



**Diagnóstico de la red de distribución del acueducto Piedras Blancas en el corregimiento de Santa Elena, y evaluación de los efectos en el sistema al aumentar la cobertura conectando el sistema de la corporación de acueducto Mazo.**

Maryori Andrea Jiménez Castaño

Informe de práctica para optar el título de Ingeniera Sanitaria e Ingeniera Civil

Asesor Interno

Neiler de Jesús Medina Peña, PhD

Asesora Externa

Natalia Zapata Puerta, Ingeniera Civil, Especialista en gerencia de proyectos.

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental  
Ingeniería Sanitaria e Ingeniería Civil  
Medellín, Antioquia, Colombia

2024

---

Cita

(Jimenez-Castaño, M.A. 2024)

---

**Referencia**

**Estilo APA 7 (2020)**

Jimenez-Castaño, M.A. (2024). *Diagnóstico de la red de distribución del acueducto Piedras Blancas en el corregimiento de santa elena y evaluación de los efectos en el sistema al aumentar la cobertura conectando al sistema de la corporación de acueducto Mazo*. [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

---



**Créditos a escenario de prácticas:** Distrito de Medellín.

**Asesor en la Universidad de Antioquia:** Neiler de Jesús Medina Peña.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano de la Facultad de Ingeniería:** Julio César Saldarriaga Molina

**Jefe de departamento:** Lina María Berrouët Cadavid

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Este trabajo se lo dedico a mi familia, pero especialmente a mis pilares, quienes han sido la base de cada paso y logro que he dado. A mi papá, mi ángel en el cielo, que siento cerca siempre cuidándome y guiándome. A mi mamá, que con su esfuerzo, cuidado y paciencia ha hecho posible que me enfoque en mi carrera sin preocupaciones, siempre dándome lo mejor que pudo, enseñándome a ser fuerte, a seguir mis sueños y a ser merecedora de todo lo bonito que tiene la vida preparada para mí. Sus concejos y su amor son mi brújula que me orienta cada día, siempre estaré agradecida por todo lo que me ha dado, y por el privilegio de ser su hija. A mi abuela Rosa, por su cariño incondicional y por haberme cuidado con tanto amor desde mi infancia. Y a mi hermano, mi compañero de vida y aventuras, quien me ha apoyado en cada decisión y me ha inspirado con su ejemplo de generosidad, fortaleza y disciplina. Este logro no es mío, es de nosotros, un testimonio de todo lo que hemos construido juntos. Los amo profundamente.

## **Agradecimientos**

Agradezco primero a Dios por la vida, por permitirme llegar hasta acá y darme toda la sabiduría y fortaleza.

A mi familia y novio, que han sido mi apoyo constante no solo en el desarrollo de mi carrera, sino en cada momento en el que he necesitado un abrazo, un consejo, una salida o simplemente el cariño y afecto incondicional que siempre me han brindado.

A mis amigos y compañeros de la universidad, quienes con su compañerismo me enseñaron el valor del trabajo en equipo. Gracias por instruirme, explicarme cuando no comprendía y por apoyarme en cada proyecto.

A los profesores y en especial a esos que me hicieron amar mis carreras, por sus enseñanzas y humanidad que me permitieron crecer tanto profesional como personalmente.

A mi asesor de la universidad por todo su acompañamiento, dedicación y tiempo en este proyecto. Su sabiduría, profesionalismo, experiencia y calidez fueron esenciales para la culminación de este trabajo.

A la Universidad de Antioquia, mi segundo hogar, que me brindo una de las mejores etapas de mi vida y la realización de un sueño que ahora se materializa.

Al Distrito de Medellín por brindarme la oportunidad de realizar mis prácticas académicas y culminar de la mejor manera esta etapa de mi vida, que ha sido una experiencia enriquecedora y que siempre llevaré en mi corazón. Así mismo, a los ingenieros y compañeros que me aportaron todo su conocimiento en este espacio de prácticas.

También quiero agradecer al acueducto Piedras Blancas y Mazo por brindarme el espacio, disponibilidad y apoyo.

Finalmente, me agradezco a mí, por haber llegado hasta acá, por no rendirme y siempre creer fielmente en mis sueños.

## CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT .....	11
1. INTRODUCCIÓN .....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivo general .....	13
2.2. Objetivos específicos.....	13
3. MARCO TEÓRICO .....	14
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
4.1. Antecedentes .....	17
5. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ACUEDUCTO .....	19
5.1. CORPORACIÓN DE ACUEDUCTO VEREDAL PIERDRAS BLANCAS.....	19
5.1.1. Fuente.....	19
5.1.2. Aducción .....	19
5.1.3. Desarenador .....	19
5.1.4. Estación de Bombeo .....	20
5.1.5. Conducción .....	20
5.1.6. Planta de Tratamiento .....	20
5.2. CORPORACIÓN DE ACUEDUCTO MAZO .....	23
5.2.1. Fuente.....	23
5.2.2. Aducción .....	24
5.2.3. Cámara de quietamiento.....	24
5.2.4. Prefiltro .....	24
5.2.5. Conducción .....	25
5.2.6. Planta de tratamiento.....	25

6. METODOLOGÍA .....	27
6.1. Fase1: Recolección de datos .....	27
6.2. Fase 2: Inspección de campo.....	28
6.3. Fase 3: Estimación preliminar de la demanda.....	28
6.3.1. Proyección de usuarios .....	28
6.3.2. Estimación de la población flotante y/o migratoria .....	32
6.3.3. Estimación de la demanda futura.....	35
6.3.4. Curva de demanda.....	38
6.4. Fase 4: Digitación de datos en EPANET .....	40
6.5. Fase 5: Calibración de las presiones .....	41
7. RESULTADOS .....	43
7.1. Calibración .....	43
7.2. Diagnóstico de la Red actual.....	45
7.2.1. Chequeo de presiones. ....	45
7.2.2. Chequeo de velocidades.....	48
7.2.3. Implementación de válvula reguladora de presión -VRP. ....	49
7.2.4. Pérdidas Totales de agua del sistema.....	50
7.3. Red de distribución Piedras Blancas proyectada a 25 años. ....	52
7.3.1. Chequeo de presiones. ....	52
7.3.2. Chequeo de velocidades.....	54
7.4. Análisis de conexión del acueducto Piedras Blancas con el acueducto de Mazo. ....	54
7.4.1. Interconexión Piedras Blancas – Mazo.....	55
7.4.2. Chequeo de presiones. ....	58
7.4.3. Chequeo de velocidades.....	59
7.5. Volumen de almacenamiento futuro. ....	60

7.5.1 Opción 1: Planta funcionando las 24 horas.....	60
7.5.2. Opción 2: Planta en pausa.....	61
7.5.3. Análisis opción 1 y opción 2.....	62
8. CONCLUSIONES .....	63
9. RECOMENDACIONES.....	66
10. REFERENCIAS.....	68
ANEXOS.....	70

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1: Histórico de usuarios del acueducto veredal Piedras Blancas. Elaboración propia.....	29
Tabla 2: Histórico de usuarios acueducto Mazo. Elaboración propia.....	31
Tabla 3: Población flotante hotelera en el sector de Piedras Blancas, piedra gorda, barro blanco y media luna. Elaboración propia.....	32
Tabla 4: Proyección de usuarios con población flotante del acueducto Piedras Blancas. Elaboración propia.....	34
Tabla 5: Población flotante en la vereda Mazo. Elaboración propia. ....	35
Tabla 6: Proyección de usuarios con población flotante del acueducto veredal Mazo. Elaboración propia.....	35
Tabla 7: Dotación neta máxima, usuarios acueducto Piedras Blancas. Elaboración propia. ....	36
Tabla 8: Demanda de suscriptores comerciales, oficial y especial. Elaboración propia.....	37
Tabla 9: Demanda de agua total acueducto veredal Mazo. Elaboración propia. ....	37
Tabla 10: Presiones observadas en campo y presiones simuladas por EPANET. Elaboración propia. ....	43
Tabla 11: Presiones máximas y mínimas de trabajo para hora valle y hora pico en los nodos NP667, NP273 y NP716. Elaboración propia. ....	47
Tabla 12: Velocidades máximas y mínimas para hora valle y hora pico en los nodos P396, TP667, TP608 y TP611. Elaboración propia.....	48
Tabla 13: Pérdidas monetarias debido al agua fugada. Elaboración propia.....	51

Tabla 14: Velocidades máximas y mínimas para hora valle y hora pico del acueducto Piedras Blancas proyectado a 25 años en las tuberías TP66, TP318, TP831 y TP832. Elaboración propia .....	54
Tabla 15: Presupuesto tentativo de la optimización de la red matriz de distribución del acueducto Piedras Blancas. Elaboración propia.....	57
Tabla 16: Presiones máximas y mínimas de trabajo para hora valle y hora pico de la red unificada de los acueductos de Piedras Blancas y Mazo en los nodos NP667, NP273 y NP716. Elaboración propia.....	59
Tabla 17: Velocidades máximas y mínimas para hora valle y hora pico de los acueductos Piedras Blancas y Mazo proyectado a 25 años en las tuberías P517, TP152 y P582. Elaboración propia.	60
Tabla 18: Capacidad de regulación y capacidad de almacenamiento de los tanques. Elaboración propia.....	60
Tabla 19: Volumen final de los tanques de almacenamiento. Elaboración propia. ....	61
Tabla 20: Análisis de almacenamiento en los tanques con planta en pausa. Elaboración propia. .	61

