos de detección, localización y reparación constituye un elemento clave para el control efectivo de las pérdidas reales, tal como lo establece la metodología propuesta por la International Water Association - IWA (Lambert et al., 2014).

Uno de los pilares fundamentales para la detección de fugas es la sectorización hidráulica de las redes de distribución, mediante la conformación de sectores hidráulicos o áreas controladas. La sectorización permite realizar un seguimiento específico de los caudales y presiones en zonas definidas, facilitando la identificación de comportamientos anómalos. En este contexto, el análisis del caudal mínimo nocturno es una herramienta relevante, ya que durante este período la demanda legítima es reducida y el caudal registrado está asociado principalmente a fugas (Farley & Trow, 2003).

Los métodos de detección de fugas pueden clasificarse, de manera general, en métodos indirectos y métodos directos. Los métodos indirectos se basan en el análisis del comportamiento hidráulico del sistema, a partir de la evaluación de caudales, presiones e indicadores de desempeño, permitiendo relocalizar sectores con alta probabilidad de presencia de fugas. Por otra parte, los métodos directos corresponden a técnicas de localización en campo, como el uso de equipos acústicos, correladores o geófonos, los cuales permiten confirmar y precisar la ubicación de las fugas identificadas previamente (Puust et al., 2010).

En sistemas urbanos con servicio continuo y redes de distribución heterogéneas, como el sistema de agua potable de la Empresa Pública Municipal ETAPA EP., la aplicación combinada de métodos indirectos y directos de detección de fugas resulta fundamental para optimizar los recursos operativos y mejorar la eficiencia hidráulica del sistema.

## **2.6. MODELACIÓN HIDRÁULICA APLICADA A LA DETECCIÓN DE FUGAS**

La modelación hidráulica de redes de distribución de agua potable constituye una herramienta técnica fundamental para el análisis del comportamiento del sistema bajo distintas condiciones de operación. A través de la representación matemática de la red, la modelación permite evaluar la relación entre caudales, presiones y demandas, así como identificar desequilibrios hidráulicos que pueden estar asociados a la presencia de fugas u otras ineficiencias operativas.

Desde el enfoque de la gestión del agua no contabilizada, la modelación hidráulica no tiene como

objetivo localizar físicamente una fuga, sino identificar sectores de la red que presentan comportamientos hidráulicos anómalos respecto a las condiciones esperadas. Estas anomalías pueden manifestarse como caídas de presión no justificadas, incrementos de caudal o discrepancias entre valores simulados y medidos, constituyéndose en indicios técnicos de posibles pérdidas reales en el sistema (Walski et al., 2003).

Uno de los aspectos más relevantes de la modelación hidráulica aplicada a la detección de fugas es la calibración del modelo. Un modelo correctamente calibrado permite representar de manera confiable el comportamiento real de la red, ajustando parámetros como demandas, rugosidad de tuberías y condiciones operativas. La comparación entre datos simulados y datos medidos en campo resulta clave para identificar diferencias que no pueden explicarse únicamente por el consumo, y que pueden estar asociadas a fugas no visibles (Koppel & Vassiljev, 2008).

La simulación en período extendido constituye un elemento particularmente útil en el análisis de fugas, ya que permite evaluar la evolución temporal de caudales y presiones a lo largo del día. Este tipo de simulación facilita el análisis de condiciones nocturnas, cuando las demandas legítimas son reducidas y el comportamiento hidráulico del sistema está dominado principalmente por las pérdidas reales. En este contexto, la modelación hidráulica complementa las estrategias de sectorización y análisis de caudal mínimo nocturno empleadas en el control activo de fugas (Farley & Trow, 2003).

En sistemas urbanos complejos, la modelación hidráulica permite además evaluar escenarios hipotéticos de operación, tales como variaciones de demanda, cambios en la gestión de presiones o la incorporación de fugas simuladas en nodos específicos de la red. Este enfoque posibilita analizar la sensibilidad del sistema frente a diferentes condiciones y apoyar la toma de decisiones técnicas orientadas a la priorización de intervenciones y al uso eficiente de los recursos disponibles.

En el contexto del sistema de agua potable, la modelación hidráulica se presenta como una herramienta de apoyo a la gestión técnica del sistema, permitiendo integrar la información disponible, analizar el comportamiento hidráulico de sectores específicos y complementar los métodos tradicionales de detección de fugas. De esta manera, la modelación hidráulica se consolida como un componente clave dentro de una estrategia integral de reducción de pérdidas reales, sirviendo como base para el desarrollo metodológico de la presente investigación.

### 3. METODOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN DE MODELO HIDRÁULICO

La siguiente figura presenta el esquema metodológico utilizado en la presente investigación. El proceso inicia con la recopilación de información técnica del sistema de distribución y continúa con la construcción y calibración de un modelo hidráulico del sector de estudio. Posteriormente, los resultados del modelo se analizan en conjunto con registros históricos de fugas, con el fin de identificar zonas con mayor probabilidad de presentar pérdidas reales dentro de la red de distribución.

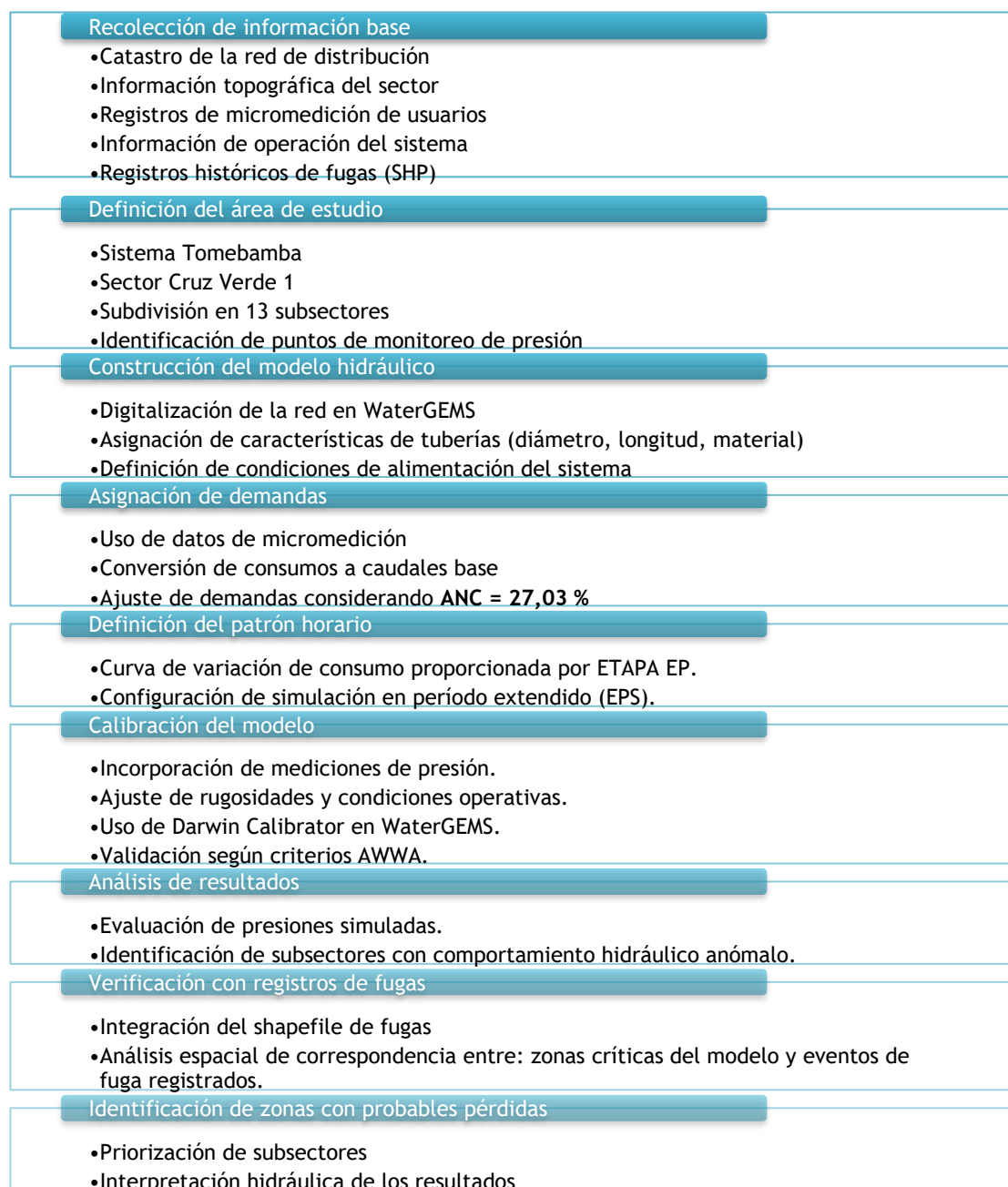


Tabla 1. Esquema metodológico para la detección de fugas mediante modelación hidráulica

### 3.1. AREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a un sector urbano de la ciudad de Cuenca, cuyo sistema de distribución de agua potable es gestionado por la Empresa Pública Municipal ETAPA EP, entidad responsable de la planificación, operación y mantenimiento del servicio de agua potable en la ciudad.

El sistema de abastecimiento de agua potable de Cuenca se encuentra dividido en sistemas de distribución, los cuales se alimentan de distintas plantas de tratamiento de agua potable y permiten la distribución del servicio a los diferentes sectores urbanos. Esta organización responde a criterios operativos asociados a las principales plantas de tratamiento y a la configuración hidráulica del sistema.

Dentro de esta estructura se encuentra el sector Cruz Verde<sup>1</sup>, el cual está ubicado en la zona sursuroeste de la Ciudad, es abastecido desde el centro de reserva de Cruz Verde con una capacidad actual de reserva de 6.000 m<sup>3</sup> (2591 msnm / 2587 msnm); lo definen los límites: Norte: Río Yanuncay, Sur: Autopista Circunvalación Sur (Río Tarqui), el cual forma parte del sistema Tomebamba, abastecido por la planta de tratamiento El Cebollar, una de las plantas más antiguas del sistema de agua potable de la ciudad. El sistema Tomebamba abastece a varios sectores urbanos y presenta características propias de un sistema consolidado.

En particular, el sector Cruz Verde 1 puede considerarse un sector urbano consolidado, con extensiones internas de matrices, es decir, ampliaciones realizadas dentro de los límites del sector previamente definido por ETAPA EP, y con tramos de tubería construidos en distintos periodos.

El sector Cruz Verde 1 presenta condiciones representativas del sistema urbano de distribución, tales como variaciones topográficas, diferencias en las condiciones de presión y una red conformada por tuberías de diversa antigüedad y material. Estas características hacen que el sector resulte adecuado para el desarrollo de un modelo hidráulico orientado al análisis del comportamiento del sistema y a la identificación de posibles pérdidas reales.

La selección del área de estudio se realizó considerando la disponibilidad de información técnica proporcionada por la empresa, así como la existencia de datos de red y la posibilidad de aplicar simulaciones hidráulicas en período extendido. De esta manera, el sector Cruz Verde 1 constituye un caso de estudio representativo para evaluar la aplicación de la modelación hidráulica como herramienta de apoyo a la detección de fugas en sistemas de distribución de agua potable.



| Sistema   | Sector       | Área<br>(ha) | Coordenadas WGS84 UTM 17S |         |
|-----------|--------------|--------------|---------------------------|---------|
|           |              |              | x (m)                     | y (m)   |
| Tomebamba | Cruz Verde 1 | 2,55         | 720891                    | 9677458 |

Tabla 2 Datos área de estudio



Ilustración 1. Área de estudio Cruz Verde 1

## 3.2. INFORMACIÓN BASE Y FUENTES DE DATOS

Para el desarrollo del modelo hidráulico del sector Cruz Verde 1 se utilizó información técnica proveniente de diferentes fuentes, proporcionada por ETAPA EP y complementada con criterios técnicos adoptados para la modelación. La información recopilada permitió caracterizar la infraestructura existente, las condiciones de operación del sistema y el comportamiento de la demanda, constituyendo la base para la construcción y calibración del modelo hidráulico.

La información base empleada en la presente investigación se clasifica en información de infraestructura, información topográfica, información de demanda y consumos, e información de operación hidráulica, las cuales se describen a continuación

### 3.2.1. INFORMACIÓN DE INFRAESTRUCTURA DE LA RED

La información de infraestructura corresponde al catastro de la red de distribución de agua potable del



sector de estudio, obtenido a partir de los sistemas de información geográfica (SIG) de ETAPA EP. Esta información incluye la ubicación y características físicas de los elementos que conforman la red, tales como tuberías, nodos, válvulas y otros componentes relevantes.

Entre los datos considerados se encuentran la longitud de los tramos de tubería, diámetros nominales, materiales, año aproximado de instalación y conectividad de la red. Esta información permitió definir la estructura básica del modelo hidráulico y establecer las relaciones entre los distintos elementos del sistema.

| Material | Diámetro de la tubería de distribución (km) |       |    |         |         |         | Diámetro tubería alimentaciones (km) |      |      | TOTAL (km) |
|----------|---------------------------------------------|-------|----|---------|---------|---------|--------------------------------------|------|------|------------|
|          | 25-40                                       | 50-63 | 90 | 100-110 | 150-160 | 200-250 | 300+                                 | 400+ | 450+ |            |
| PVC      | 0,13                                        | 28,39 |    | 6,67    | 2,44    | 0,81    | 1,14                                 | 0,41 |      | 42,48      |
| AC       |                                             |       |    |         |         | 4,04    |                                      |      |      |            |
| HD/HF    |                                             |       |    |         |         |         |                                      |      | 1,95 |            |
| TOTAL    | 0,13                                        | 28,39 |    | 6,67    | 2,44    | 4,85    | 1,14                                 | 0,41 | 1,95 |            |

Fuente: Catastros de redes ETAPA EP., (SOAS, DAIAS, Marzo 2025)

Tabla 3 Infraestructura de la red

### 3.2.2. INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA

La información topográfica utilizada corresponde a las cotas de terreno asociadas a los nodos de la red, las cuales fueron obtenidas a partir de la cartografía disponible en ETAPA EP y de modelos digitales del terreno. Las elevaciones de los nodos constituyen un parámetro fundamental para la modelación hidráulica, ya que influyen directamente en las condiciones de presión del sistema.

Para la asignación de cotas se consideró la coherencia espacial de la información y se realizaron ajustes cuando fue necesario, con el fin de garantizar la consistencia del modelo hidráulico y evitar distorsiones en los resultados de simulación.

### 3.2.3. INFORMACIÓN DE DEMANDA Y CONSUMOS

La información de demanda se obtuvo a partir de los registros de consumo de agua potable disponibles en la empresa, asociados a los usuarios del sector de estudio. Estos datos permitieron estimar demandas promedio y definir patrones de consumo representativos del comportamiento diario del sistema.

En ausencia de mediciones detalladas en todos los puntos de la red, se adoptaron supuestos técnicos para

Edisson Xavier Mejía Cornejo

la distribución espacial de la demanda, considerando criterios como el tipo de uso del suelo y la densidad de usuarios. Esta información fue utilizada como base para la simulación hidráulica en período extendido.

### 3.2.4. INFORMACIÓN DE OPERACIÓN DEL SECTOR

La información de operación hidráulica incluye datos relacionados con las condiciones de funcionamiento del sistema, tales como rangos de presión, ubicación de válvulas y su estado físico (abierto - cerrado). Asimismo, se consideraron registros puntuales de mediciones de presión y caudal disponibles para el sector, los cuales fueron utilizados como referencia para el proceso de calibración del modelo.