## **LISTA DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1: Tanques de quietamiento.....	21
Ilustración 2: Sistema de filtración en múltiples etapas.....	22
Ilustración 3: Tanques de almacenamiento. ....	22
Ilustración 4: Quebrada San Roque y bocatoma. ....	23
Ilustración 5: Cámara de quietamiento.....	24
Ilustración 6: Filtros lentos acueducto Mazo. ....	25
Ilustración 7: Tanque de almacenamiento acueducto Mazo. ....	26
Ilustración 8: Tanques intermedios del acueducto Mazo.....	26
Ilustración 9: Metodología. Elaboración propia.....	27
Ilustración 10: Puntos de medición de presiones. Tomado de Gaia GPS. ....	41
Ilustración 11: Toma de presiones. ....	42
Ilustración 12: Mapas de contorno de presión para la hora de menor consumo (3 a.m.) y mayor consumo (10 a.m.) respectivamente. Tomado de EPANET. ....	46



Ilustración 13:Velocidades de la red e identificación de puntos muertos. Tomado de EPANET..	49
Ilustración 14: Zona de presiones muy altas en el sector Piedras Blancas. Tomado de EPANET. .....	49
Ilustración 15: Implementación de válvula reguladora de presión en la red actual. Tomado de EPANET.....	50
Ilustración 16: Mapas de contorno de presión de la red a 25 años para la hora de menor consumo (3 a.m.) y mayor consumo (10 a.m.) respectivamente. Tomado de EPANET.....	53
Ilustración 17: Mapa redes de distribución del acueducto veredal Mazo. Elaboración propia en ArcGIS .....	54
Ilustración 18: Mapa punto de interconexión de las redes de los acueductos Piedras Blancas y Mazo. Elaboración propia en ArcGIS .....	55
Ilustración 19: Mapas de contorno de la interconexión de los acueductos Piedras Blancas y Mazo en la hora de mayor consumo en el año actual (mapa izquierdo) y la proyección a 25 años (mapa derecho). Tomado de EPANET. ....	56
Ilustración 20: Optimización de las redes del acueducto Piedras Blancas. Elaboración propia en ArcGIS .....	56
Ilustración 21:Mapas de contorno de presión de las redes de Piedras Blancas y Mazo a 25 años para la hora de menor consumo (3 a.m.) y mayor consumo (10 a.m.) respectivamente. Tomado de EPANET.....	58

## **LISTA DE GRÁFICAS**

Gráfica 1: Análisis de proyección de usuarios del acueducto Piedras Blancas. Elaboración propia. .....	30
Gráfica 2:Análisis de proyección de usuarios acueducto veredal Mazo. Elaboración propia. ....	31
Gráfica 3: Curva de demanda acueducto veredal Piedras Blancas. Elaboración propia. ....	38
Gráfica 4: Patrón de consumo. Elaboración propia.....	39
Gráfica 5 :Cambio en el volumen de los tanques de almacenamiento. Elaboración propia .....	40
Gráfica 6: Correlación de las presiones. Tomado de EPANET. ....	44
Gráfica 7: Promedio de porcentaje de pérdidas anuales. Elaboración propia.....	51

---

## RESUMEN

Este informe presenta un diagnóstico de la red de distribución del acueducto Piedras Blancas en el corregimiento de Santa Elena y la evaluación de una interconexión con el acueducto Mazo, ante el aumento de la demanda de agua en el corregimiento de Santa Elena por crecimiento poblacional y turismo. La metodología incluyó recolección de datos, inspección en campo, proyección de demanda, modelación hidráulica en EPANET y calibración de presiones, permitiendo identificar problemas de presión y velocidad en el sistema actual, así como puntos críticos de pérdida de agua. Los resultados sugieren que la red de distribución del acueducto Piedras Blancas, en su estado actual, presenta dificultades para cubrir las demandas futuras, especialmente en las zonas altas. Para viabilizar la interconexión con el acueducto Mazo sin comprometer la calidad del servicio, se recomienda optimizar la infraestructura, aumentando diámetros de tuberías y regulando presiones mediante válvulas, además de implementar sensores para detectar fugas. Estas intervenciones mejorarían la estabilidad de ambos acueductos, permitiendo una cobertura ampliada y un servicio continuo de agua en el corregimiento.

***Palabras clave:* Diagnóstico, modelación hidráulica, acueducto Piedras Blancas, acueducto Mazo, EPANET, interconexión, demanda de agua.**

## ABSTRACT

This report presents a diagnosis of the Piedras Blancas aqueduct distribution network in the Santa Elena district and an evaluation of an interconnection with the Mazo aqueduct, in response to the increased water demand in the region due to population growth and tourism. The methodology included data collection, field inspection, demand projection, hydraulic modeling in EPANET, and pressure calibration, allowing for the identification of pressure and velocity issues in the current system as well as critical points of water loss. The results suggest that the Piedras Blancas network, in its current state, faces challenges in meeting future demands, especially in higher-altitude areas. To enable the interconnection with the Mazo aqueduct without compromising service quality, it is recommended to optimize the infrastructure by increasing pipe diameters, regulating pressures with valves, and implementing sensors to detect leaks. These interventions would improve the stability of both aqueducts, allowing for expanded coverage and continuous water service in the district.

***Keywords* — Diagnosis, hydraulic modeling, Piedras Blancas aqueduct, Mazo aqueduct, EPANET, interconnection, water demand.**

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El Corregimiento de Santa Elena, ubicado al oriente de la ciudad, es uno de los cinco corregimientos que conforman el área rural del municipio de Medellín. Su cabecera se sitúa a 17 kilómetros de distancia del centro de la ciudad. El corregimiento limita al norte con los municipios de Copacabana y Guarne, por el oriente con los municipios de Rionegro y El Retiro, por el occidente con el perímetro urbano de Medellín con las zonas nororiental, centro-oriental y suroriental y por el sur con el Municipio de Envigado. Tiene una extensión de 7.412,83 hectáreas. Y está compuesto por 11 veredas: Piedras Blancas Matasano, Mazo, Barro Blanco, Piedra Gorda, Media Luna, El Placer, Santa Elena Central, El Cerro, El Llano, El Plan y Las Palmas. La vereda con mayor extensión es Piedras Blancas – Matasano que cuenta con una extensión de 2.223,67 Ha, equivalentes al 30% del área total del corregimiento. («Plan de Desarrollo Local Corregimiento de Santa Elena», 2015)

Reconocida por su abundante riqueza natural, Santa Elena ha experimentado un crecimiento poblacional que ha incrementado la demanda de servicios básicos, particularmente de agua potable. Actualmente cuenta con 6 pequeños prestadores que abastecen sus distintas veredas: Corporación de Acueducto Piedras Blancas, Corporación de Acueducto Multiveredal Santa Elena, Corporación de Acueducto San Pedro, Corporación de Acueducto Media Luna, Corporación de Acueducto Mazo y Corporación de Acueducto Las Flores. Sin embargo, algunos de estos sistemas presentan inconvenientes, como el acueducto veredal Mazo, cuya red de distribución abastece a una parte de la población, pero ha mostrado limitaciones de capacidad. En este momento, la planta opera al máximo de su capacidad de diseño hidráulico, lo que impide la conexión de nuevas viviendas sin comprometer la continuidad del servicio y limitar la cobertura. Ante esta situación, surge la necesidad de evaluar una solución que garantice un suministro de agua más eficiente. Por lo cual, se plantea un diagnóstico de la red de distribución del acueducto Piedras Blancas para que administre el suministro de agua a los suscriptores del acueducto veredal Mazo sin comprometer su operabilidad.

---

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

Realizar un diagnóstico de la red de distribución del acueducto Piedras Blancas en el corregimiento de Santa Elena por medio de una modelación hidráulica y datos recolectados en campo para evaluar el impacto al abastecer a todos los suscriptores de la Corporación de acueducto Mazo.

### 2.2. Objetivos específicos

- Llevar a cabo un diagnóstico de la red de distribución del acueducto Piedras Blancas mediante la identificación del estado actual usando bases de datos del sistema y la actualización de este con salidas de campo.
- Modelar las redes de distribución de agua del acueducto Piedras Blancas y Mazo para identificar las presiones y velocidades de trabajo por medio del programa EPANET.
- Establecer recomendaciones hidráulicas que permitan realizar la interconexión de la totalidad de la vereda Mazo al sistema del acueducto Piedras Blancas sin afectar la integralidad de este y cumpliendo con la normativa vigente.

### 3. MARCO TEÓRICO

El estudio hidráulico del flujo a través de las tuberías se realiza para determinar las características hidráulicas y las físicas dentro de las redes, dependen de la topografía de la zona, el diámetro del conducto y sus accesorios. (SHAUM et al., 2005).

Para el cálculo de las condiciones hidráulicas del flujo de las tuberías a presión se emplea la ecuación de Darcy-Weisbach la cual permite la determinación de la pérdida de carga debida a la fricción dentro de la tubería.

$$h_f: \phi \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

Donde  $h_f$  es la pérdida de carga debida a la fricción, calculada a partir de la fricción  $\Phi$  (término este conocido como factor de fricción de Darcy o coeficiente de rozamiento), la relación entre la longitud y el diámetro de la tubería  $L/D$ , la velocidad del flujo  $v$  y la aceleración debida a la gravedad  $g$  que es constante. El factor de fricción  $\Phi$  varía de acuerdo con los parámetros de la tubería y a la velocidad del flujo y puede ser conocido con una gran exactitud dentro de ciertos regímenes de flujo (SHAUM et al., 2005).

Aunque todo el análisis de la red actual y el estudio de la propuesta se hace a través de un programa de modelaje hidráulico, en este caso EPANET, es pertinente presentar algunas ecuaciones que sustentan la hidráulica de conducciones a presión:

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2 \quad (2)$$

Donde  $A_1$  y  $A_2$  son áreas transversales,  $V_1$  y  $V_2$  velocidades del tubo de entrada y de salida.

$$H_1 = H_2 + \sum h_f + \sum h_L \quad (3)$$

$H$  representa la altura total de energía,  $h_f$  pérdida por fricción y pérdida localizada.

$$h_L = k_L * \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

$h_L$  es la pérdida localizada,  $k_L$  es el coeficiente empírico que considera la magnitud de pérdida y  $g$  representa la aceleración de la gravedad.