En los casos en que la información operativa fue limitada, se aplicaron criterios técnicos fundamentados en la experiencia operativa del sistema y en las características generales del sistema Tomebamba, garantizando la coherencia del modelo con la realidad del sistema de distribución.

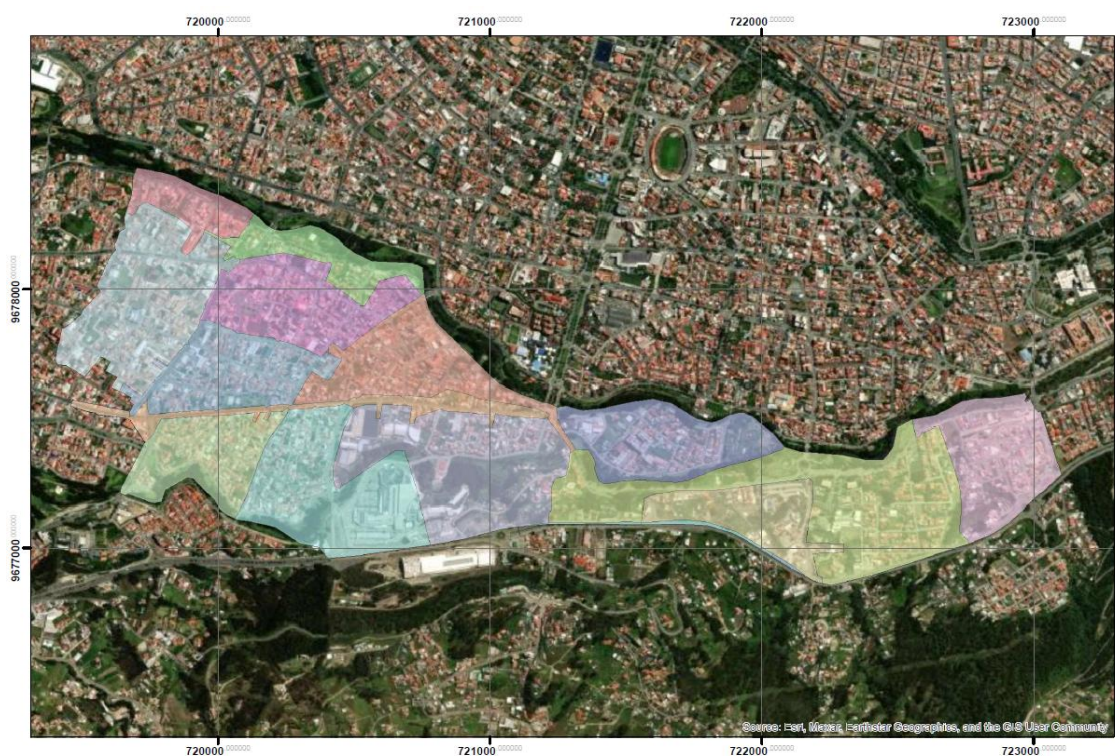


Ilustración 2. Mapa de subsectores del sector Cruz Verde 1

### 3.3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

La construcción del modelo hidráulico del sector Cruz Verde 1 se realizó mediante el uso de un software especializado de modelación de redes de distribución de agua potable. El proceso incluyó la representación digital de la infraestructura existente, la definición de condiciones de operación y la

asignación de parámetros hidráulicos necesarios para la simulación del sistema.

El modelo fue desarrollado a partir de la información catastral de la red, integrando la geometría de tuberías y nodos conforme a la configuración real del sector. La conectividad hidráulica se verificó cuidadosamente para garantizar la coherencia estructural del modelo y evitar inconsistencias en la simulación.

### **3.3.1. REPRESENTACIÓN DE LA RED**

La red fue digitalizada respetando la disposición real de los elementos existentes en el sector, incluyendo tuberías principales, nodos de interconexión y puntos relevantes del sistema. Cada tramo de tubería fue definido con sus respectivas características hidráulicas, tales como diámetro nominal, longitud y material.

Los nodos fueron asignados con su correspondiente cota topográfica, lo cual permitió establecer adecuadamente las condiciones de presión en el sistema. La correcta definición de elevaciones constituye un aspecto fundamental en la modelación hidráulica, ya que influye directamente en los resultados de presión obtenidos en las simulaciones.

### **3.3.2. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS**

Para cada tramo de tubería se asignaron parámetros hidráulicos asociados al coeficiente de rugosidad, considerando el material y las condiciones generales de operación del sistema. En aquellos casos en que no se dispuso de información específica, se adoptaron valores típicos recomendados en literatura técnica para redes de distribución urbana.

Asimismo, se definieron las condiciones de alimentación del sistema, estableciendo los puntos de ingreso de caudal al sector conforme a su conexión con el sistema Tomebamba. Estas condiciones permitieron simular adecuadamente el comportamiento hidráulico bajo escenarios normales de operación.

### **3.3.3. CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN EN PERÍODO EXTENDIDO**

El modelo fue configurado para ejecutar simulaciones en período extendido, permitiendo analizar la variación de caudales y presiones a lo largo de un ciclo diario de operación. Este tipo de simulación

resulta especialmente relevante en el análisis de pérdidas reales, ya que permite evaluar el comportamiento del sistema durante horarios nocturnos, cuando la demanda verdadera es reducida y las pérdidas adquieren mayor influencia relativa.

La duración del período de simulación y el intervalo de cálculo fueron definidos de manera que permitan capturar adecuadamente las variaciones temporales del sistema sin generar distorsiones numéricas en el proceso de cálculo.

### **3.3.4. VERIFICACIÓN INICIAL DEL MODELO**

Una vez construido el modelo, se realizó una revisión preliminar para identificar posibles inconsistencias, tales como nodos desconectados, direcciones de flujo no coherentes o valores extremos de presión. Esta etapa permitió depurar el modelo antes de proceder al proceso de asignación detallada de demandas y calibración.

La verificación inicial constituye una etapa fundamental en la construcción de modelos hidráulicos, ya que garantiza que la estructura matemática del sistema represente adecuadamente la red física antes de iniciar análisis más avanzados.

## **3.4. ASIGNACIÓN DE DEMANDAS Y PATRONES DE CONSUMO**

La asignación de demandas constituye un componente fundamental en la construcción de modelos hidráulicos de redes de distribución de agua potable, ya que permite representar el comportamiento de los consumos dentro del sistema y reproducir de manera aproximada las condiciones reales de operación.

Para el desarrollo del modelo hidráulico del sector Cruz Verde 1 se utilizó información de micro medición proporcionada por la Empresa Pública Municipal ETAPA EP, correspondiente al año 2025. A partir de esta información se definieron las demandas base del modelo, las cuales posteriormente fueron ajustadas considerando el porcentaje de agua no contabilizada del sector y la variación temporal del consumo a través de patrones horarios.

### **3.4.1. REGISTRO DE USUARIOS Y CONSUMOS DEL SECTOR**

La información de micro medición disponible permitió identificar el número de usuarios registrados en



el sector Cruz Verde 1 durante el año 2025, clasificados según el tipo de uso del servicio de agua potable. Entre las categorías consideradas se encuentran: residencial, comercial, construcción, especial, industrial y servicio de alcantarillado - otra fuente.

La revisión de la información mensual permitió analizar la evolución del número de usuarios durante el año, evidenciando predominio de usuarios residenciales dentro del sector.

Para efectos de la construcción del modelo hidráulico se consideró la información correspondiente al mes de diciembre de 2025, debido a que representa el estado más actualizado del número de conexiones registradas en el sistema al momento del desarrollo del estudio.

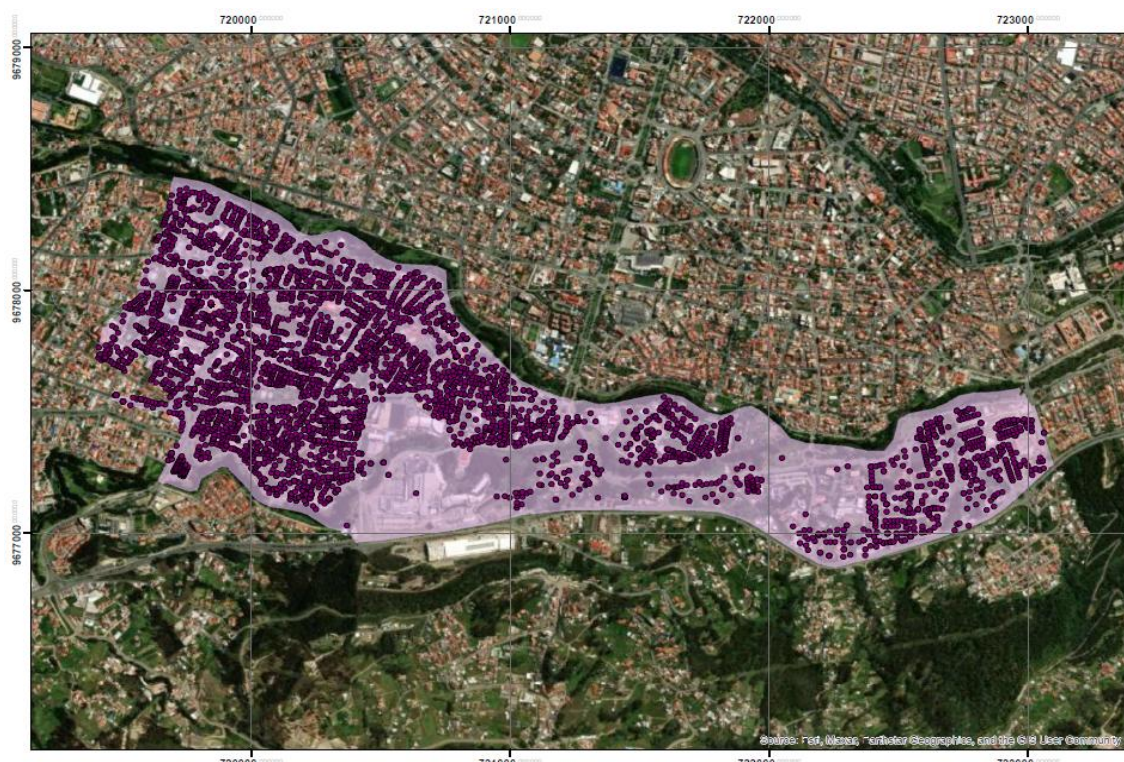


Ilustración 3. Usuarios dentro del sector Cruz Verde 1

En el mes de diciembre de 2025 se registraron 6218 usuarios, distribuidos en las distintas categorías de consumo presentes en el sector.

| Tipo de consumo                          | ene-25      | feb-25      | mar-25      | abr-25      | may-25      | jun-25      | jul-25      | ago-25      | sept-25     | oct-25      | nov-25      | dic-25      |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Comercial                                | 652         | 655         | 655         | 655         | 653         | 650         | 651         | 648         | 654         | 654         | 653         | 653         |
| Residencial                              | 5384        | 5394        | 5394        | 5399        | 5406        | 5415        | 5417        | 5433        | 5437        | 5448        | 5456        | 5460        |
| Construcción                             | 59          | 60          | 60          | 60          | 62          | 64          | 63          | 64          | 67          | 73          | 72          | 72          |
| Especial                                 | 21          | 21          | 21          | 21          | 21          | 21          | 21          | 21          | 21          | 21          | 21          | 21          |
| Industrial                               | 5           | 5           | 5           | 5           | 5           | 5           | 5           | 5           | 5           | 5           | 5           | 5           |
| Servicio de Alcantarillado - otra fuente | 6           | 6           | 6           | 6           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           |
| <b>TOTAL</b>                             | <b>6127</b> | <b>6141</b> | <b>6141</b> | <b>6146</b> | <b>6154</b> | <b>6162</b> | <b>6164</b> | <b>6178</b> | <b>6191</b> | <b>6209</b> | <b>6214</b> | <b>6218</b> |

Tabla 4. Conexiones año 2025

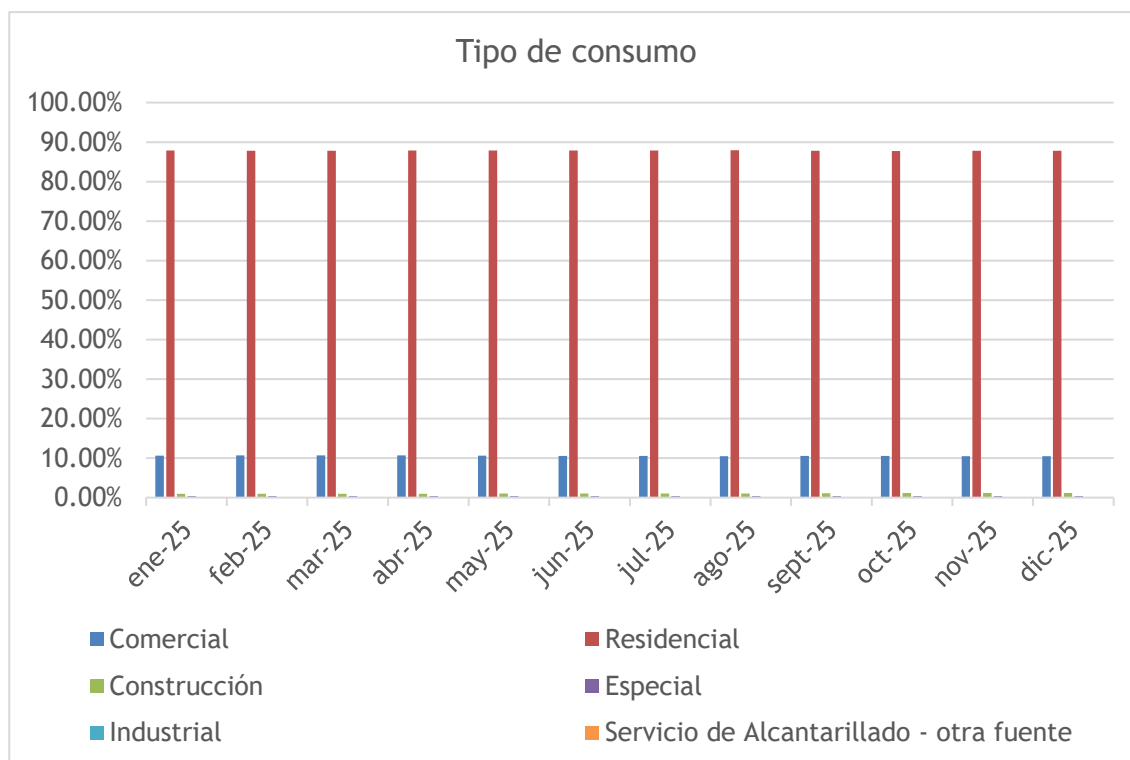


Ilustración 4. Tipo de consumo 2025

Como se puede ver en la ilustración anterior, el consumo residencial en el sector representa más del 87%, y aproximadamente un 10%, es de consumo comercial, esto debido a que en el sector se encuentra zonas como el Mall del Río y la Av. Don Bosco, entre otros.

Los valores de consumo obtenidos a partir de la micro medición representan únicamente el volumen de agua efectivamente registrado por los medidores de los usuarios. Sin embargo, en los sistemas de distribución de agua potable existe una diferencia entre el volumen producido y el volumen facturado, asociada a pérdidas reales y aparentes del sistema, conocida como agua no contabilizada (ANC).

Para el sector de estudio se consideró un porcentaje de ANC del 27,73 %, correspondiente al valor estimado para el mes de diciembre de 2025. Este porcentaje fue aplicado a los consumos registrados con el fin de representar de manera más realista el comportamiento hidráulico del sistema dentro del modelo.

De esta manera, las demandas base utilizadas en el modelo hidráulico corresponden a los consumos de

micro medición ajustados mediante el factor de agua no contabilizada.

| PERIODO | SISTEMA TOMBAMBA          |                           |            |          |
|---------|---------------------------|---------------------------|------------|----------|
|         | MACROMEDICION<br>(m3/mes) | MICROMEDICION<br>(m3/mes) | CONEXIONES | IANC (%) |
| dic-25  | 1.433.160,68              | 1.035.788,00              | 61.328     | 27,73%   |

Tabla 5. Indicador de agua no contabilizada del Sistema Tomebamba

Ajuste de demanda considerando agua no contabilizada:

|                                 |       |     |
|---------------------------------|-------|-----|
| Consumo medido                  | 36,95 | L/s |
| Índice de agua no contabilizada | 27,73 | %   |

Tabla 6. Ajuste de demanda considerando agua no contabilizada

Para desarrollar este estudio se calibrará usando la demanda sin pérdidas, en donde posteriormente se aplicará el patrón horario y se ajustará las fugas con emisores.

| Statistics            |         |     |
|-----------------------|---------|-----|
| Count:                | 516     |     |
| Maximum:              | 0.4235  | L/s |
| Mean:                 | 0.0716  | L/s |
| Minimum:              | 0.0000  | L/s |
| Sum:                  | 36.9500 | L/s |
| <div>Close Help</div> |         |     |

Ilustración 5. Consumo distribuido en WaterGems

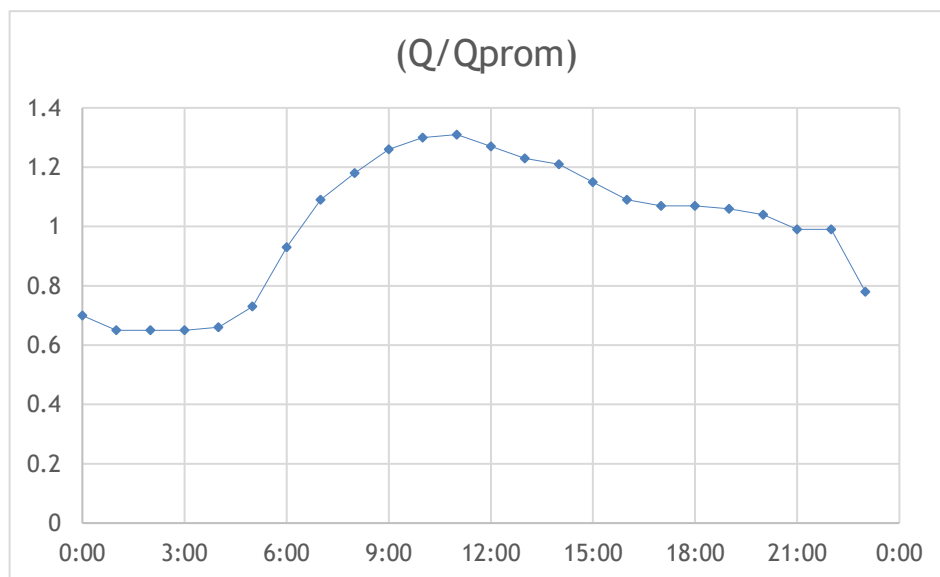
### 3.4.2. DEFINICIÓN DEL PATRÓN HORARIO DE CONSUMO

Para representar la variación temporal de la demanda a lo largo del día se utilizó un patrón horario de consumo proporcionado por la Empresa Pública Municipal ETAPA EP. Este patrón corresponde a una curva de variación del consumo diario que permite simular el comportamiento de la demanda en redes de distribución urbanas.

El patrón horario define la relación entre el consumo promedio diario y los consumos registrados en cada intervalo horario, permitiendo reproducir los picos de demanda que generalmente ocurren durante las horas de mayor actividad doméstica.

La utilización de patrones de consumo resulta fundamental en la modelación hidráulica, especialmente cuando se realizan simulaciones en período extendido, ya que permite representar de forma más realista

la dinámica del sistema a lo largo del día.



| Hora  | (Q/Prim) |
|-------|----------|
| 0:00  | 0,7      |
| 1:00  | 0,65     |
| 2:00  | 0,65     |
| 3:00  | 0,65     |
| 4:00  | 0,66     |
| 5:00  | 0,73     |
| 6:00  | 0,93     |
| 7:00  | 1,09     |
| 8:00  | 1,18     |
| 9:00  | 1,26     |
| 10:00 | 1,3      |
| 11:00 | 1,31     |
| 12:00 | 1,27     |
| 13:00 | 1,23     |
| 14:00 | 1,21     |
| 15:00 | 1,15     |
| 16:00 | 1,09     |
| 17:00 | 1,07     |
| 18:00 | 1,07     |
| 19:00 | 1,06     |
| 20:00 | 1,04     |
| 21:00 | 0,99     |
| 22:00 | 0,99     |
| 23:00 | 0,78     |

Tabla 7. Patrón de consumo horario para un día de la reserva Cruz Verde 4B1

Se procedió a colocar en el programa y definir las horas para poder interpretar que los valores son los adecuados.



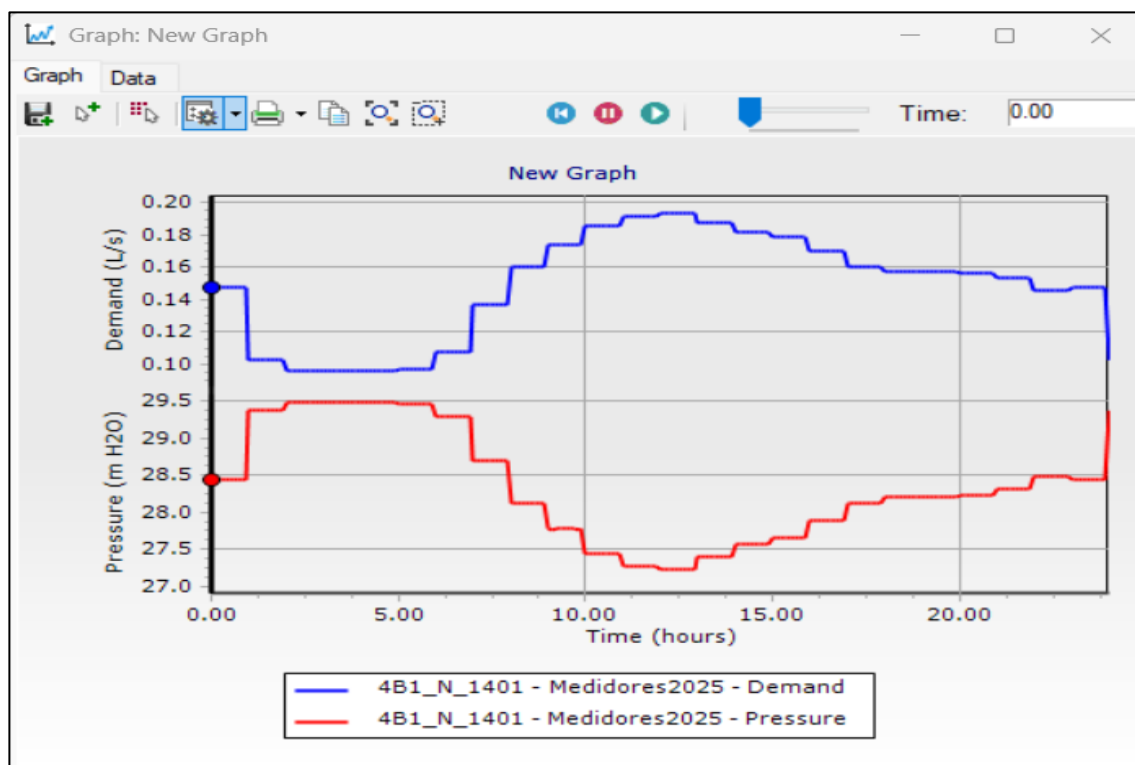


Ilustración 6. Variación de demanda vs presión.

De lo que se puede observar es que a la madrugada (0-5 h) la presión es alta (29.5 mca) lo que refleja bajo consumo, posteriormente en la mañana hasta el mediodía (7-12 h) la presión baja (27.2 mca), lo que refleja una demanda alta y desde la tarde hasta la noche la presión vuelve a subir lo que significa que disminuye el consumo. Es decir, las presiones bajan en horas pico. Si bien el modelo empieza a responder bien hidráulicamente, sin embargo, aún no está calibrado y no incluye el factor fugas.

### 3.4.3. SECTORIZACIÓN INTERNA Y UBICACIÓN DE SENSORES DE PRESIÓN

El sector de estudio se encuentra subdividido en 14 subsectores, los cuales forman parte del esquema de sectorización hidráulica definido por ETAPA EP. Esta subdivisión permite analizar de manera más detallada el comportamiento del sistema y facilita el monitoreo de variables hidráulicas dentro de la red.

En 13 subsectores se realizaron mediciones de presión mediante sensores instalados en puntos representativos de la red. Los registros obtenidos fueron utilizados posteriormente en el proceso de calibración del modelo hidráulico, permitiendo comparar los valores simulados con los valores medidos en campo.

La ubicación de los sensores de presión dentro de los subsectores se presenta en la siguiente ilustración.

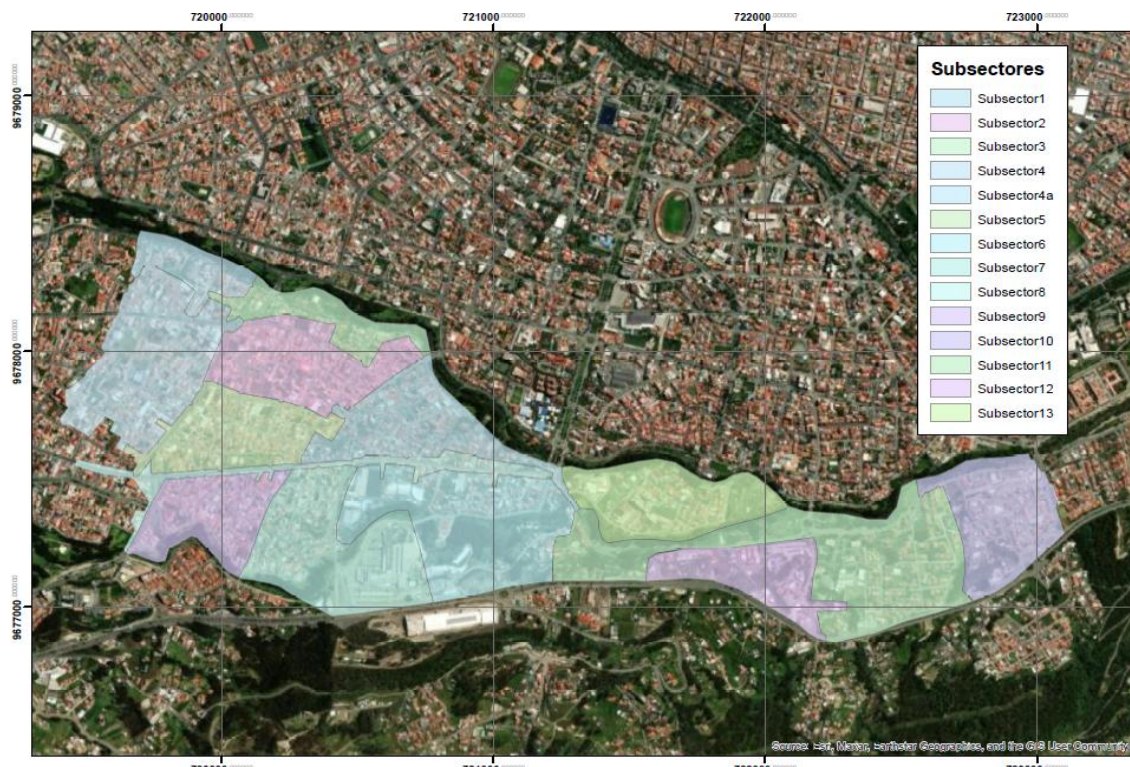
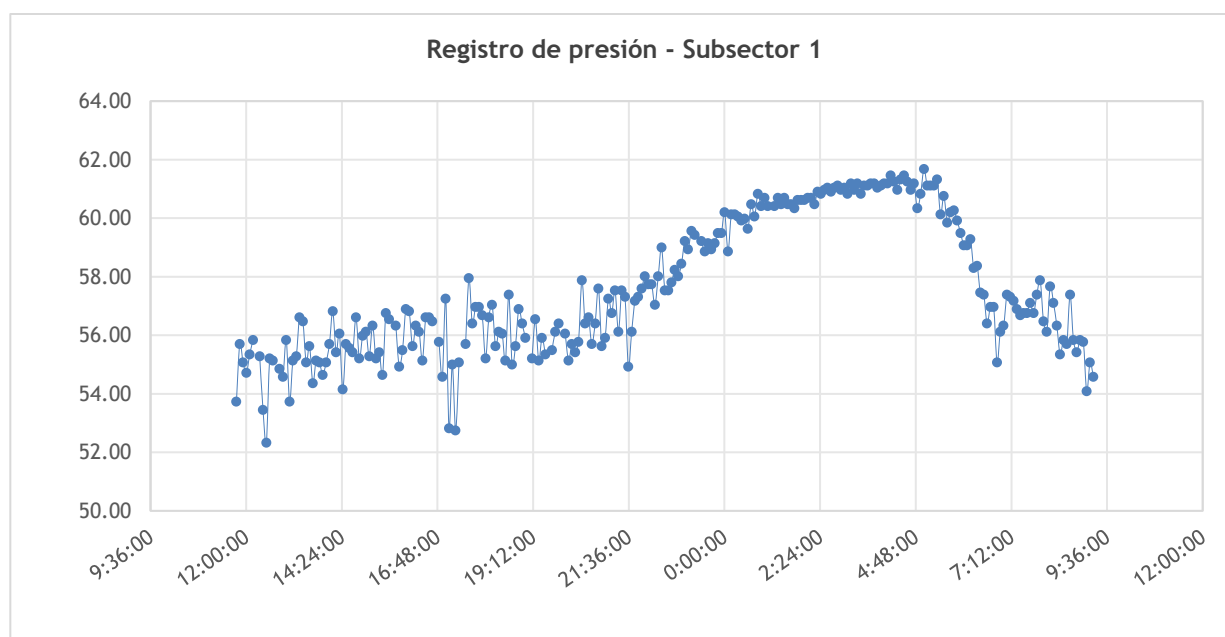
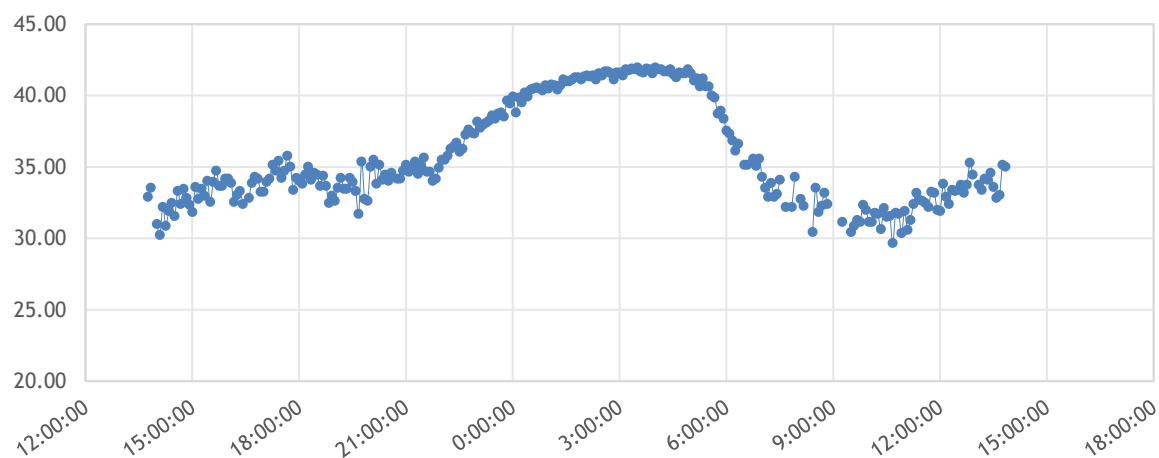