Además, para realizar un correcto desarrollo del diseño hidráulico, la guía técnica 003 del RAS-98, dice que, para diagnosticar y diseñar correctamente una red de distribución de agua, es esencial conocer el funcionamiento del sistema de acueducto y sus elementos clave. También es importante entender el sistema de tratamiento de agua, considerando el caudal y su variabilidad diaria, la calidad del agua, y la capacidad de almacenamiento, que debe ser adecuada para manejar la demanda de agua. La altura relativa de los tanques de almacenamiento respecto a la red proporciona la presión necesaria para el flujo de agua, afectando la calidad del servicio. En la mayoría de los estudios de redes de distribución, que suelen enfocarse en la optimización o ampliación de infraestructuras existentes, es vital conocer en detalle las características físicas y operativas actuales para hacer un diagnóstico preciso y planificar su integración en el nuevo proyecto.

Para un mayor entendimiento de este trabajo se citan varios enunciados tomados de la resolución 0330 /2017.

**Capacidad de almacenamiento.** Volumen de agua retenido en un tanque o embalse.

**Capacidad hidráulica.** Caudal que puede manejar un componente o una estructura hidráulica conservando sus condiciones normales de operación.

**Captación.** Conjunto de estructuras necesarias para tomar el agua de una fuente de abastecimiento.

**Caudal.** Cantidad de fluido que pasa por determinado elemento en la unidad de tiempo.

**Caudal de incendio.** Es el caudal de una red de distribución destinado a combatir las emergencias por causa de los incendios. No corresponde a un caudal adicional al Caudal Máximo Horario de diseño de la red, sin embargo, se debe asegurar durante todo el periodo de diseño de las redes de distribución.

**Caudal máximo diario (QMD).** Consumo máximo durante veinticuatro horas, observado en un período de un año, sin tener en cuenta las demandas contra incendio que se hayan presentado.

**Caudal máximo horario (QMH).** Consumo máximo durante una hora, observado en un período de un año, sin tener en cuenta las demandas contra incendio que se hayan presentado.

**Caudal medio diario (Qmd).** Consumo medio durante veinticuatro horas, obtenido como el promedio de los consumos diarios en un período de un año.

---

**Consumo.** cantidad de agua utilizada por un usuario en un período determinado.

**Dotación bruta.** Es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante considerando para su cálculo el porcentaje de pérdidas técnicas que ocurran en el sistema de acueducto.

**Dotación neta.** Es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante sin considerar las pérdidas técnicas que ocurran en el sistema de acueducto

**Golpe de ariete.** Fenómeno hidráulico de tipo dinámico oscilatorio, causado por la interrupción violenta del flujo en una tubería, bien sea por el cierre rápido de una válvula o por el apagado del sistema de bombeo, que da lugar a la transformación de la energía cinética en energía elástica, tanto en el flujo como en la tubería, produciendo sobre elevación de la presión, subpresiones y cambios en el sentido de la velocidad del flujo.

**Índice de agua no contabilizada.** Indicador porcentual que relaciona el volumen total de agua que se suministra a las redes con el volumen total de agua que se factura a los suscriptores de éstas, en un período determinado.

**Modelo hidráulico.** Formulación idealizada que representa la respuesta de un sistema hidráulico a estímulos externos.

**Patrón de consumo.** Conjunto de factores multiplicadores que representan la variación horaria de la demanda en una red de distribución. Tiene como característica que es unitaria, es decir, el promedio de los factores es igual a 1.

**Pérdidas.** Diferencia entre el volumen de agua que entra a un sistema de acueducto y aquel que sale o es facturado, dependiendo del sistema.

**Pérdidas menores.** Pérdida de energía causada por accesorios o válvulas en una conducción de agua.

**Pérdidas por fricción.** Pérdida de energía causada por los esfuerzos cortantes del flujo en las paredes de un conducto.

**Red de distribución.** Conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde el tanque de almacenamiento o planta de tratamiento hasta los puntos de consumo.

**Válvula.** Accesorio cuyo objetivo es regular y controlar el caudal y la presión de agua en una red de conducción y/o distribución de agua potable.



---

## 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Santa Elena cuenta en su gran mayoría con el servicio de agua potable, cubrimiento que se debe a la operación de varios acueductos veredales y multiveredales que se construyeron a finales de la década del 90, sin embargo, algunos de estos sistemas presentan inconvenientes, como el acueducto veredal Mazo, cuya red de distribución abastece a una parte de la población. En este momento, la planta opera al máximo de su capacidad de diseño hidráulico, lo que impide la conexión de nuevas viviendas sin comprometer la continuidad del servicio y limitar la cobertura. Ante esta situación, surge la necesidad de evaluar una solución que garantice un suministro de agua más eficiente. En este contexto, se evalúa la interconexión del acueducto Piedras Blancas con el de Mazo como una solución potencial para ampliar la cobertura. Sin embargo, esta interconexión requiere un análisis técnico detallado para asegurar que los parámetros hidráulicos y las condiciones de servicio no se vean afectados.

### 4.1. Antecedentes

El corregimiento de Santa Elena conocido como tierra de flores, se constituye de tal manera mediante el acuerdo 54 aprobado en el año 1987 por el Concejo de Medellín. Se sitúa a 17 kilómetros de distancia del centro de la ciudad, tiene una extensión de 7.412, 83 ha, cuenta con 11 veredas: Piedras Blancas Matasano, Mazo, Barro Blanco, Piedra Gorda, Media Luna, El Placer, Santa Elena Central, El Cerro, El Llano, El Plan y Las Palmas. Además, limita con los municipios de Guarne, Copacabana, Envigado, Rionegro y El retiro («Plan de Desarrollo Local Corregimiento de Santa Elena», 2015). Sin embargo, las veredas directamente relacionadas con este estudio son Piedras Blancas y Mazo, además, según la Distrito de Medellín, cuenta con una población de 21.828 habitantes.

El territorio de Santa Elena se caracteriza por un relieve variado, compuesto por pendientes pronunciadas, colinas suaves y pequeñas mesetas. Su topografía es quebrada, con altitudes que varían entre los 1850 y los 2700 metros sobre el nivel del mar.

Las temperaturas en la zona fluctúan entre los 12 y 17 grados centígrados, con un promedio de 14.5 °C. La precipitación anual alcanza los 3500 mm, y la humedad relativa es del 89%. Estas condiciones corresponden a un clima frío típico de un ambiente tropical húmedo con influencia de montaña.

---

Desde el punto de vista hidrológico, Santa Elena es una región divisoria de aguas entre el valle de Aburrá y el valle de Río Negro. Sus fuentes más importantes, la quebrada Santa Elena y la quebrada Piedras Blancas, han tenido gran importancia para el municipio de Medellín por su utilización en abastecimiento de agua y generación de energía eléctrica (Maria et al., 2002).

La actividad económica principal del corregimiento ha sido el cultivo y producción de moras, papas, fresas y ganadería. Así mismo, el cultivo de flores ha sido uno de los primordiales atractivos para el turismo, lo que ha hecho experimentar un constante crecimiento poblacional en esta localidad. (*Corregimiento Santa Elena de Medellín*, 2024).

Se presenta como una zona de características muy diversas y contradictorias. Cuenta con extensas zonas forestales, parcelas agrícolas de tipo minifundista, gran utilización de suelo en fincas de recreo y una amplia actividad en la extracción de tierra de capote. Cuenta con grandes áreas de reserva forestal como patrimonios ecológicos en la zona de Piedras Blancas, terrenos de uso turístico y bosques de gran extensión (Maria et al., 2002).

---

## 5. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ACUEDUCTO

Se presenta una descripción general de los sistemas de acueducto en estudio con el fin de proporcionar una visión global de su funcionamiento y condiciones actuales. Para esto fue necesario realizar varias salidas de campo, revisión de planos y recolección de información técnica relevante de los inventarios del Distrito de Medellín.

### 5.1. CORPORACIÓN DE ACUEDUCTO VEREDAL PIEDRAS BLANCAS

Este acueducto fue ejecutado por medio de Empresas Públicas de Medellín (EPM), mediante la figura de contratación social, con financiación 100% del Municipio de Medellín, para periodo de diseño de 25 años, el cual inicio servicio desde el año 2009. Este prestador abastece actualmente a las veredas de Piedras Blancas, Mazo, Piedra Gorda, Barro Blanco y Media Luna, con un total de 826 usuarios suscritos a la fecha (septiembre de 2024).

#### *5.1.1. Fuente*

El agua es captada en la quebrada matazanos mediante una bocatoma de tipo dique en concreto reforzado de 2,17 m de largo, por 1,60 m de profundidad y con un espesor de muro de 0,40 m; tiene instalada una rejilla de fondo dispuesta en el vertedero de captación con 0,30 m de largo por 0,55 m de ancho. Además, cuenta con 11 varillas de Ø 1/2" separadas cada 3 cm. Una vez es captada el agua a través de la rejilla pasa a la caja de derivación mediante una tubería en PVC-P de Ø 6" y esta se encuentra en la cota 2415 m.s.n.m.

#### *5.1.2. Aducción*

La tubería de aducción posee un diámetro en 8" en material PVC, con una longitud aproximada de 450 m y 18 m en hierro dúctil que transporta el agua cruda desde la cámara de derivación hasta el desarenador.

#### *5.1.3. Desarenador*

Se trata de una desarenador de concreto reforzado, ubicado a nivel del suelo, con unas dimensiones útiles de 3,74 metros de largo, 1,50 metros de ancho y 2,20 metros de profundidad. Posee una tubería de entrada en Ø8 pulgadas PVC-P, de salida en Ø8 pulgadas en hierro dúctil y una tubería de rebose de Ø6". El desarenador no posee bypass, pero en esta estructura conecta con un tanque de succión el cual permite un tiempo prudente en el que se pueda sacar de servicio el desarenador para su mantenimiento.