Ilustración 7. Puntos de registro de presión

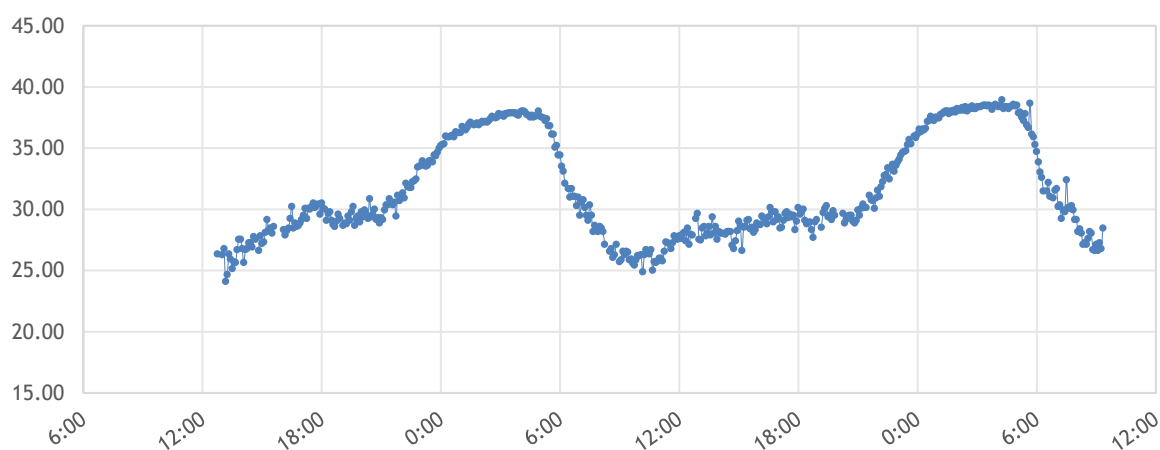
Adicionalmente, para cada sensor se analizaron las curvas de variación de presión registradas durante un período de monitoreo, correspondiente a un día entero (24 horas, cada 5 minutos), las cuales constituyen información clave para la calibración del modelo hidráulico y la identificación de posibles anomalías asociadas a fugas dentro del sistema.