---

#### ***5.1.4. Estación de Bombeo***

El acueducto cuenta con dos bombas de 60 HP, con una capacidad para bombear 16,3 L/s. La caseta de bombeo incluye un transformador, equipo de bombeo, grupo generador de energía y fuerza motriz, tubería de succión e impulsión, válvulas de regulación y control, interruptores de nivel máximo y mínimo, y tableros de protección y control eléctrico. Además, el sistema cuenta con ventilación natural o asistida por equipos, un área destinada al personal de operación, macromedición, y un cerco de protección alrededor de la caseta. Para este sistema se han instalado dos antenas de 30 metros de altura cada una, con sus respectivos tensores en cables de Ø1/2". El sistema de telemetría está controlado por un software que enciende las bombas para impulsar el agua desde la captación hasta la planta. Estas bombas se apagan automáticamente cuando un sensor detecta que se ha alcanzado la presión requerida, lo que indica que los tanques de compensación están llenos, sin embargo, presenta una falla en el sistema de encendido automático, lo que impide activarlo desde la planta. Por esta razón, los operarios deben realizar el arranque de forma manual.

#### ***5.1.5. Conducción***

La conducción se lleva a cabo mediante una tubería de hierro dúctil de 8" con una longitud de 1.5 kilómetros y una tubería de PVC de 8" con una longitud de 1.5 kilómetros para un total de 3 kilómetros de longitud.

#### ***5.1.6. Planta de Tratamiento***

La planta se encuentra a una altura de 2571,29 m.s.n.m y tiene la capacidad de tratar un caudal de 12 L/s.

Está compuesta por dos tanques de compensación fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio, con un diámetro de 5,5 metros y una altura de 3,3 metros, lo que proporciona un volumen de almacenamiento de 69 metros cúbicos cada uno. La tubería de entrada es de PVC-P con un diámetro de 8 pulgadas, mientras que a la salida de los tanques se encuentra una válvula solenoide de 4 pulgadas.



Ilustración 1: Tanques de aquietamiento.

El sistema de filtración en múltiples etapas incluye los siguientes elementos: dos filtros gruesos descendentes fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio, con un diámetro de 3,2 metros y una altura de 1,35 metros, lo que les otorga un volumen de 11 m<sup>3</sup> cada uno. El lecho filtrante tiene una altura de 0,90 metros. Las tuberías de entrada, salida y rebose son de 4 pulgadas de diámetro en PVC-P. Adicionalmente, el sistema incluye dos filtros gruesos ascendentes, también fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio, con un diámetro de 3,0 metros y una altura de 1,80 metros, para un volumen de 13 m<sup>3</sup> cada uno. El lecho filtrante tiene una altura de 1,10 metros y, al igual que en los filtros descendentes, las tuberías de entrada, salida y rebose son de 4 pulgadas en PVC-P. Por último, el acueducto está equipado con dos filtros lentos de arena, fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio, con un diámetro de 6,6 metros y una altura de 2,85 metros, para un volumen total de 193 m<sup>3</sup>. El lecho filtrante de estos filtros tiene una altura de 1,30 metros, y las tuberías de entrada, salida y rebose son de 8 pulgadas de diámetro, también en PVC-P.





Ilustración 2: Sistema de filtración en múltiples etapas.

La planta cuenta con dos tanques de almacenamiento fabricados en PRFV de 6,0m de diámetro y 4,0m de altura para un volumen de 110 m<sup>3</sup> cada uno. Tanto la tubería de entrada, salida y rebose son de Ø8" en PVC-P.



Ilustración 3: Tanques de almacenamiento.

## 5.2. CORPORACIÓN DE ACUEDUCTO MAZO

El acueducto de Mazo, fue ejecutado por medio de Empresas Públicas de Medellín (EPM), y su financiación fue de la siguiente manera: el 50% el Municipio de Medellín y el 50% EPM, bajo el marco de Acuerdo No.50 de 1990. Presta servicio desde el año 1994, suministra agua potable a 265 usuarios y abastece a la población de la vereda de Mazo.

### 5.2.1. Fuente

El agua es captada inicialmente de la quebrada San Roque, donde se dispone de dos bocatomas con aletas en V de 3 metros cada una, ubicadas en ambos costados, construidas en bloque revocado y equipadas con rejillas de fondo de 45 cm x 30 cm, compuestas por 16 varillas de 1/2" cada una. Desde esta primera captación, el agua es conducida hacia una segunda bocatoma situada a 30 metros de la primera. Esta segunda bocatoma capta agua de una quebrada conocida en la región como La del Medio, que técnicamente se identifica como el afluente derecho, mientras que la quebrada San Roque se conoce como el afluente izquierdo.



Ilustración 4: Quebrada San Roque y bocatoma.



### **5.2.2. Aducción**

La tubería de aducción posee un diámetro de 4" en materia HD de con una longitud de 90,73 m aproximadamente, entre las dos bocatomas y el prefiltro.

### **5.2.3. Cámara de quietamiento**

Está compuesta por una cámara de quietamiento o aforo con vertedero en concreto reforzado con dos compartimientos, de dimensiones: largo de 90 cm, ancho útil de 56 cm; largo de 46 cm y ancho útil de 56 cm, respectivamente, ambos con una profundidad de 131 cm, con tubería de entrada en Ø4" en acero al carbón y una válvula de desagüe de Ø2" en la entrada y la salida, además, de un rebose en Ø3" HD.



Ilustración 5: Cámara de quietamiento.

### **5.2.4. Prefiltro**

El sistema incluye un prefiltro de concreto con dimensiones útiles de 74 cm de largo, 55 cm de ancho y 93,5 cm de profundidad. Cuenta con una tubería de entrada de Ø4" en HD, dos válvulas de Ø4" ubicadas en la entrada y la salida, y un rebose con tubería de Ø3" en HD.



### 5.2.5. Conducción

La conducción se lleva a cabo mediante una tubería de material de acero al carbón de Ø4", con 43,2 m de longitud aproximadamente.

### 5.2.6. Planta de tratamiento

La planta de tratamiento del acueducto Mazo se encuentra a 2484,68 m.s.n.m. y tiene una capacidad para tratar un caudal máximo de 1,2 L/s. La PTAP cuenta dos filtros lentos, de dimensiones: largo 4,00 m, un ancho de 2,50 m y 2,00 m de altura, en un área de 20 m<sup>2</sup>, techo con cubierta en Eternit y cerchas metálicas. La altura filtrante es de 1 m y posee 6 válvulas de entradas y salidas en Ø4" y lavados en Ø2".



Ilustración 6: Filtros lentos acueducto Mazo.

Posee un tanque de almacenamiento en concreto reforzado de 5 m x 4,5 m de ancho y 2,5 m de altura, para un total de 56 m<sup>3</sup>, con dos tapas metálicas de 70 cm x 70 cm, tubería de entrada en Ø4" en PVC y válvula de entrada y salida de 4", con rebose y dos respiraderos en Ø3" en PVC, sobre este se encuentra una caseta de cloración de 3,15 x 2,70 m con altura de 2 m y losa, además posee reja a la entrada de 1,30 m x 2,00 m en varilla cuadrada de 1/2" para el acceso, a los lados hay pasamanos perimetral en tubería metálica de Ø3".



Ilustración 7: Tanque de almacenamiento acueducto Mazo.

Además, el sistema cuenta con dos tanques de almacenamiento, ubicados en la red de distribución, en concreto reforzado de 8m x 3,5m de ancho y 2,00m de altura, semienterrados para un total de 56 m<sup>3</sup>, con cuatro tapas metálicas de 70 cm x 70 cm, tubería de entrada en Ø4" en PVC y válvula de entrada y salida de Ø4".



Ilustración 8: Tanques intermedios del acueducto Mazo.

## 6. METODOLOGÍA

La metodología que se empleó se presenta de manera resumida en el siguiente diagrama.

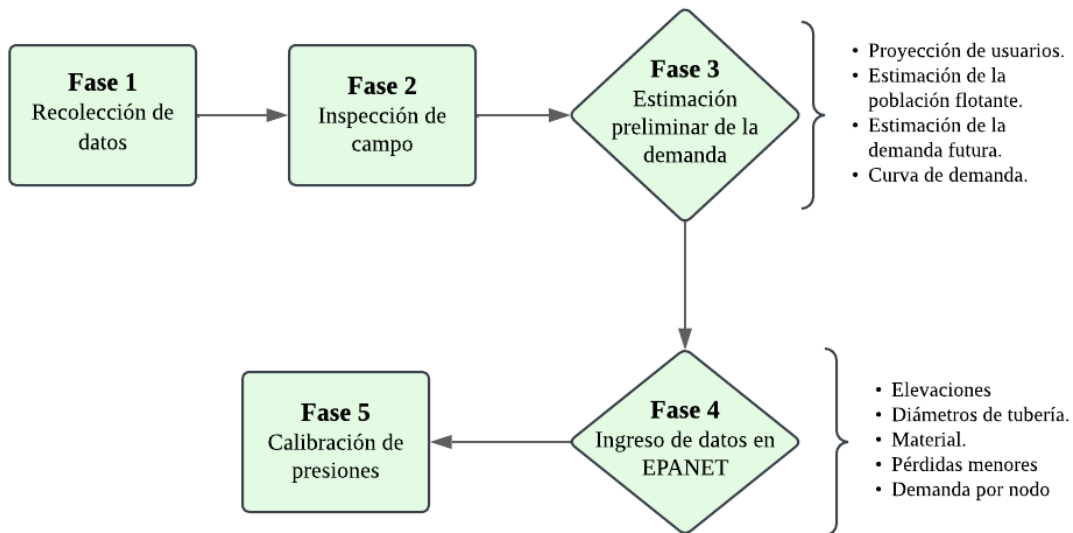


Ilustración 9: Metodología. Elaboración propia.