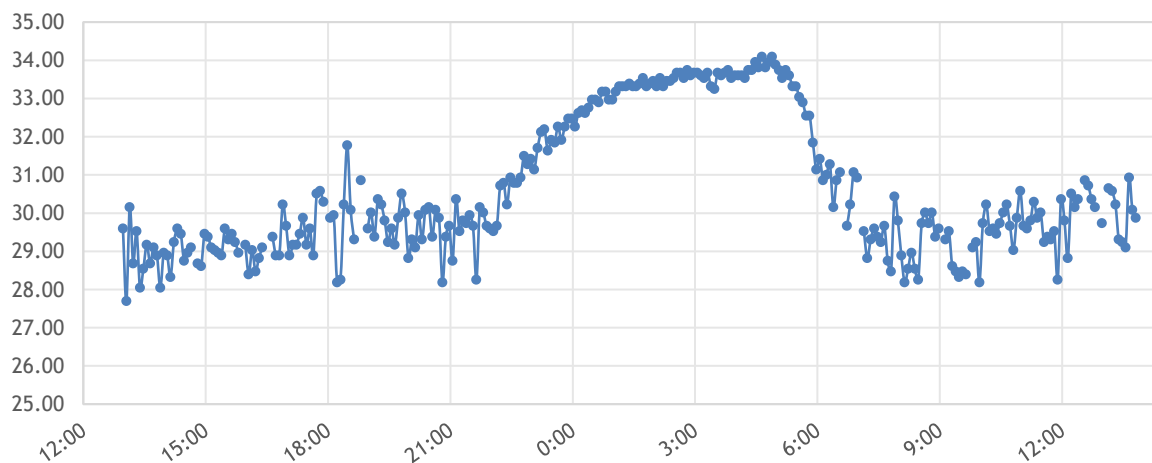
Registro de presión - Subsector 2



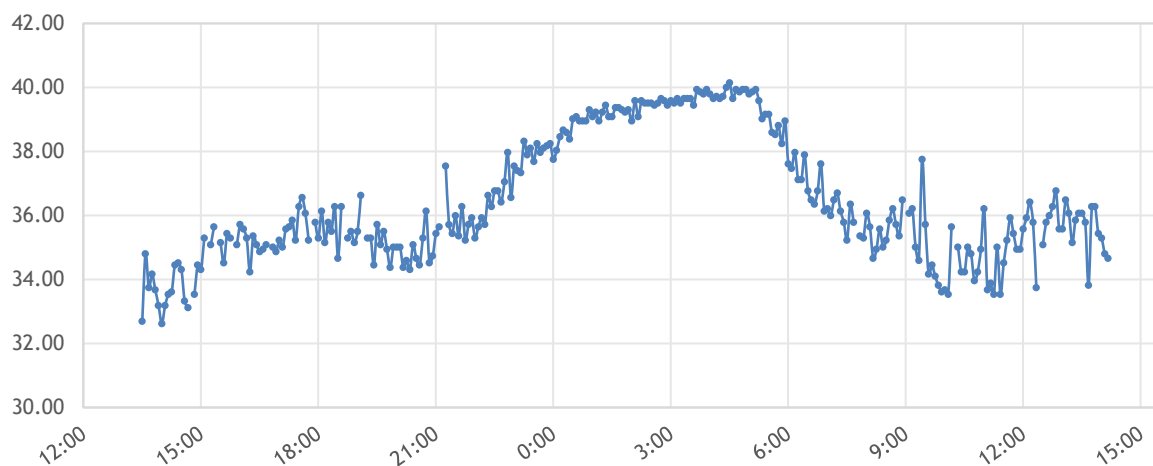
Registro de presión - Subsector 3



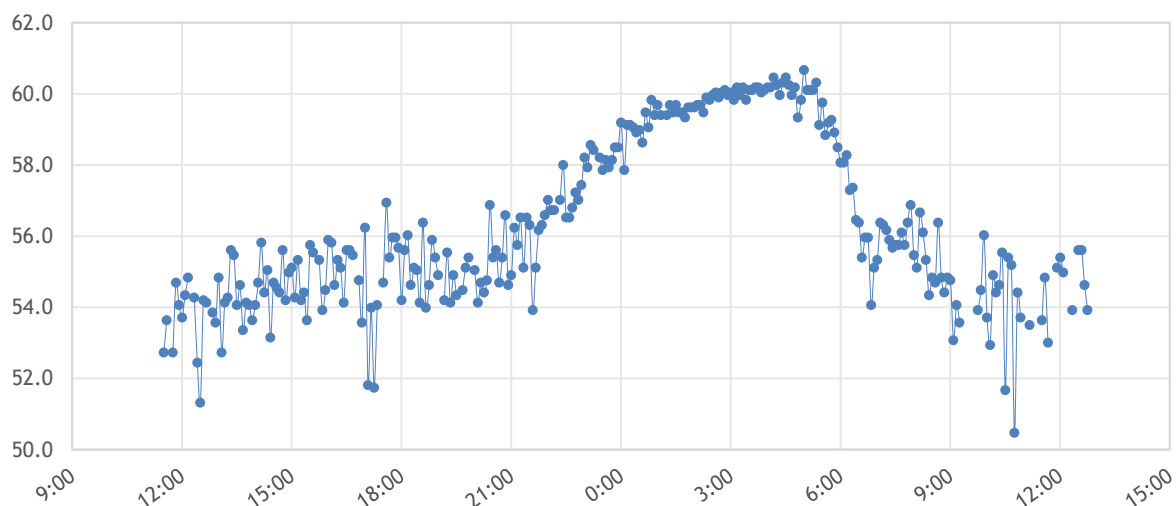
Registro de presión - Subsector 4



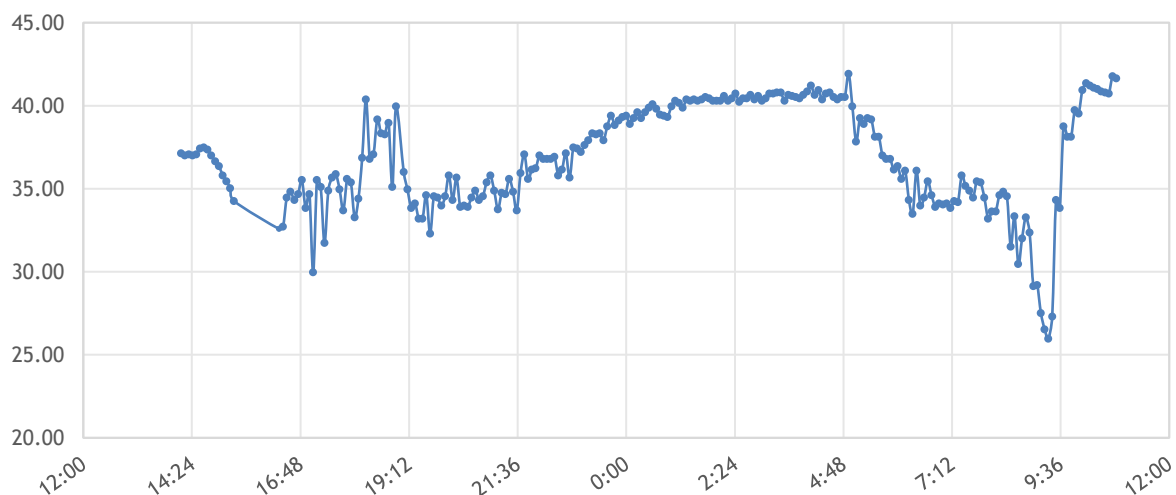
Registro de presión - Subsector 5



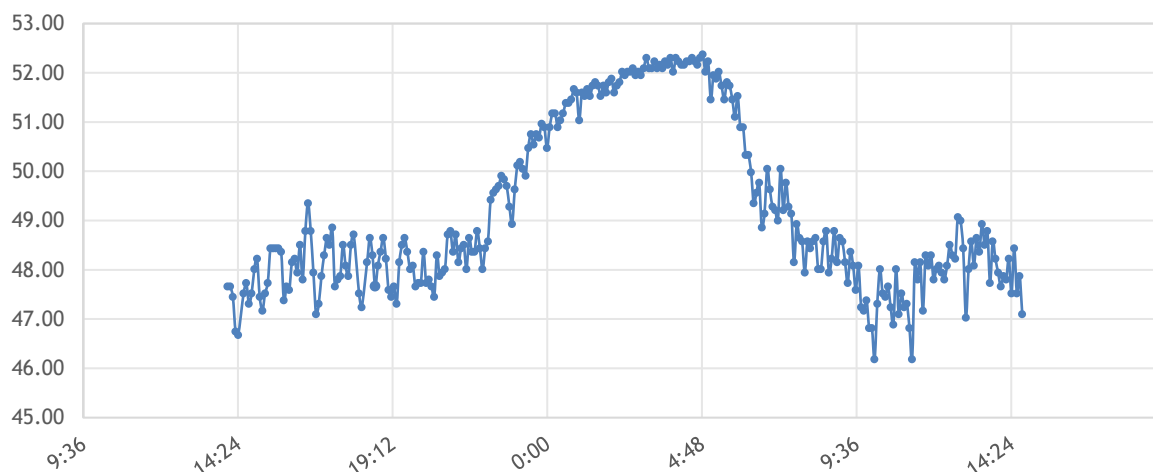
Registro de presión - Subsector 6



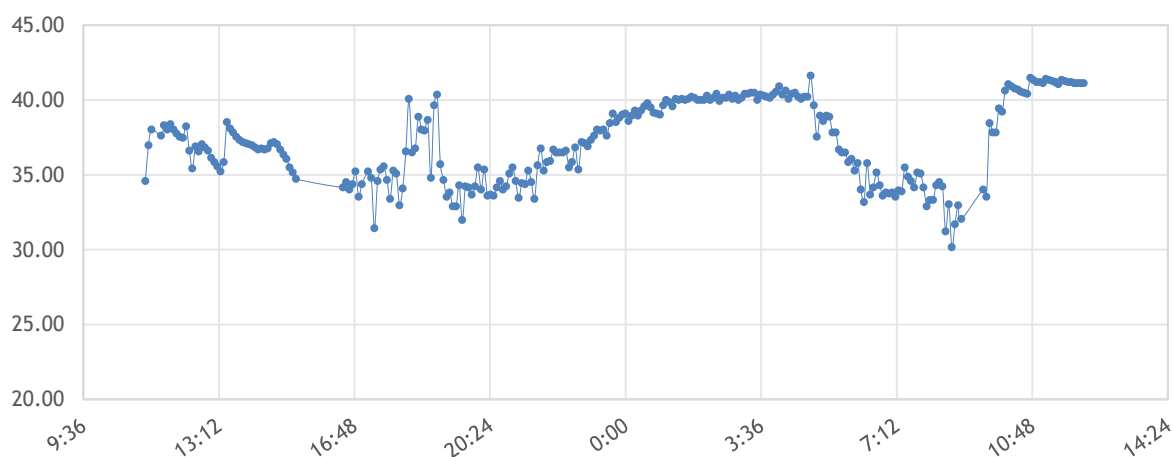
Registro de presión - Subsector 7



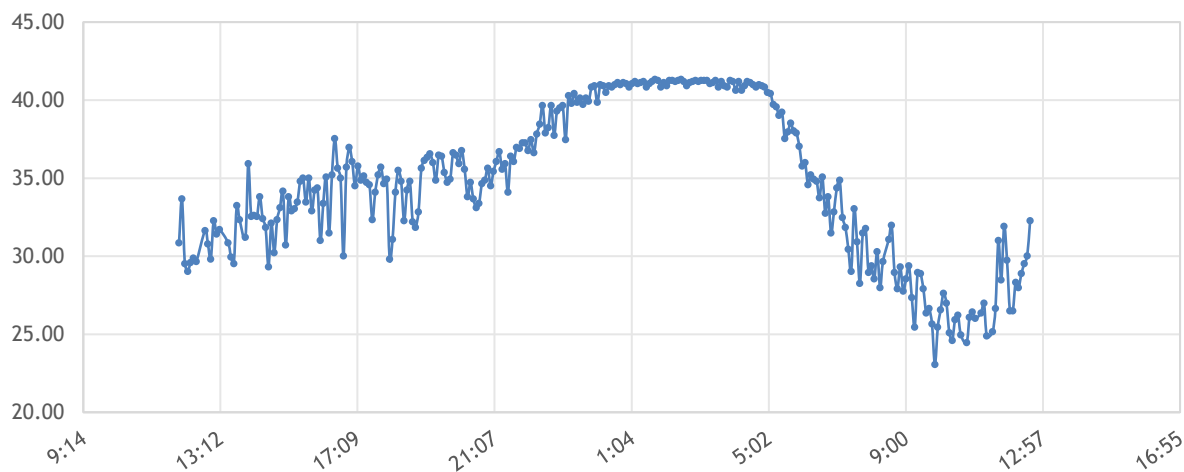
Registro de presión - Subsector 8



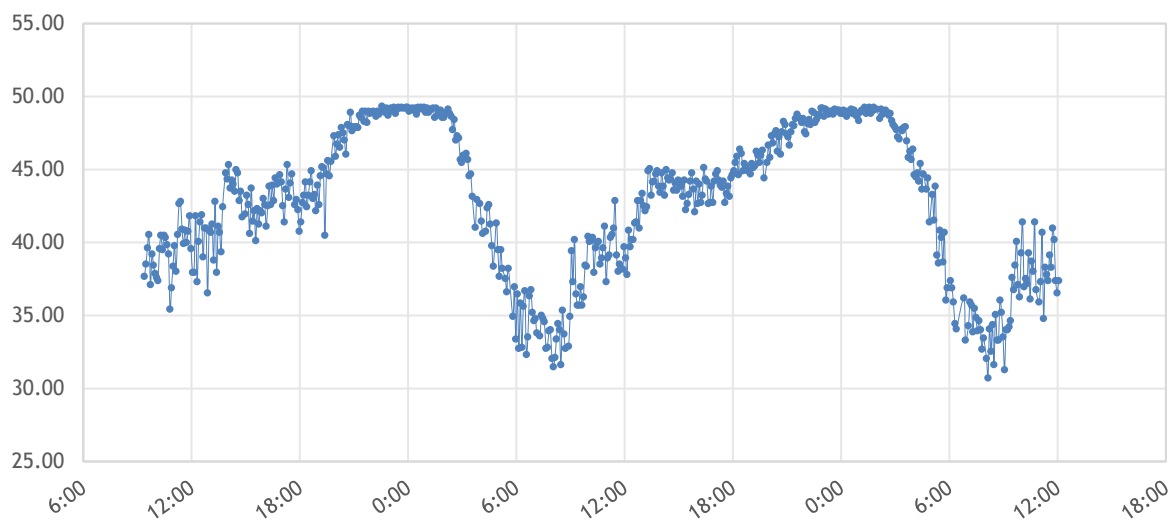
Registro de presión - Subsector 9



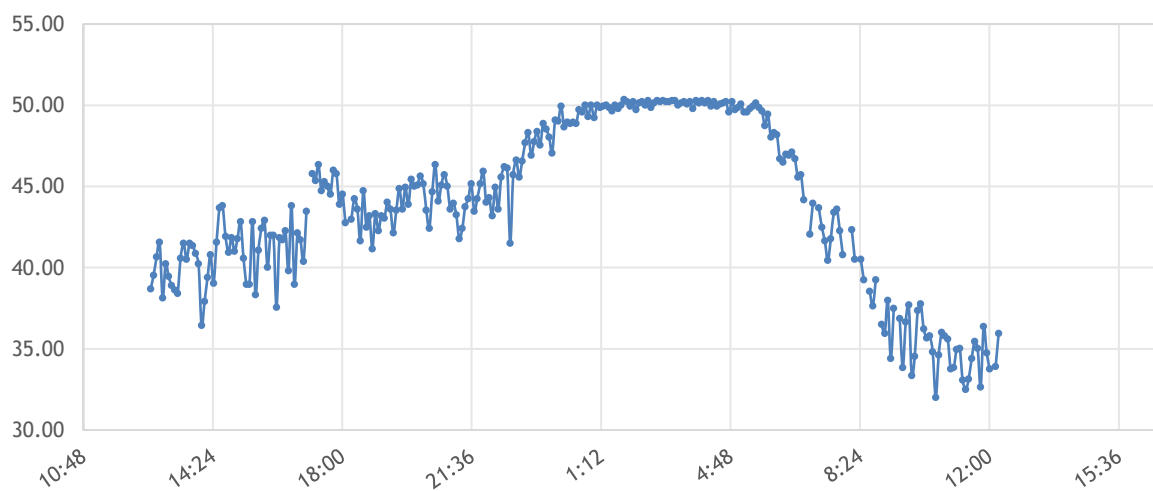
Registro de presión - Subsector 10



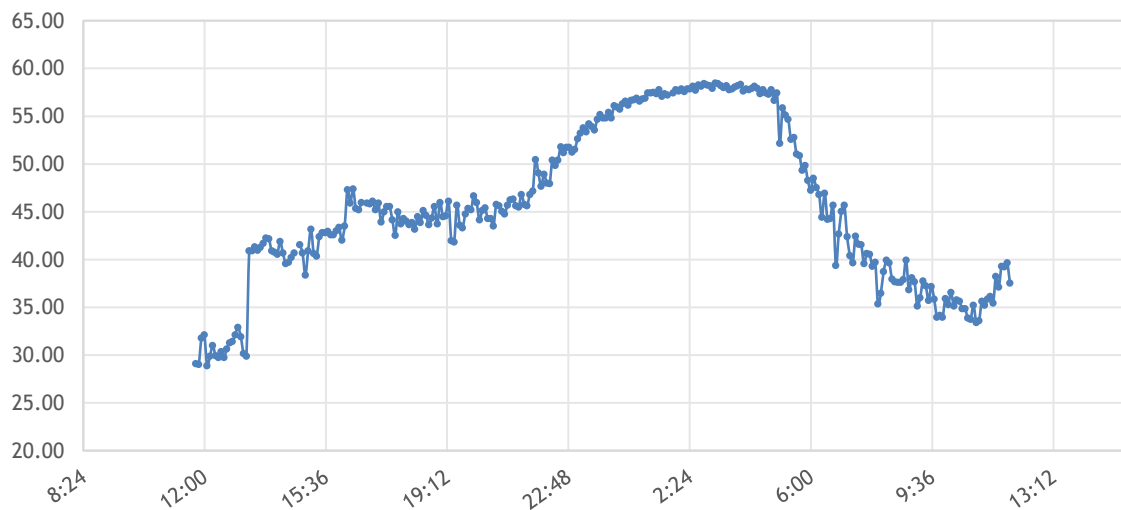
Registro de presión - Subsector 11



Registro de presión - Subsector 12



Registro de presión - Subsector 13



### 3.5. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

La calibración del modelo hidráulico constituye una etapa fundamental en el proceso de modelación de redes de distribución de agua potable, ya que permite ajustar los parámetros del modelo con el fin de lograr una adecuada correspondencia entre los valores simulados y los valores observados en campo.

Para el presente estudio, la calibración se realizó utilizando registros de presión obtenidos en distintos puntos del sector Cruz Verde 1, correspondientes a los subsectores definidos dentro del área de estudio. Estos registros fueron utilizados como referencia para comparar los valores simulados por el modelo hidráulico y realizar los ajustes necesarios hasta alcanzar un nivel de precisión aceptable.

El proceso de calibración se desarrolló tomando como referencia los criterios establecidos por el Comité de Aplicaciones Computacionales de Ingeniería de la American Water Works Association (AWWA), los cuales establecen rangos de precisión recomendados para la comparación entre valores simulados y medidos en modelos hidráulicos de redes de distribución.



| Aplicación del modelo                                       | Precisión requerida                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Planificación, sistemas pequeños (tuberías menores a 600mm) | (1) Altura piezométrica entre $\pm 1.5m$ y $\pm 3.0m$ registrada en los nudos de calibración durante condiciones normales de demanda y para pruebas de campo en hidrantes.<br>(2) Fluctuación del nivel de depósitos entre $\pm 1.0m$ y $\pm 2.0m$ para EPS.<br>(3) Diferencia de caudal entre 10% y 20% en puntos de inyección y bombeos |
| Planificación, sistemas grandes (tuberías mayores a 600mm)  | (1) Altura piezométrica entre $\pm 1.5m$ y $\pm 3.0m$ registrada en los nudos de calibración durante condiciones normales de demanda e instantes de velocidad máxima.<br>(2) Fluctuación del nivel de depósitos entre $\pm 1.0m$ y $\pm 2.0m$ para EPS.<br>(3) Diferencia de caudal entre 10% y 20% en puntos de inyección y bombeos.     |
| Diseño                                                      | (1) Altura piezométrica entre $\pm 1.5m$ y $\pm 3.0m$ registrada en el nudo extremo de la red durante el funcionamiento de hidrantes (escenario de incendio).<br>(2) Fluctuaciones del nivel de depósitos entre $\pm 1.0m$ y $\pm 2.0m$                                                                                                   |
| Análisis de incendios                                       | Altura piezométrica estática y residual entre $\pm 1.5m$ y $\pm 3.0m$ registradas en el nudo representativo de cada zona de presión, durante condiciones normales de demanda y escenario de incendio.                                                                                                                                     |
| Diseño de sectorización                                     | Altura piezométrica entre $\pm 1.5m$ y $\pm 3.0m$ registrada en el punto de división de sectores, durante condiciones normales de demanda y escenario de incendio.                                                                                                                                                                        |
| Sistemas rurales de distribución                            | Altura piezométrica entre $\pm 3.0m$ y $\pm 6.0m$ registrada en los nudos extremos de la red durante condiciones normales y de máxima demanda.                                                                                                                                                                                            |
| Estudios de rehabilitación                                  | Altura piezométrica estática y residual entre $\pm 1.5m$ y $\pm 3.0m$ registradas en el área de estudio, durante condiciones normales de demanda y durante el escenario de incendio                                                                                                                                                       |
| Purgas de la red                                            | Diferencia de caudal entre 10% y 20% para la descarga en hidrante, a 14.0 mca.                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Estudios de eficiencia energética                           | (1) Energía total utilizada entre 5% y 10% para 24 horas<br>(2) Consumida energético horario entre 10% y 20%<br>(3) Demanda máxima instantánea de energía entre 5% y 10%                                                                                                                                                                  |
| Operación de la red                                         | El modelo debe reproducir los problemas que ocurren en el sistema, de tal manera que el modelo se puede utilizar para la toma de decisiones para ese problema en particular.                                                                                                                                                              |
| Planificación en emergencias                                | Altura piezométrica entre $\pm 3.0m$ y $\pm 6.0m$ registrada durante el escenario de emergencia                                                                                                                                                                                                                                           |
| Modelación de desinfectantes                                | El modelo debe reproducir el patrón de concentración del desinfectante, observado a través del tiempo con un error aproximado de 0.1 mg/l a 0.2 mg/l.                                                                                                                                                                                     |

(Fuente: Walski et al 2007)

Tabla 8. Criterios para valorar la calibración de modelos sugerido por Walski et al (2007)

De acuerdo con estos criterios, el propósito del presente modelo corresponde a aplicaciones de planificación y operación de redes de distribución, por lo que la diferencia entre los valores de presión observados y los valores simulados debe mantenerse dentro de rangos aproximados de  $\pm 1.4$  m.c.a a  $\pm 3.5$  m.c.a, dependiendo del porcentaje de mediciones consideradas.

### 3.5.1. DISTRIBUCIÓN DE FUGAS

Las pérdidas fueron modeladas como fugas distribuidas mediante emisores en aproximadamente el 14% de los nodos del sistema, seleccionados de forma representativa a lo largo de la red. Este porcentaje se



adoptó con base en prácticas recomendadas en modelación hidráulica, donde se busca representar el comportamiento distribuido de las fugas sin sobre parametrizar el modelo.

$$Q_{\text{entrada}} = \frac{Q_{\text{consumo}}}{1 - ANC}$$

$$Q_{\text{entrada}} = \frac{36.95}{1 - 0.2773}$$

$$Q_{\text{entrada}} = 51.13 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{fugas}} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{consumo}}$$

$$Q_{\text{fugas}} = 51.13 - 36.95 = 14.17 \text{ l/s}$$

El modelo está constituido por 583 nodos, por lo que se procedió a ajustar el caudal de fugas en 80 nodos, tomando en cuenta las siguiente consideraciones:

- Extremos (finales de tuberías, calles sin retorno, ramales largos)
- Zonas bajas (zonas de baja presión, puntos lejanos del tanque)
- Zonas intermedias (calles principales, nodos con varias conexiones)
- Zonas de alta presión (nodos cercanos al tanque, zonas topográficas bajas)

Distribuidos de la siguiente manera:

| Tipo de zona | Nro. nodos |
|--------------|------------|
| Extremos     | 25         |
| Baja presión | 20         |
| Intermedia   | 20         |
| Alta presión | 15         |
| <b>TOTAL</b> | <b>80</b>  |

Tabla 9. Distribución de fugas

Posteriormente se determina el caudal a distribuirse, obteniendo el siguiente valor:

$$Q_{\text{nodo}} = 14.17/80 = 0.18 \text{ l/s}$$

$$k = \frac{Q}{\sqrt{P}}$$

Donde:

Q = caudal nodo

P = presión promedio

$$k = \frac{14.17}{\sqrt{39.1}} \approx 0.0285$$

La presión promedio fue obtenida del modelo inicial, como se observa en la siguiente ilustración.

| Statistics                       |          |       |
|----------------------------------|----------|-------|
| Count:                           | 583      |       |
| Maximum:                         | 86.1     | m H2O |
| Mean:                            | 39.1     | m H2O |
| Minimum:                         | 4.2      | m H2O |
| Sum:                             | 22.811.1 | m H2O |
| Standard Deviation:              | 16.5     | m H2O |
| <div>Close</div> <div>Help</div> |          |       |

Ilustración 9. Presión media, modelo inicial.

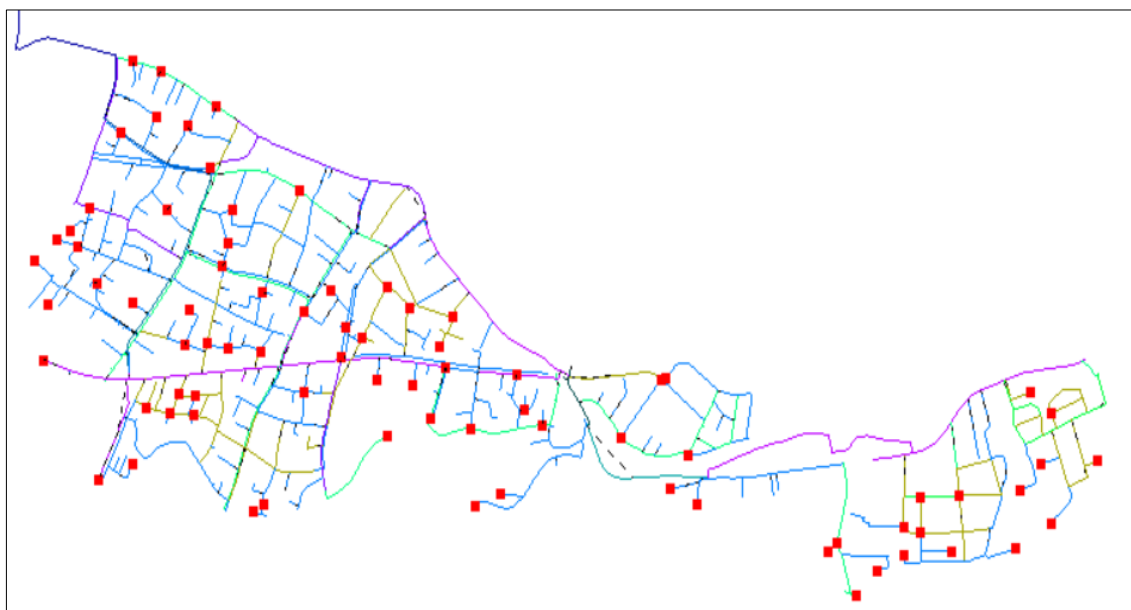


Ilustración 10. Selección de los 80 nodos, dentro del modelo hidráulico.

Como parte del proceso de calibración hidráulica del modelo, se incorporaron las pérdidas físicas del sistema mediante la asignación de coeficientes de emisor distribuidos en nodos representativos de la red. A partir de la estimación del porcentaje de agua no contabilizada (27,73%), se determinó un caudal de fugas que fue incorporado progresivamente hasta alcanzar una adecuada representación del comportamiento real del sistema.

La calibración fue validada en el punto de control ubicado en el nodo 4B1\_N\_1028, donde el modelo simuló un caudal de 50,35 L/s, valor que presenta una diferencia aproximada del 1,5% respecto al caudal estimado de entrada (51,10 L/s). Este nivel de precisión se considera satisfactorio dentro de los rangos aceptados en modelación hidráulica.

En consecuencia, se puede concluir que el modelo ha sido adecuadamente calibrado en términos de caudal, constituyendo una base confiable para continuar con la calibración de presiones y el análisis espacial de pérdidas en la red.

### 3.5.2. PRESIONES

El proceso de calibración se realizó utilizando el módulo Darwin Calibrator del software WaterGEMS, el cual permite ajustar de manera iterativa ciertos parámetros hidráulicos del modelo con el objetivo de minimizar las diferencias entre los valores simulados y los valores medidos en campo.

Inicialmente se cargaron en el modelo los registros de presión obtenidos en los puntos de monitoreo ubicados dentro de cuatro subsectores del área de estudio. Posteriormente, se validará el modelo con los registros de los demás subsectores.

Estos registros corresponden a mediciones realizadas durante el período de análisis y representan las condiciones reales de operación del sistema.

| Subsector | Nodo       | Hora  | Presión |
|-----------|------------|-------|---------|
| 5         | 4B1_N_1341 | 6:00  | 37.61   |
|           |            | 12:00 | 35.57   |
|           |            | 22:00 | 35.64   |
| 6         | 4B1_N_1218 | 6:00  | 58.10   |
|           |            | 12:00 | 55.40   |
|           |            | 22:00 | 57.00   |
| 11        | 4B1_N_1538 | 6:00  | 51.90   |
|           |            | 12:00 | 38.95   |
|           |            | 22:00 | 51.00   |

Tabla 10. Registro de presiones

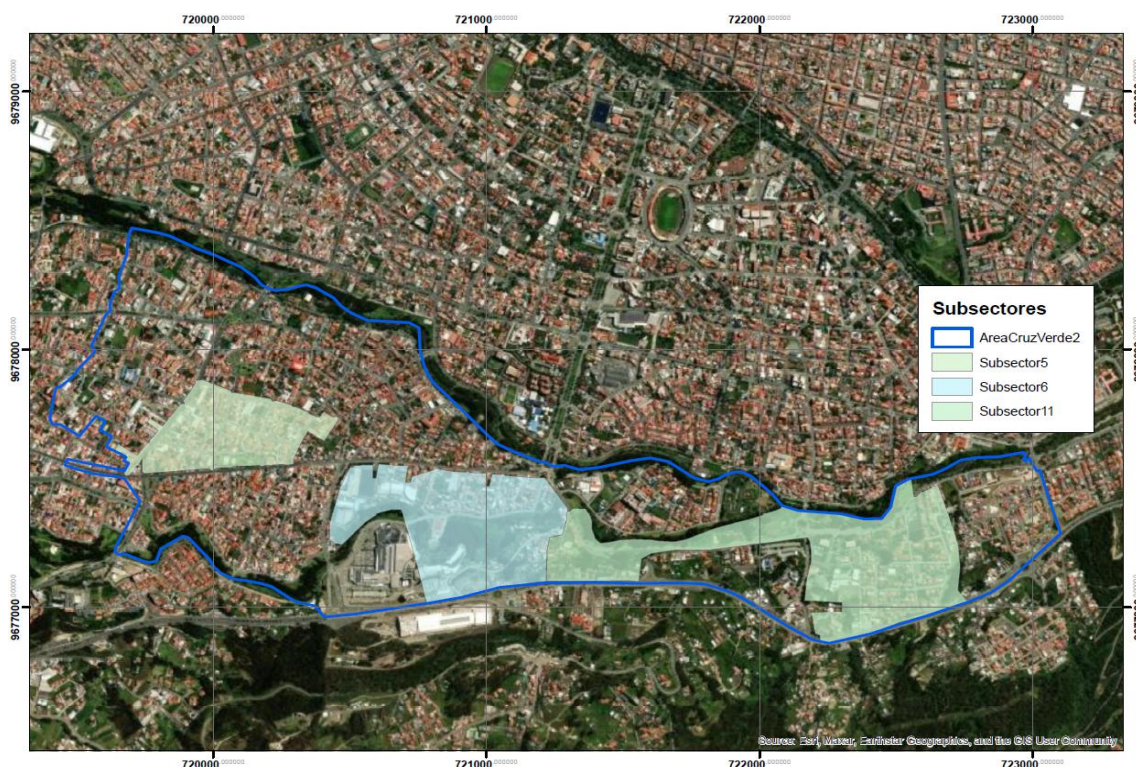


Ilustración 11. Registro de presiones en subsectores para calibración

Posteriormente, el modelo fue configurado para realizar simulaciones en período extendido (Extended Period Simulation - EPS), lo que permite analizar la evolución de presiones y caudales a lo largo del tiempo. Para ello se utilizó el patrón horario de consumo proporcionado por ETAPA EP, el cual fue previamente incorporado al modelo como una curva de variación de demanda.

Una vez definidos los patrones de consumo y las demandas base del sistema, se ejecutaron las simulaciones iniciales del modelo con el fin de comparar los valores simulados con los registros de presión observados en campo.

A continuación, se muestran los resultados de la primera simulación:

Solution

Simulated Results

Simulated Results Browser

Search

Attribute:

Hydraulic Grade

Flow

|   | Snapshot       | Hydraulic Grade RMSE (m) |
|---|----------------|--------------------------|
| 1 | Presiones06:00 | 6.00                     |
| 2 | Presiones12:00 | 3.92                     |
| 3 | Presiones22:00 | 5.78                     |

Simulated Results

|   | Field Data Snapshot | Junction   | Observed Hydraulic Grade (m) | Simulated Hydraulic Grade (m) | Difference (m) |
|---|---------------------|------------|------------------------------|-------------------------------|----------------|
| 1 | Presiones06:00      | 4B1_N_1341 | 2.585.34                     | 2.578.93                      | -6.41          |
| 2 | Presiones06:00      | 4B1_N_1218 | 2.586.14                     | 2.580.35                      | -5.79          |
| 3 | Presiones06:00      | 4B1_N_1538 | 2.588.20                     | 2.582.44                      | -5.76          |
| 4 | Presiones12:00      | 4B1_N_1341 | 2.583.30                     | 2.577.74                      | -5.56          |
| 5 | Presiones12:00      | 4B1_N_1218 | 2.583.45                     | 2.579.93                      | -3.52          |
| 6 | Presiones12:00      | 4B1_N_1538 | 2.578.17                     | 2.579.87                      | 1.70           |
| 7 | Presiones22:00      | 4B1_N_1341 | 2.583.37                     | 2.578.96                      | -4.41          |
| 8 | Presiones22:00      | 4B1_N_1218 | 2.585.04                     | 2.580.36                      | -4.68          |
| 9 | Presiones22:00      | 4B1_N_1538 | 2.590.20                     | 2.582.51                      | -7.68          |

Ilustración 12. Simulación inicial.

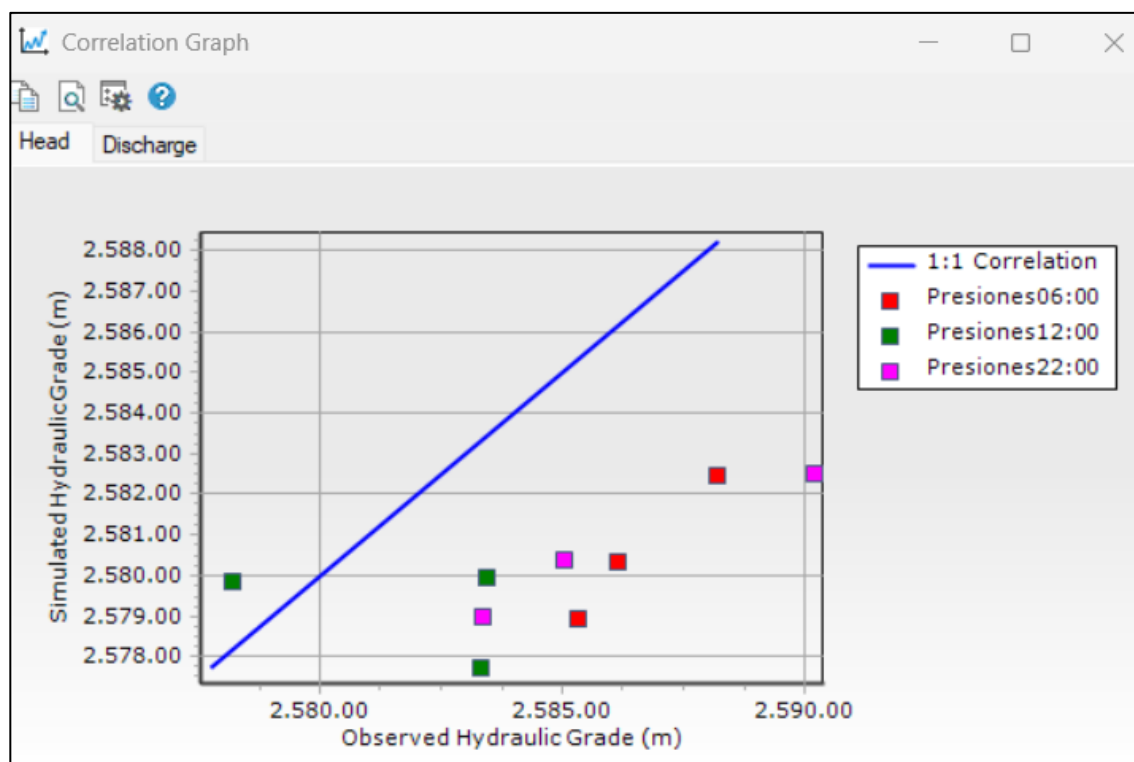


Ilustración 13. Correlación entre cargas hidráulicas observadas y simuladas en Darwin

Con el fin de evaluar el ajuste inicial del modelo hidráulico, se observó el error cuadrático medio (RMSE) entre las presiones simuladas y las presiones observadas en los puntos de monitoreo considerados. Este indicador permite cuantificar la desviación promedio entre los valores simulados y medidos, siendo

ampliamente utilizado en procesos de calibración de modelos hidráulicos.

Los resultados obtenidos en la primera simulación presentan valores de RMSE comprendidos entre 3 y 7 m.c.a para las horas analizadas (06:00, 12:00 y 22:00). Estos valores reflejan un nivel de ajuste preliminar adecuado, considerando que el modelo se encuentra en una etapa inicial de calibración.

Es importante señalar que, en esta fase, el modelo ya incorpora información relevante como la asignación de demandas ajustadas, el patrón horario de consumo y las condiciones operativas del sistema, lo que permite obtener una representación razonable del comportamiento hidráulico.

Adicionalmente, la influencia de las estaciones reductoras de presión dentro del sistema constituye un factor determinante en la distribución de presiones, lo cual puede generar variaciones locales que deben ser consideradas durante el proceso de ajuste del modelo.

En este sentido, los valores de RMSE obtenidos en la primera iteración son consistentes con lo esperado en procesos de calibración progresiva, donde el objetivo es reducir gradualmente las diferencias entre valores simulados y observados mediante ajustes sucesivos en los parámetros hidráulicos del modelo.

### **3.5.3. AJUSTE DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS**

Con base en las diferencias identificadas entre los valores simulados y los valores medidos, se realizaron ajustes progresivos en los parámetros del modelo utilizando la herramienta Darwin Calibrator.

Para mejorar el ajuste del modelo hidráulico se realizaron modificaciones en las pérdidas de carga asociadas a las válvulas de operación, correspondientes principalmente a las válvulas de abastecimiento de los distintos subsectores del área de estudio. Estas válvulas constituyen elementos importantes dentro del comportamiento hidráulico de la red, debido a que regulan las condiciones de presión y distribución de caudales en los diferentes sectores del sistema.

El ajuste se efectuó mediante la modificación del coeficiente adimensional de pérdidas menores (**K**) de cada válvula, permitiendo representar de manera más adecuada las condiciones reales de operación observadas en campo. Adicionalmente, se realizaron ajustes en los coeficientes de rugosidad de las tuberías y en la distribución de demandas dentro del modelo.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la segunda simulación hidráulica, ejecutada una vez realizados los ajustes en las válvulas y parámetros operativos del sistema.