### 6.1. Fase1: Recolección de datos

Con el objetivo de realizar un modelado de la red de distribución de agua de los acueductos veredales de Piedras Blancas y Mazo, se llevó a cabo una recolección de datos a través de los portales institucionales del Distrito de Medellín y la base de datos NAS que significa Network Attached Store, por sus sigla en inglés y consiste en un almacenamiento conectado a la red del Distrito donde se encuentra toda la información.

Esta investigación se enfocó principalmente en obtener información detallada sobre los planos de los sistemas de acueducto, inventarios de infraestructura, y otros datos técnicos relevantes que pudieran apoyar el trazado de la red.

Además, el acceso a los planos georreferenciados entregados por EPM en 2010 del acueducto veredal Piedras Blancas permitió identificar las rutas existentes de las tuberías, la ubicación de válvulas, los puntos de captación y los sectores clave de distribución. Sin embargo, para obtener una mayor precisión en la ubicación de estos elementos, se realizó una actualización de los sectores de la red, que incluyó información sobre diámetros, ubicación de válvulas y ampliaciones de la red, en colaboración con el señor Jesus Farley Molina, el fontanero del

acueducto desde su fundación. Este proceso se llevó a cabo utilizando el software Google Earth, que contiene la información más reciente de cada elemento incorporado en la red de Piedras Blancas, lo que permitió perfeccionar aún más el trazo del modelo.

## 6.2. Fase 2: Inspección de campo

Por medio de diferentes salidas de campo, se realizaron recorridos a la red de distribución para verificar las áreas de cobertura y principal ubicación de las válvulas reguladoras de presión.

## 6.3. Fase 3: Estimación preliminar de la demanda

### 6.3.1. Proyección de usuarios

La proyección de usuarios es la estimación de acometidas o viviendas que serán atendidas por el acueducto a lo largo de su vida útil. Tanto el número de usuarios proyectados como el consumo esperado de agua potable son factores clave para definir la demanda del proyecto. Para estimar la población de las veredas Piedras Blancas y Mazo, se aplicaron los métodos de proyección establecidos por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). Las proyecciones se realizaron utilizando los métodos aritmético, geométrico y exponencial, ajustándose al periodo de diseño definido por el RAS. Estas proyecciones se pueden ver en el ANEXO 1 y ANEXO 2.

Los acueductos en estudio cuentan con datos históricos de usuarios desde 2017, los cuales fueron verificados con la información proporcionado por el Distrito de Medellín. Esto permite ajustar la curva de proyección de usuarios a lo largo del tiempo para lograr la mayor correlación posible. En este análisis, se generaron distintas curvas de tendencia hasta identificar la que mejor cumpliera con los criterios establecidos

El método que mejor se correlacionó con los datos suministrados por el acueducto Piedras Blancas fue el geométrico, a continuación, se presenta la ecuación correspondiente, tomada del RAS 2000:

$$P_f = P_{uc}(1 + r)^{T_f - T_{uc}} \quad (5)$$

donde:

r= Tasa de crecimiento anual en forma decimal.

Pf = Población correspondiente al año para el que se quiere realizar la proyección (habitantes).

Puc= Población correspondiente a la proyección del DANE (habitantes).

Pci= Población correspondiente al censo inicial con información (habitantes).

Tuc= Año correspondiente al último año proyectado por el DANE.

Tf = Año al cual se quiere proyectar la información.

La tasa de crecimiento anual se calcula de la siguiente manera:

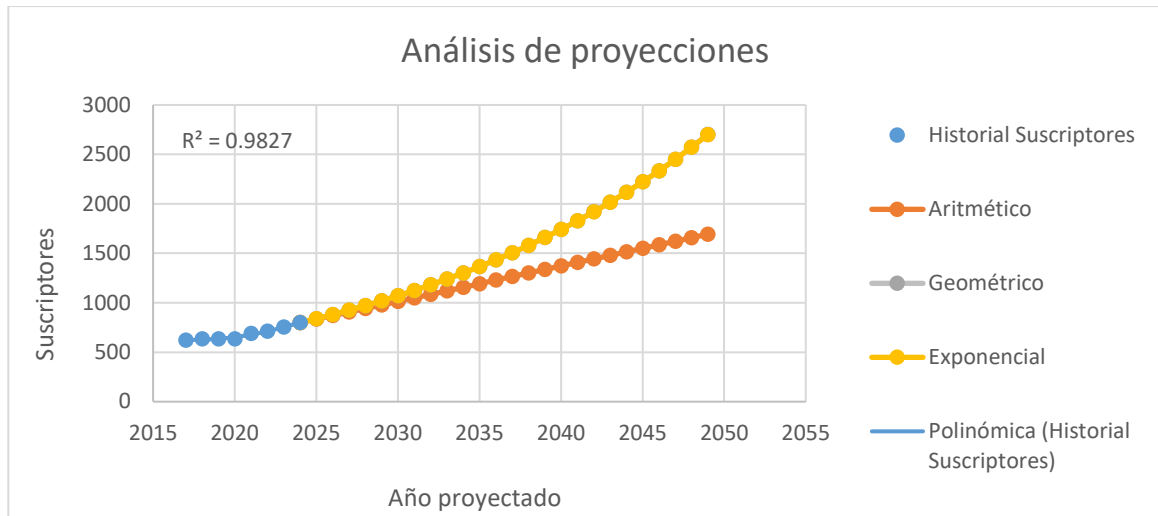
$$r = \left( \frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{\frac{1}{(T_{uc}-T_{ci})}} - 1 \quad (6)$$

En la Tabla 1, se muestra el resumen de los usuarios por cada año.

Tabla 1: Histórico de usuarios del acueducto veredal Piedras Blancas. Elaboración propia.

<b>Año</b>	<b>Total usuarios</b>
<b>2017</b>	621
<b>2018</b>	633
<b>2019</b>	636
<b>2020</b>	636
<b>2021</b>	691
<b>2022</b>	711
<b>2023</b>	755
<b>2024</b>	799

Tras realizar las diferentes proyecciones, se trazaron diferentes líneas de tendencia: lineal, logarítmica y polinómica, que ayudaron a escoger el método mencionado.



Gráfica 1: Análisis de proyección de usuarios del acueducto Piedras Blancas. Elaboración propia.

Como se observa en la gráfica 1, donde los puntos azules representan el historial de suscriptores, los métodos aritmético y geométrico muestran la mayor cercanía a la tendencia proyectada. Sin embargo, el método aritmético fue descartado debido a que, dado el comportamiento poblacional reciente de la vereda Piedras Blancas, este método proyecta una tasa de crecimiento muy baja que no se ajusta a la dinámica actual. Aunque el crecimiento de los usuarios en Piedras Blancas ha sido significativo en los últimos años, no ha alcanzado un nivel que justifique la aplicación del método exponencial, el cual sería más apropiado para escenarios de expansión acelerada. Finalmente, se seleccionó el método geométrico, ya que ofrece un mejor ajuste a los datos históricos de usuarios y refleja de manera más precisa la tendencia de crecimiento poblacional observada. Este método equilibra una proyección realista sin sobreestimar el crecimiento, lo cual es clave para asegurar la precisión en las proyecciones de demanda futura.

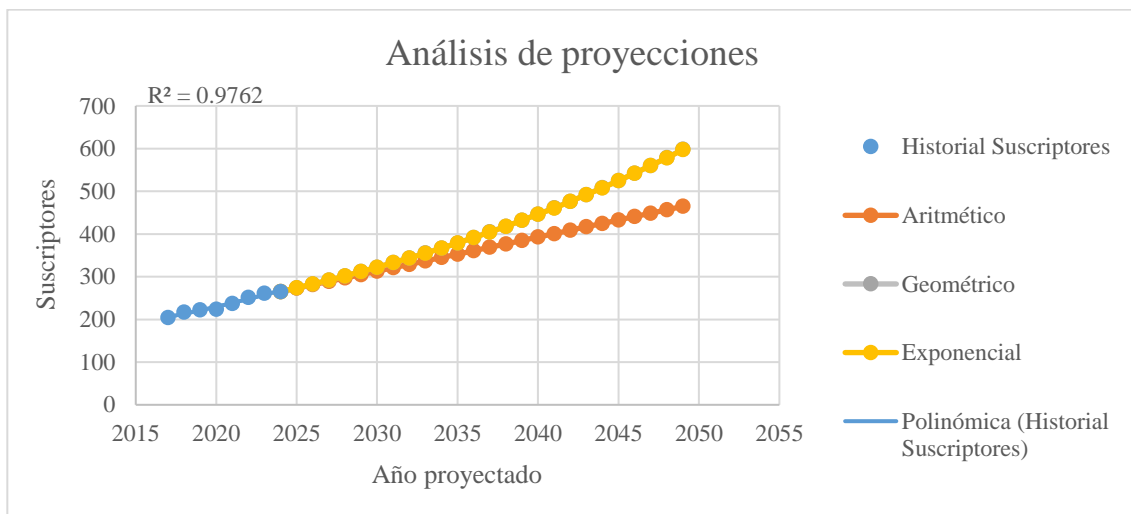
Al igual que el acueducto veredal Piedras Blancas, el método que mejor se ajustó a los datos proporcionados por el acueducto Mazo que se pueden ver en la tabla 2, fue el geométrico.



Tabla 2: Histórico de usuarios acueducto Mazo. Elaboración propia.

Año	Total Usuarios
2017	204
2018	217
2019	222
2020	224
2021	237
2022	251
2023	261
2024	265

Tras realizar las diferentes proyecciones, se trazaron diferentes líneas de tendencia: lineal, logarítmica y polinómica, que ayudaron a escoger el método mencionado.



Gráfica 2: Análisis de proyección de usuarios acueducto veredal Mazo. Elaboración propia.

Al analizar gráfica 2, se observa que el método aritmético se ajusta bien a los datos iniciales, pero no refleja adecuadamente la tendencia de crecimiento más reciente. El método exponencial, aunque refleja un crecimiento más acelerado, podría sobrestimar la proyección futura si el crecimiento poblacional no sigue un patrón tan rápido. Por lo tanto, el método geométrico podría ser el más apropiado en este caso, ya que representa un balance entre el crecimiento moderado y el ajuste adecuado a los datos históricos, sin caer en sobrestimaciones. Además, debido a la cercanía con la vereda Piedras Blancas, las dinámicas poblacionales tienden a ser semejantes, lo que fortalece la elección del método.

### 6.3.2. Estimación de la población flotante y/o migratoria

La población flotante se refiere a los habitantes no permanentes de la vereda, como los residentes originarios que viven en otros lugares, pero regresan durante las vacaciones o en eventos importantes como la Feria de las Flores, así como los turistas que visitan el corregimiento. Este grupo será clave para la estimación de la demanda de agua en el futuro, especialmente con el crecimiento del turismo.

Es necesario calcular la población flotante actual y proyectarla al horizonte de diseño, ya que, si no se tiene en cuenta, puede generar desabastecimiento de agua o estrés hídrico en las redes del acueducto, sobre todo en periodos de alta afluencia.

En este trabajo se llevó a cabo una investigación de los hoteles, cabañas, fincas de recreo y otros establecimientos que puedan generar una carga adicional en el sistema de abastecimiento. A través de plataformas como Airbnb, Booking y Google Maps, se identificaron aproximadamente 66 establecimientos ubicados en el área de influencia del acueducto Piedras Blancas, tal como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3: Población flotante hotelera en el sector de Piedras Blancas, piedra gorda, barro blanco y media luna.  
Elaboración propia

<b>Población flotante hotelera</b>				
<b>Hotel /Cabaña/ Finca</b>	<b>Nº</b>	<b>Habitaciones</b>	<b>Camas</b>	
La morada	1	1	1	
Nigüito hotel	2	5	9	
Cabaña la odisea	3	1	1	
Susurro del bosque	4	1	3	
Casa Duende hermosa	5	1	1	
Ecoverso Cabañas del bosque	6	2	2	
Chalet Celestial	7	1	1	
Skyline Ecoliving	8	6	10	
Casa Rustica	9	1	6	
Cabaña Casa de Campo	10	5	8	
Refugio de Luz	11	3	5	
Glamping SABIA	12	1	1	
Cabaña Del Mirador	13	2	2	
Villa Celina: La cabañita de Guadua	14	2	4	
Casa verde	15	4	7	
Mirador Pachama	16	2	3	
Santa Ana	17	4	10	



<b>Población flotante hotelera</b>			
<b>Hotel /Cabaña/ Finca</b>	<b>Nº</b>	<b>Habitaciones</b>	<b>Camas</b>
Casa del Bosque	18	4	5
Cielito Verde Glamping	19	2	2
Cabaña en las montañas	20	2	3
Finca Familiar	21	3	5
Casa del Campo - Laura del sol	22	1	3
Cabaña - Jey	23	1	1
Alojamiento - Fernanda	24	2	3
Cabañas volver a la tierra	25	4	4
Cielo ABBA	26	1	2
AGAPE	27	1	2
Casa en Madera	28	2	3
NIDO DEL CIELO Cabaña en el aire	29	1	1
Refugio de montaña	30	2	4
Minicasa -Ruth	31	1	1
Rincón del cielo AVINU	32	2	2
Minicasa - Estefania	33	1	2
Ecosueños	34	3	5
Chalet - Catalina	35	3	4
El refugio	36	2	4
La Cabaña de Itaca	37	1	2
Chalet de Itaca	38	1	1
Cabaña - Adolfo	39	1	1
Entre Yarumos	40	1	1
Akasha house	41	1	1
Casa de campo- Danier Fernando	42	4	5
cabaña paradisíaca	43	1	1
Cabaña -cristian	44	2	2
Susurro del bosque-zafiro	45	1	1
Yarumo	46	1	1
Canela Cabaña Santa Elena	47	2	3
La cabañita de Guadua	48	2	4
San Alejo´s House	49	2	3
Cabaña Nepal	50	1	2
El susurro del bosqueTurqueza	51	1	1
Cabaña en el bosque- Arví	52	1	1
Casa Berlín	53	4	4
Helecho	54	1	1
Villa Katy	55	2	5
Cabaña La Gloria	56	3	3
Celestial	57	1	1
Bromelia	58	1	1

<b>Población flotante hotelera</b>			
<b>Hotel /Cabaña/ Finca</b>	<b>N°</b>	<b>Habitaciones</b>	<b>Camas</b>
Cabaña - jhonatan	59	1	1
Hortensia	60	1	1
Heliconia	61	1	1
Cabaña- vanesa	62	3	3
Casa - Yuly	63	1	2
La Odisea	64	1	1
El bosque de julia	65	2	2
Villa Celina: La cabañita de Guadua	66	2	2

De esta manera se calculó la proyección de usuarios de la población flotante al horizonte de diseño mencionado para el acueducto Piedras Blancas que se puede ver en detalle en el ANEXO 1.

Tabla 4: Proyección de usuarios con población flotante del acueducto Piedras Blancas. Elaboración propia.

<b>Proyección con población flotante</b>				
<b>Año</b>	<b>Horizonte</b>	<b>Usuarios</b>	<b>Flotante</b>	<b>Total</b>
2024	0	799	66	865
2025	1	839	69	908
2026	2	881	105	985
2027	3	925	111	1036
2028	4	971	117	1088
2029	5	1019	124	1144
2030	6	1070	132	1202
..	..	..	..	..
..	..	..	..	..
2045	21	2223	312	2535
2046	22	2334	330	2664
2047	23	2451	350	2801
2048	24	2573	370	2944
2049	25	2702	392	3094

De la misma manera se identificó la población flotante de la vereda Mazo y se calculó la proyección de usuarios (ver ANEXO 2), como se presenta en la tabla 5 y 6.

Tabla 5: Población flotante en la vereda Mazo. Elaboración propia.

<b>Hotel/ Cabaña/ Finca</b>	<b>N°</b>	<b>Habitaciones</b>	<b>Camas</b>
Cabañas La Orquídea (Lirios)	1	1	1
Cabañas La Orquídea (Gardenia)	2	1	1
Cabaña Casa de Campo Santa Elena	3	5	9
Cabaña - carolina	4	1	1
Cabaña de bosque	5	1	3
Refugio de luz	6	3	7
Cabaña buda	7	1	1

Tabla 6: Proyección de usuarios con población flotante del acueducto veredal Mazo. Elaboración propia.

<b>Proyección con población flotante</b>				
<b>Año</b>	<b>Horizonte</b>	<b>Usuarios</b>	<b>Flotante</b>	<b>Total</b>
2024	0	265	7	272
2025	1	274	7	281
2026	2	283	7	290
2027	3	292	8	300
2028	4	302	8	310
2029	5	312	8	320
2030	6	322	9	331
..	..	..	..	..
..	..	..	..	..
2047	23	560	15	575
2048	24	579	15	594
2049	25	598	16	614

### **6.3.3. Estimación de la demanda futura**

A lo largo de este trabajo se ha destacado la importancia de estimar adecuadamente la demanda. Por esta razón, se realizó una proyección de la demanda futura, siguiendo las directrices establecidas en el RAS 2017/0330. Para ello, se calculó la dotación neta máxima utilizando datos históricos de consumo de los usuarios, proporcionados por el acueducto Piedras Blancas (ver ANEXO 1/ Historial de consumos y suscriptores).

Tabla 7: Dotación neta máxima, usuarios acueducto Piedras Blancas. Elaboración propia.

Tipo de usuario	m <sup>3</sup> /usuario *mes	L/usuario*día
Residencial	8.10	270.00
Comercial	63.20	2106.66
Oficial	16.45	548.23
Especial	1.53	50.87
Industrial	0.00	0.00

Ahora, el art 44 del RAS 0330, define la dotación bruta de la siguiente manera con pérdidas máximas del 25% :

$$d_{bruta} = \frac{d_{neta}}{(1 - \%p)} \quad (7)$$

$$d_{bruta} = \frac{d_{neta}}{(1 - \%p)} = \frac{8.10 \frac{m^3}{usuario * mes}}{(1 - 25\%)} = 10.75 \frac{m^3}{usuario * mes}$$

De esta manera se cuenta con los datos necesarios para el cálculo del caudal medio diario para el acueducto Piedras Blancas, que se calculó con la siguiente ecuación tomada del RAS 2000, título B:

$$Q_{md} = \frac{No. suscriptores \times d_{bruta}}{30} \quad (8)$$

$$Q_{md} = \frac{3094 usuarios \times 8.01 \frac{m^3}{usuario * mes}}{30 días} \times \frac{1000 L}{1 m^3} \times \frac{1 día}{86400 s} = 12.83 \frac{L}{s}$$

Considerando el caudal demandado por los suscriptores comerciales, oficiales y especiales, mostrado en la Tabla 8, se realizó el cálculo utilizando la misma ecuación mencionada anteriormente (ver ANEXO 1/ Demanda proyectada). Sumado con el caudal de los suscriptores comerciales se tiene un caudal tota de Qmd= 13.75 L/s .

Tabla 8: Demanda de suscriptores comerciales, oficial y especial. Elaboración propia.