Edisson Xavier Mejía Cornejo



| Solution Simulated Results |                |                          |  |  |  |
|----------------------------|----------------|--------------------------|--|--|--|
| Simulated Results Browser  |                |                          |  |  |  |
| Search                     |                |                          |  |  |  |
| Attribute:                 |                |                          |  |  |  |
| Hydraulic Grade            |                |                          |  |  |  |
| Flow                       |                |                          |  |  |  |
|                            | Snapshot       | Hydraulic Grade RMSE (m) |  |  |  |
| 1                          | Presiones06:00 | 0.55                     |  |  |  |
| 2                          | Presiones12:00 | 1.04                     |  |  |  |
| 3                          | Presiones22:00 | 1.04                     |  |  |  |

| Simulated Results |                     |            |                              |                               |                |
|-------------------|---------------------|------------|------------------------------|-------------------------------|----------------|
|                   | Field Data Snapshot | Junction   | Observed Hydraulic Grade (m) | Simulated Hydraulic Grade (m) | Difference (m) |
| 1                 | Presiones06:00      | 4B1_N_1341 | 2.578.33                     | 2.578.52                      | 0.19           |
| 2                 | Presiones06:00      | 4B1_N_1218 | 2.581.14                     | 2.580.21                      | -0.93          |
| 3                 | Presiones06:00      | 4B1_N_1538 | 2.581.20                     | 2.581.23                      | 0.02           |
| 4                 | Presiones12:00      | 4B1_N_1341 | 2.576.30                     | 2.577.14                      | 0.84           |
| 5                 | Presiones12:00      | 4B1_N_1218 | 2.578.45                     | 2.579.73                      | 1.28           |
| 6                 | Presiones12:00      | 4B1_N_1538 | 2.577.21                     | 2.578.16                      | 0.95           |
| 7                 | Presiones22:00      | 4B1_N_1341 | 2.577.23                     | 2.578.56                      | 1.34           |
| 8                 | Presiones22:00      | 4B1_N_1218 | 2.580.05                     | 2.580.23                      | 0.18           |
| 9                 | Presiones22:00      | 4B1_N_1538 | 2.582.50                     | 2.581.32                      | -1.18          |

Ilustración 14. Resultados de la segunda simulación. (Calibración)

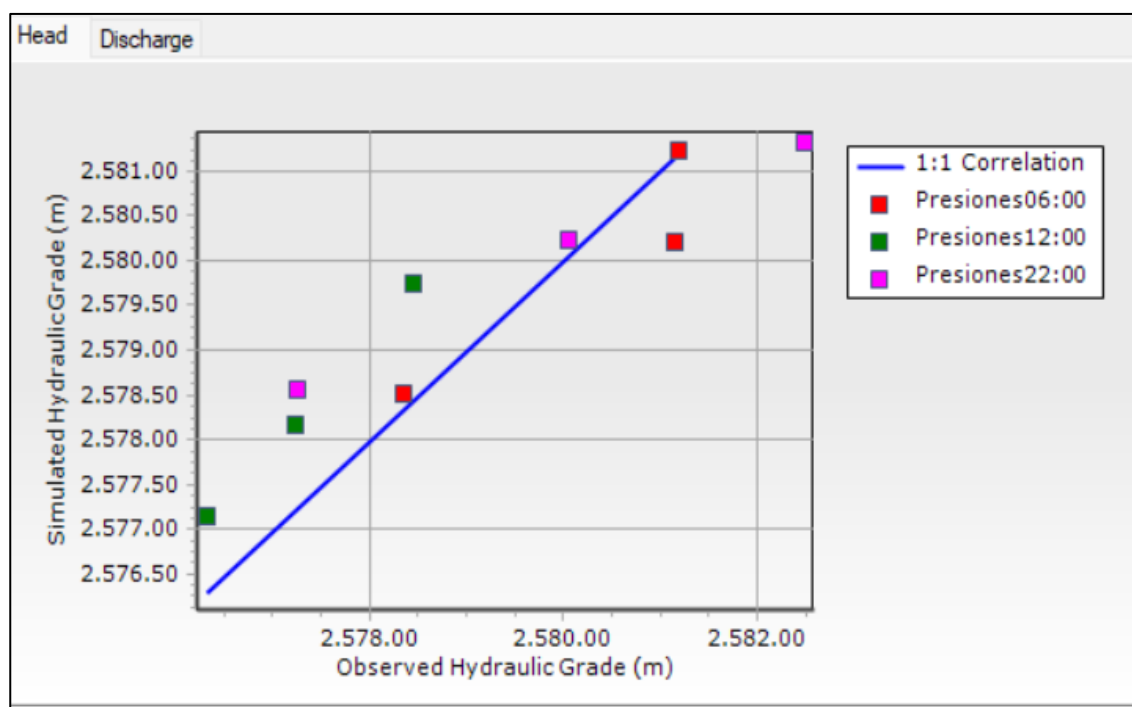


Ilustración 15. Correlación entre cargas hidráulicas observadas y simuladas (Simulación 2)

Los resultados obtenidos muestran una reducción significativa tanto en el error cuadrático medio (RMSE) como en las diferencias entre las cargas piezométricas observadas y simuladas en los nodos analizados. Los valores de RMSE obtenidos para las horas de análisis corresponden a 0.55 m, 1.04 m y 1.04 m,



evidenciando una mejora considerable respecto a la simulación inicial y un adecuado nivel de ajuste del modelo hidráulico.

De igual manera, las diferencias entre el Hydraulic Grade Line (HGL) observado y el HGL simulado en los puntos de monitoreo presentan valores reducidos, manteniéndose en la mayoría de los casos cercanos a  $\pm 1$  m.c.a., lo cual indica una buena aproximación entre el comportamiento hidráulico representado por el modelo y las condiciones reales del sistema, cumpliendo lo establecido en los criterios para valorar la calibración de modelos sugerido por Walski et al (2007).

Los criterios utilizados para evaluar el nivel de ajuste del modelo se fundamentan principalmente en la comparación de presiones, caudales y cargas piezométricas observadas y simuladas dentro de la red.

Adicionalmente, los resultados obtenidos evidencian la influencia que ejercen las válvulas reductoras y de abastecimiento sobre el comportamiento hidráulico del sistema, particularmente en la distribución de presiones dentro de los distintos subsectores. Esto confirma la importancia de representar adecuadamente las condiciones operativas reales de estos elementos durante el proceso de calibración.

Los valores finales ajustados de los coeficientes de rugosidad de las tuberías, obtenidos a partir del proceso de calibración correspondiente a la simulación 2, presentaron una disminución respecto a los valores inicialmente asignados al modelo. Los valores iniciales considerados representan condiciones asociadas a tuberías nuevas, conforme a los rangos recomendados en la literatura.

Posteriormente, durante el proceso de calibración, los coeficientes fueron ajustados hasta obtener una mejor correspondencia entre las presiones simuladas y las presiones observadas en campo. Los valores finales obtenidos son consistentes con el comportamiento esperado de tuberías que presentan desgaste asociado al tiempo de operación del sistema, considerando que en varios tramos de la red analizada las tuberías superan los veinte años de servicio.

Este ajuste permitió representar de manera más realista las pérdidas de carga dentro de la red y mejorar el desempeño hidráulico del modelo calibrado.

A continuación, se presentan los valores iniciales y finales de los coeficientes de rugosidad utilizados durante el proceso de calibración.

| Material de tubería         | Rugosidad inicial | Rugosidad calibrada |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| PVC - Policloruro de Vinilo | 150               | 138                 |
| AC - Asbesto cemento        | 140               | 133                 |

Tabla 11. Rugosidades iniciales y ajustadas luego de la calibración - simulación 2

### 3.5.4. VALIDACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

Luego de la calibración del modelo hidráulico, fue necesario realizar la validación del modelo con el fin de verificar que los parámetros obtenidos permitan representar de manera adecuada el comportamiento real de la red de distribución del sector de estudio, para posteriormente utilizar el modelo en análisis operativos y evaluaciones futuras del sistema.

Para el proceso de validación del modelo hidráulico del sistema Tomebamba, se emplearon mediciones correspondientes a otros subsectores hidráulicos, seleccionándose específicamente los subsectores 2, 3 y 8, debido a que presentaban registros de presión más estables y consistentes en comparación con otros subsectores del sistema, en los cuales se evidenciaban mayores fluctuaciones y variaciones operativas. Adicionalmente, el sector analizado corresponde a uno de los sectores relativamente más pequeños del sistema Tomebamba, condición que facilitó el ajuste hidráulico y contribuyó a obtener resultados satisfactorios durante el proceso de calibración y validación.

| Subsector | Nodo       | Hora  | Presión |
|-----------|------------|-------|---------|
| 2         | 4B1_N_1546 | 6:00  | 39.3    |
|           |            | 12:00 | 36.9    |
|           |            | 22:00 | 38.4    |
| 3         | 4B1_N_1541 | 6:00  | 43.9    |
|           |            | 12:00 | 41.5    |
|           |            | 22:00 | 42.9    |
| 8         | 4B1_N_1004 | 6:00  | 50.5    |
|           |            | 12:00 | 49.9    |
|           |            | 22:00 | 50.3    |

Tabla 12. Subsectores para validación del modelo.

Según se observa en la siguiente ilustración, los resultados obtenidos con la simulación del modelo calibrado muestran un valor de RMSE cercano a cero, evidenciando un adecuado ajuste entre los datos simulados y observados. Y las diferencias entre las cargas piezométricas observadas y simuladas se mantuvieron dentro de un rango menor a  $\pm 2.5$  m.c.a.

Con base en estos resultados, se considera que el modelo hidráulico presenta un nivel adecuado de confiabilidad, dándose por finalizado el proceso de validación.

Solution

Simulated Results

Simulated Results Browser

Search

Attribute:

Hydraulic Grade

Flow

|   | Snapshot        | Hydraulic Grade RMSE (m) |
|---|-----------------|--------------------------|
| 1 | Presiones 6:00  | 0.74                     |
| 2 | Presiones 12:00 | 0.71                     |
| 3 | Presiones 22:00 | 0.71                     |

Simulated Results

|   | Field Data Snapshot | Junction   | Observed Hydraulic Grade (m) | Simulated Hydraulic Grade (m) | Difference (m) |
|---|---------------------|------------|------------------------------|-------------------------------|----------------|
| 1 | Presiones 6:00      | 4B1_N_1546 | 2.579.37                     | 2.579.56                      | 0.19           |
| 2 | Presiones 6:00      | 4B1_N_1541 | 2.587.81                     | 2.586.57                      | -1.24          |
| 3 | Presiones 6:00      | 4B1_N_1005 | 2.580.62                     | 2.580.85                      | 0.23           |
| 4 | Presiones 12:00     | 4B1_N_1546 | 2.576.97                     | 2.577.12                      | 0.15           |
| 5 | Presiones 12:00     | 4B1_N_1541 | 2.585.42                     | 2.584.21                      | -1.20          |
| 6 | Presiones 12:00     | 4B1_N_1005 | 2.580.02                     | 2.580.27                      | 0.25           |
| 7 | Presiones 22:00     | 4B1_N_1546 | 2.578.47                     | 2.578.58                      | 0.11           |
| 8 | Presiones 22:00     | 4B1_N_1541 | 2.586.81                     | 2.585.61                      | -1.21          |
| 9 | Presiones 22:00     | 4B1_N_1005 | 2.580.42                     | 2.580.61                      | 0.19           |

Ilustración 16. Resultados de validación.

En consecuencia, el modelo podrá ser utilizado para análisis operativos, evaluación de escenarios y planificación futura del sistema de distribución correspondiente al sector de estudio.

### 3.6. VERIFICACIÓN ESPACIAL CON REGISTROS DE FUGAS

Con el fin de complementar el análisis del modelo hidráulico, se incorporó información geoespacial correspondiente a registros históricos de fugas proporcionados por la Empresa Pública Municipal ETAPA EP. Esta información se encuentra en formato shapefile (SHP) y contiene la ubicación geográfica de eventos de fuga detectados en la red de distribución del sector.

El archivo geoespacial fue integrado al sistema de información geográfica utilizado para el análisis del área de estudio, permitiendo visualizar la distribución espacial de las fugas registradas dentro del sector Cruz Verde 1.

Posteriormente, se realizó una comparación entre la ubicación de estas fugas y los resultados obtenidos a partir del modelo hidráulico calibrado.

Este análisis permitió evaluar la correspondencia entre las zonas con posibles pérdidas reales identificadas por el modelo y los registros históricos de fugas detectadas en campo. La coincidencia espacial entre ambas fuentes de información constituye un indicador relevante de la capacidad del modelo hidráulico para apoyar la identificación de sectores con mayor probabilidad de presentar fugas dentro de la red de distribución.

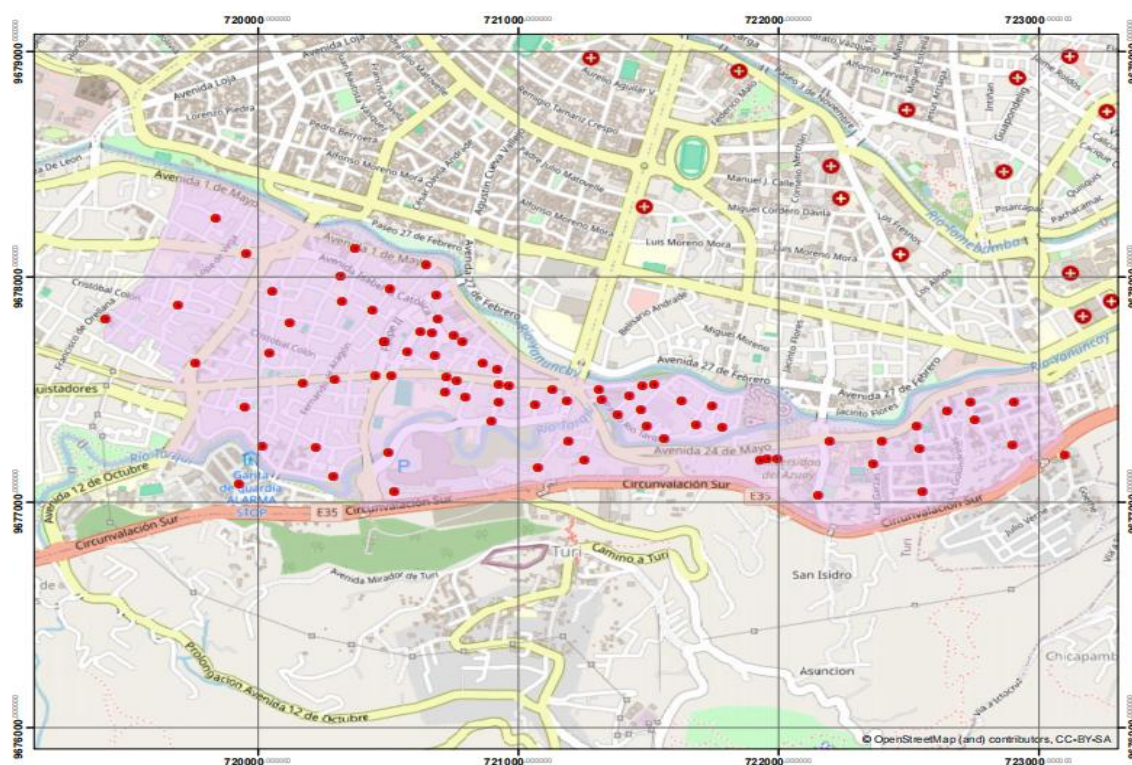


Ilustración 17. Puntos geofonados en Cruz Verde 1

Los resultados de esta comparación se presentan y analizan en el capítulo de resultados, donde se discute la relación entre las zonas de presión altas y la ubicación de eventos de fuga registrados por ETAPA EP.

## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DETECCIÓN DE POSIBLES FUGAS**

### **4.1. EVALUACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO CALIBRADO**

Una vez finalizado el proceso de calibración del modelo hidráulico, se procedió a evaluar su desempeño mediante la comparación entre los valores de presión simulados por el modelo y los valores de presión registrados en campo en los distintos puntos de monitoreo ubicados dentro del sector de estudio.

Los resultados obtenidos muestran que las diferencias entre los valores de presión simulados y los valores observados en campo se mantienen dentro de los rangos de precisión recomendados por la American Water Works Association (AWWA) para modelos hidráulicos destinados a aplicaciones de planificación y operación de redes de distribución. En particular, se verificó que las diferencias entre valores simulados y medidos se encuentran dentro del intervalo aproximado de  $\pm 1.4$  mca a  $\pm 3.5$  mca, lo cual indica que el modelo reproduce de manera adecuada las condiciones hidráulicas del sistema.