Suscriptores	Q (m <sup>3</sup> /mes)	Q (L/s)
Comercial	69.90	0.81
Oficial	9.46	0.11
Especial	0.07	0.00
<b>Total</b>		0.92

Para calcular el caudal máximo diario se utilizó la siguiente ecuación, donde  $k_1$  corresponde al coeficiente consumo máximo diario, que en este caso como es una población menor a 12000 habitantes, tiene un valor de 1.3.

$$Q_{MD} = Q_{md} \times k_1 \quad (9)$$

$$Q_{MD} = 13.75 \frac{L}{s} \times 1.3 = 17.88 \frac{L}{s}$$

Así mismo, se calcula el caudal máximo horario, con un factor de  $k_2$  de 1.6:

$$Q_{MH} = Q_{MD} \times k_2 \quad (10)$$

$$Q_{MH} = 17.88 \frac{L}{s} \times 1.6 = 28.60 \frac{L}{s}$$

Siguiendo el mismo procedimiento se calculan los caudales para el acueducto veredal Mazo (ver ANEXO 2: Demanda proyectada):

Tabla 9: Demanda de agua total acueducto veredal Mazo. Elaboración propia.

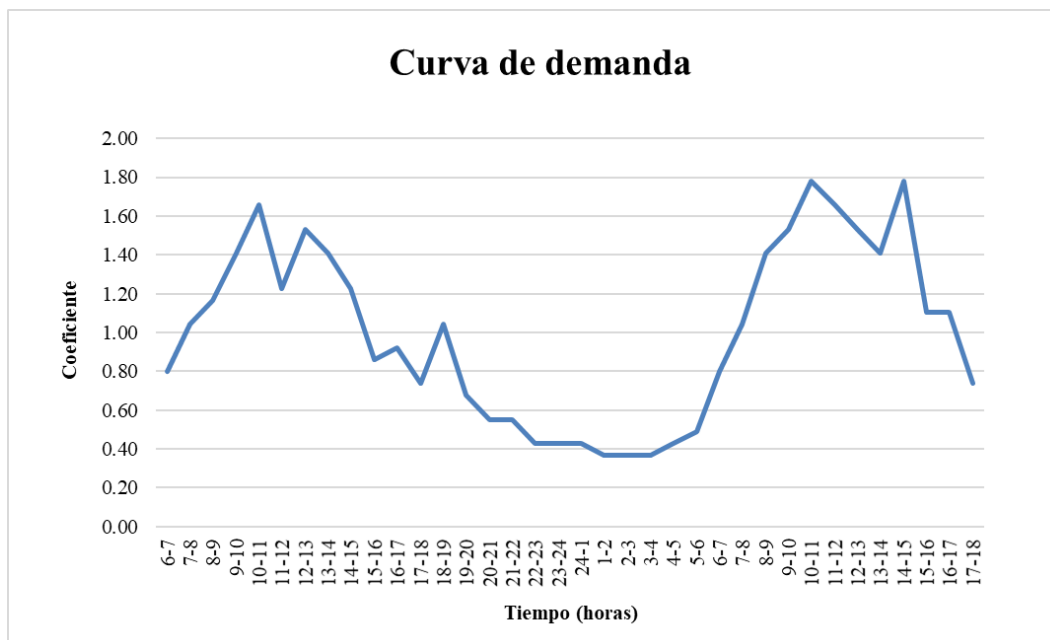
Demanda de agua Total	
Qmd (L/s)	3.10
QMD (L/s)	4.03
QMH (L/s)	6.45

Según la Tabla 9, el Caudal Máximo Diario (QMD) proyectado para el acueducto Mazo dentro de 25 años será de 4.03 L/s. Sin embargo, de acuerdo con el informe sobre la capacidad de la planta de Mazo, elaborado por el Distrito de Medellín, la planta actualmente tiene una capacidad máxima de tratamiento de solo 1.2 L/s. Esto indica que, para cubrir la demanda futura, será

necesario implementar una fuente de abastecimiento adicional o mejorar la capacidad existente para asegurar un suministro suficiente y continuo en el futuro.

#### 6.3.4. Curva de demanda

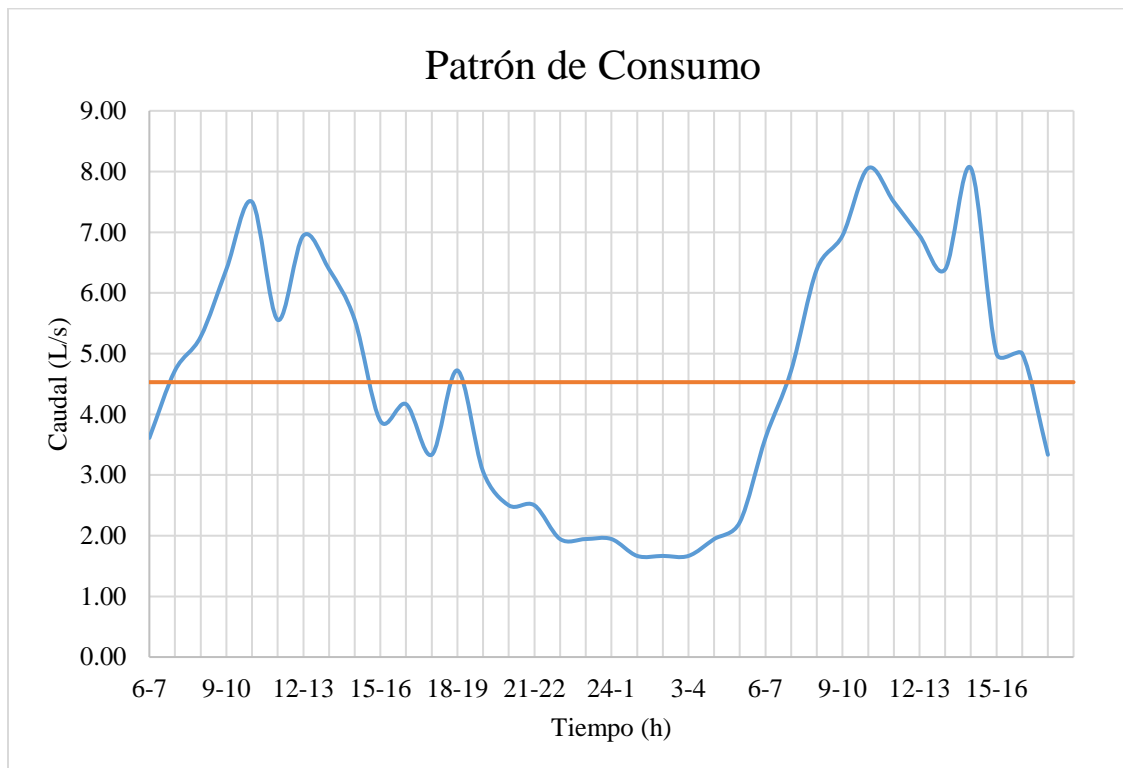
Para conocer las dinámicas poblacionales, es fundamental saber el consumo promedio de la población. Por ello, se elaboró una curva de demanda (ver gráfica 3) a partir de mediciones horarias en los macromedidores de la planta, realizadas desde las 6:00 a.m. del sábado hasta las 6:00 p.m. del domingo por el acueducto Piedras Blancas, abarcando un total de 36 horas de registro. Estas se realizaron durante el fin de semana, ya que es cuando Santa Elena recibe un mayor número de visitantes, lo que incrementa la demanda de agua. Además, la mayoría de las reservas para glampings y cabañas ocurren en esos días, lo que refuerza la necesidad de capturar el comportamiento del consumo en su momento más alto.



Gráfica 3: Curva de demanda acueducto veredal Piedras Blancas. Elaboración propia.

Como se denota en la gráfica 3, se pueden observar 2 periodos de hora pico en los horarios de 10 a.m. a 11 a.m. y en la tarde de 2 p.m. a 3 p.m. con un coeficiente de demanda de 1.78, estas horas coinciden con actividades comunes en la mañana y tarde, como el uso de duchas, aseo personal, preparación de alimentos y la limpieza de espacios. A partir de las 6 p.m. las demandas

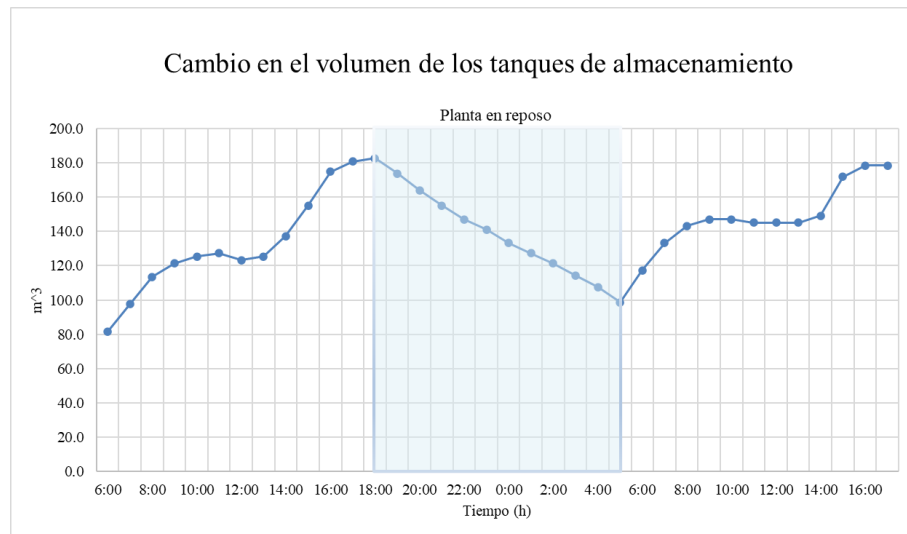
comienzan a disminuir gradualmente hasta alcanzar valores mínimos entre las 8 p.m. y 5 a.m. con un coeficiente mínimo de 0.37 de 2 a 4 de la mañana. Este comportamiento es normal y característico de los horarios nocturnos, cuando la actividad disminuye en general y las personas descansan, lo que resulta en un menor consumo de agua. A partir de las 5 de la mañana, los coeficientes de demanda comienzan a elevarse, coincidiendo con el inicio de las actividades de la población.



Gráfica 4: Patrón de consumo. Elaboración propia.