La adecuada correspondencia entre los valores simulados y observados permite considerar que el modelo calibrado constituye una representación confiable del comportamiento hidráulico del sector Cruz Verde 1, lo que habilita su utilización para el análisis posterior del sistema y la identificación de posibles anomalías hidráulicas.

### **4.2. ANÁLISIS ESPACIAL DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO**

Con el fin de comprender el comportamiento hidráulico del sistema de distribución dentro del área de estudio, se realizó un análisis espacial de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones hidráulicas. Este análisis se basó en la generación de una corrida hidráulica que representa el comportamiento de presiones en los diferentes nodos de la red.

Los resultados permiten observar la variación espacial de las presiones dentro del sector Cruz Verde 1, evidenciando diferencias asociadas principalmente a las condiciones topográficas del terreno, la configuración de la red y la distribución de la demanda. En general, el sistema presenta un comportamiento hidráulico coherente con las características del sector urbano analizado.

Durante el análisis hidráulico de la red se identificaron zonas con presiones elevadas, expresadas en metros de columna de agua (m.c.a.), las cuales presentan relación con los sectores donde existe un

mayor registro de fugas dentro del sistema de distribución. De acuerdo con la clasificación realizada, las presiones más altas corresponden a las zonas representadas en color rojo, con valores comprendidos entre 50 y 70 m.c.a., seguidas por las zonas en color azul, cuyos valores se encuentran entre 40 y 50 m.c.a.

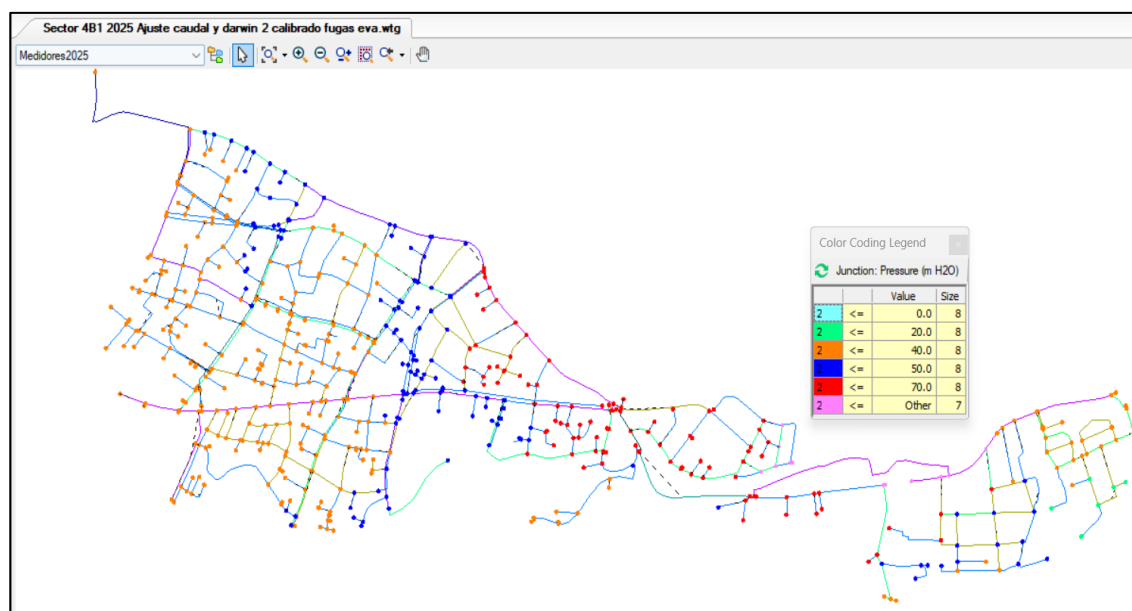


Ilustración 18. Zonas de presión de Cruz Verde 1.

Con el objetivo de complementar el análisis realizado a partir del modelo hidráulico, se incorporó información geoespacial correspondiente a registros históricos de fugas proporcionados por la Empresa Pública Municipal ETAPA EP. Esta información se encuentra disponible en formato shapefile (SHP) y contiene la localización geográfica de eventos de fuga detectados en la red de distribución del sector de estudio.

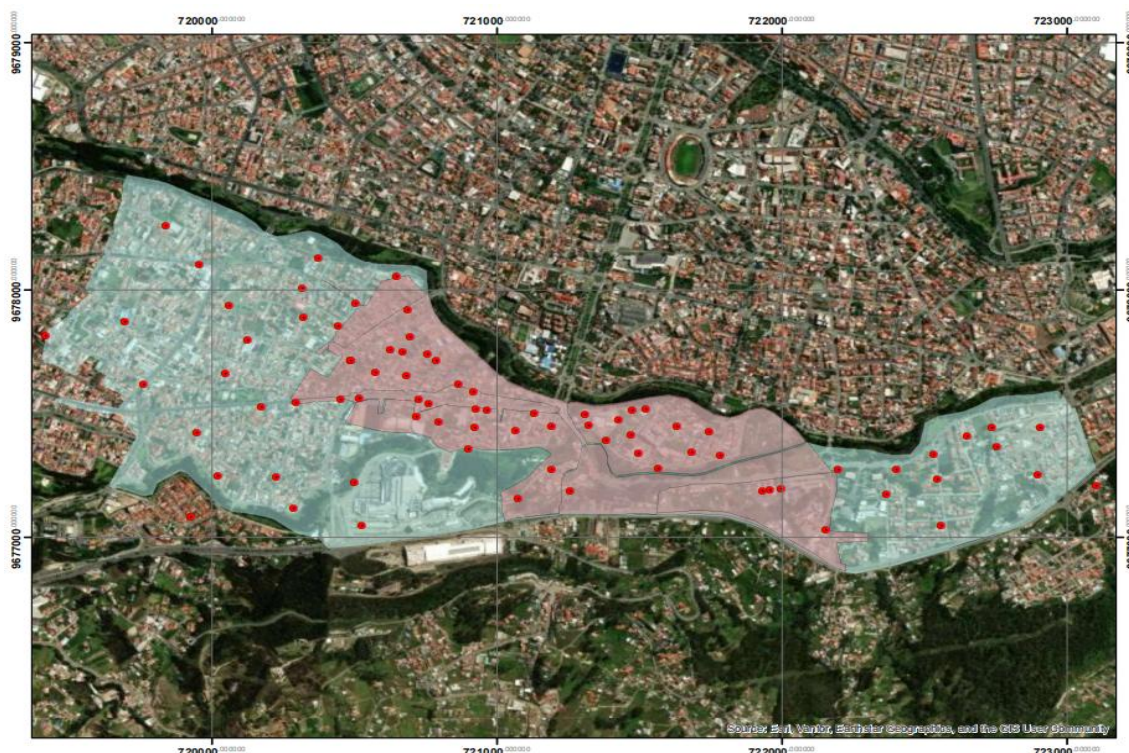
El archivo fue integrado al sistema de información geográfica utilizado para el análisis del área de estudio, permitiendo visualizar la distribución espacial de las fugas registradas dentro del sector Cruz Verde 1. Posteriormente, se realizó una superposición entre la red hidráulica modelada, la delimitación de los subsectores y la ubicación de los eventos de fuga registrados.

El análisis de esta superposición permitió identificar coincidencias entre los subsectores donde el modelo hidráulico en donde se evidencia una relación entre los sectores con mayores presiones y la incidencia de pérdidas físicas, debido a que las altas presiones incrementan los esfuerzos hidráulicos sobre las tuberías y accesorios de la red, favoreciendo la aparición de fugas y roturas.

En este sentido, el análisis permitió identificar áreas críticas dentro del sistema, las cuales requieren



mayor atención para la implementación de estrategias de control de presiones y reducción de pérdidas físicas.



*Ilustración 19. Relación entre fugas registradas y zonas de presión elevadas.*

### 4.3. IDENTIFICACIÓN DE SUBSECTORES CRÍTICOS

El análisis realizado permitió identificar una mayor incidencia de fugas en los subsectores **06, 01, 13 y 11**, correspondientes principalmente a las zonas de la avenida Isabel La Católica, Felipe II, avenida Don Bosco, Paseo Río Tarqui, Julián Matadero, avenida Primero de Mayo, sector del Colegio Técnico Salesiano y La Isla.

Estos subsectores requieren mayor atención operativa, debido a que presentan condiciones de presión relativamente más altas dentro del sistema, lo que puede favorecer la aparición de pérdidas reales, especialmente en tramos de tubería con mayor antigüedad.

En este sentido, la geolocalización de fugas permite identificar zonas prioritarias para actividades de monitoreo, mantenimiento y control de pérdidas. Los resultados obtenidos muestran que la integración entre modelación hidráulica y registros históricos georreferenciados constituye una herramienta útil para apoyar la gestión técnica del sistema de distribución.



## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió desarrollar y calibrar un modelo hidráulico del sector Cruz Verde 1, perteneciente al sistema Tomebamba de la ciudad de Cuenca, utilizando información técnica proporcionada por la Empresa Pública Municipal ETAPA EP, correspondiente a infraestructura de red, micro medición, registros de presión y datos históricos de fugas.

El modelo hidráulico construido en WaterGEMS logró representar adecuadamente el comportamiento real del sistema de distribución, debido a que las diferencias entre las presiones simuladas y observadas se mantuvieron dentro de rangos aceptables para aplicaciones de planificación y operación de redes de agua potable. Los resultados obtenidos durante el proceso de calibración evidenciaron una disminución progresiva del error RMSE, alcanzando valores cercanos a  $\pm 1$  m.c.a., lo cual permitió validar la confiabilidad del modelo desarrollado.

El proceso de calibración hidráulica permitió ajustar los coeficientes de rugosidad de las tuberías y las pérdidas menores asociadas a válvulas de operación, obteniéndose valores coherentes con las condiciones reales de la red y con la antigüedad de varios tramos del sistema de distribución. Los coeficientes calibrados reflejan el comportamiento esperado de tuberías que presentan desgaste debido a los años de operación, mejorando la representación de las pérdidas de carga dentro del modelo hidráulico.

La incorporación de simulaciones en período extendido permitió representar de manera más adecuada la variación temporal de las presiones y demandas dentro del sistema. Asimismo, el uso de patrones horarios de consumo proporcionados por ETAPA EP permitió reproducir las condiciones operativas del sector durante las distintas horas del día, mejorando el desempeño del modelo durante el proceso de calibración.

El análisis espacial realizado permitió identificar que los subsectores 06, 01, 13 y 11 presentan una mayor incidencia de eventos de fuga y condiciones de presión relativamente elevadas dentro del sistema. Estas zonas corresponden principalmente a sectores como avenida Isabel La Católica, Felipe II, avenida Don Bosco, Paseo Río Tarqui, Julián Matadero, avenida Primero de Mayo, sector del Colegio Técnico Salesiano y La Isla.

La comparación entre los resultados del modelo hidráulico y los registros históricos de fugas georreferenciadas evidenció una relación entre las zonas de mayor presión y la ocurrencia de pérdidas reales dentro de la red de distribución. Esto demuestra que la integración entre modelación hidráulica y herramientas geoespaciales constituye una metodología útil para apoyar la identificación de subsectores críticos y priorizar actividades de control de pérdidas.

Durante el desarrollo de la investigación se identificaron ciertas inconsistencias en la información catastral de la red, principalmente relacionadas con características de tuberías, conectividad y actualización de elementos hidráulicos. Estas condiciones influyen directamente en la precisión de los modelos hidráulicos y evidencian la importancia de mantener información técnica actualizada para mejorar la representación del sistema.

Finalmente, la presente investigación permitió evidenciar que la modelación hidráulica constituye una herramienta de apoyo para la gestión operativa de sistemas de distribución de agua potable, permitiendo analizar el comportamiento hidráulico de la red, identificar zonas con posibles pérdidas reales y apoyar la planificación de actividades orientadas a la reducción de agua no contabilizada.

## 5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda mantener un proceso continuo de actualización del modelo hidráulico del sector Cruz Verde 1, incorporando periódicamente información de nuevos consumos, modificaciones de red y registros operativos como abierto o cerrado de válvulas, con el fin de conservar una representación adecuada de las condiciones reales del sistema.

Es importante fortalecer los procesos de actualización del catastro de redes, debido a que inconsistencias en la información de tuberías, válvulas y conexiones pueden afectar directamente la precisión de los modelos hidráulicos y limitar el análisis del comportamiento del sistema.

Se recomienda actualizar periódicamente los patrones horarios de consumo utilizados en la modelación hidráulica, considerando que los hábitos de consumo de los usuarios pueden variar con el tiempo y modificar las condiciones operativas de la red.

Asimismo, resulta importante continuar fortaleciendo los programas de micro medición dentro del sistema de distribución, debido a que la calidad y precisión de los registros de consumo influyen directamente en la estimación de demandas base y en el desempeño del modelo hidráulico.

Se recomienda priorizar actividades de monitoreo y control de pérdidas en los subsectores 06, 01, 13 y 11, debido a que estas zonas presentan una mayor concentración de eventos de fuga y condiciones de presión relativamente elevadas dentro del sistema.

De igual manera, se recomienda realizar campañas periódicas de detección de fugas y evaluación del estado de las tuberías en sectores donde la red presenta mayor antigüedad, con el fin de reducir pérdidas reales y mejorar la eficiencia operativa del sistema de distribución.

Finalmente, se recomienda continuar integrando herramientas de modelación hidráulica y sistemas de información geográfica dentro de los procesos de gestión operativa de ETAPA EP, debido a que su aplicación conjunta permite mejorar el análisis del comportamiento de la red y apoyar la toma de decisiones relacionadas con el control de agua no contabilizada.

### 5.3. BIBLIOGRAFÍA

Alberto, J., & Villa, N. (2014). Modelación hidráulica y calibración de redes de distribución de agua potable. Universidad Nacional de Colombia.

American Water Works Association (AWWA). (2012). Computer Modeling of Water Distribution Systems (Manual M32). Denver, Colorado: AWWA.

Bentley Systems. (2023). WaterGEMS CONNECT Edition User Guide. Bentley Systems Incorporated.

Cabrera, E., Cabrera Jr., E., Cobacho, R., & Soriano, J. (1999). Towards an energy labelling of pressurised water networks. *Water Science and Technology*, 39(10-11), 299-306.

Farley, M., & Trow, S. (2003). *Losses in Water Distribution Networks: A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control*. London: IWA Publishing.

Fuertes, V. S., Iglesias, P. L., Martínez, S. F., & Cabrera, E. (2002). Gestión de redes de distribución de agua potable. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

International Water Association (IWA). (2000). *Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures*. London: IWA Publishing.

Lambert, A. (2002). International report: Water losses management and techniques. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4), 1-20.

Mays, L. W. (2000). *Water Distribution Systems Handbook*. New York: McGraw-Hill.

Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency (EPA).

Thornton, J., Sturm, R., & Kunkel, G. (2008). *Water Loss Control*. New York: McGraw-Hill.

Tucciarelli, T., Criminisi, A., & Termini, D. (1999). Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(3), 277-285.

Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Bentley Institute Press.

Walski, T. M., Brill, E. D., Gessler, J., Goulter, I., Jeppson, R., Lansey, K., ... & Ormsbee, L. (1987). Battle of the network models: Epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2), 191-203.

World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). Geneva: World Health Organization.

Yang, Y., Burn, S., & DeSilva, D. (2011). Development of a water distribution system leakage management strategy using hydraulic modeling. *Procedia Engineering*, 119, 136-145