La gráfica 4, muestra el patrón de consumo de las veredas que abarca el acueducto de Piedras Blancas, este refleja un caudal promedio de 4.53 L/s, denotado por la línea naranja, un caudal máximo de 8.06 L/s en hora pico y un caudal mínimo de 1.67 L/s en las horas valle. Esta gráfica también revela que, durante los fines de semana, las personas tienden a levantarse un poco más tarde, lo cual se refleja en un desplazamiento de los picos de consumo hacia horas más avanzadas del día.

A partir del ejercicio de medición de caudales realizados hora a hora, se logró determinar el cambio en el volumen de los tanques de almacenamiento, que se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 5 :Cambio en el volumen de los tanques de almacenamiento. Elaboración propia

En la gráfica 5 se observa que el volumen del tanque aumenta durante las primeras horas del día debido a la operación de la planta. Sin embargo, en las horas pico se presentan fluctuaciones en el volumen por la alta demanda de agua. Posteriormente, el volumen almacenado vuelve a incrementarse conforme disminuye la demanda, hasta las 6 de la noche, cuando el tratamiento se detiene y la planta entra en reposo. A partir de entonces, la curva de volumen desciende gradualmente, ya que solo se registra consumo, continuando esta disminución hasta las 6 de la mañana, momento en que la planta retoma su operación y la curva muestra un patrón similar al del día anterior.

#### 6.4. Fase 4: Digitación de datos en EPANET

Tras calcular la demanda, se procedió a implementar los datos en el software EPANET. Para ello, fue necesario utilizar el programa ArcGIS, con el cual se extrajeron las elevaciones y coordenadas de los nodos a partir de un Modelo Digital de Elevación proporcionado por el Distrito de Medellín. La digitación de los diámetros, el material de las tuberías, las pérdidas menores, los proveedores y la demanda por nodo (calculada mediante el método de carga unitaria de habitantes/usuario; ver ANEXO 3 y 4), entre otros datos, se realizó con base en los planos



existentes e información suministrada por los acueductos y el Distrito de Medellín. Además, esta información fue verificada en conjunto con los fontaneros para asegurar su precisión y actualización.

### 6.5. Fase 5: Calibración de las presiones

Después de ingresar todos los datos y ejecutar el modelo, se procedió a calibrar las presiones del acueducto de Piedras Blancas, ajustándolo a las demandas actuales para lograr que las presiones coincidieran con las condiciones reales. La calibración se realizó mediante mediciones de presión en diferentes puntos estratégicos de la red, utilizando un manómetro calibrado, tal como se ve en la ilustración 10. En total, se tomaron 38 mediciones en ubicaciones clave, incluyendo las colas de red, algunas bifurcaciones y puntos intermedios. Posteriormente, fueron ingresadas a EPANET.

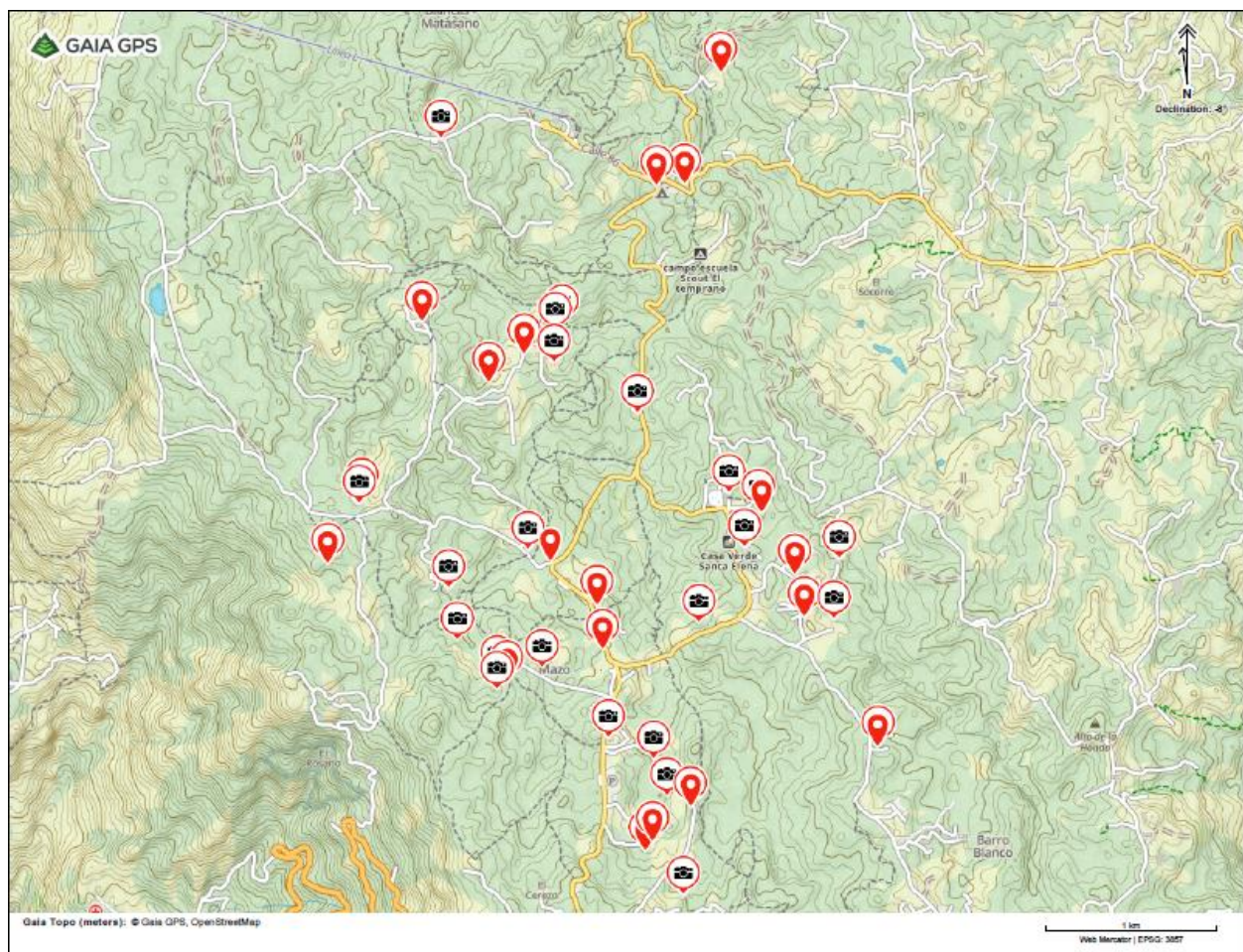


Ilustración 10: Puntos de medición de presiones. Tomado de Gaia GPS.



Ilustración 11: Toma de presiones.

## 7. RESULTADOS

Se evaluaron en total 3 escenarios: la red actual de Piedras Blancas, la red de Piedras Blancas proyectada a 25 años como lo estipula el RAS y la red con la incorporación del acueducto Mazo a 25 años.

### 7.1. Calibración

Como resultado de la calibración se representa la tabla 10, que muestra algunas de las presiones observadas en campo y las presiones simuladas por el modelo hidráulico junto con el error medio el cual hace referencia a la diferencia que hay entre estos dos valores.

Tabla 10: Presiones observadas en campo y presiones simuladas por EPANET. Elaboración propia.

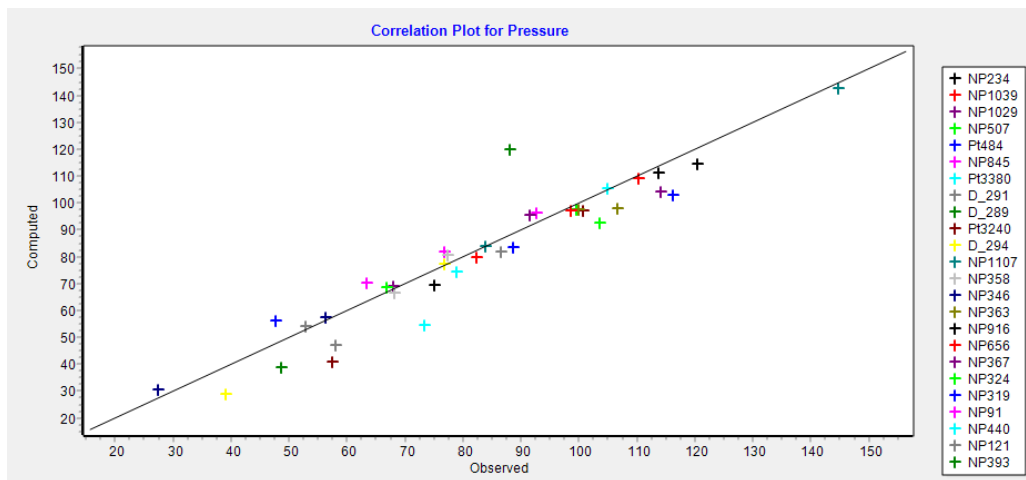
<b>Nodos</b>	<b>Presiones observadas en Campo [m.c.a]</b>	<b>Presiones simuladas por EPANET [m.c.a]</b>	<b>Error medio</b>
<b>NP234</b>	74.99	69.61	5.38
<b>NP1039</b>	82.26	79.72	2.54
<b>NP1029</b>	68.06	69.09	1.03
<b>NP507</b>	99.62	97.46	2.16
<b>NP1107</b>	144.68	142.67	2.01
<b>NP358</b>	68.16	66.61	1.55
<b>NP346</b>	27.43	30.5	3.07
<b>NP363</b>	106.64	97.92	8.72
<b>NP916</b>	113.69	111.36	2.33
<b>NP656</b>	110.18	109.3	0.88
<b>NP324</b>	66.88	68.72	1.84
<b>NP393</b>	88	119.96	31.96
<b>NP374</b>	100.67	97.06	3.60
<b>NP143</b>	76.74	77.53	0.79
<b>NP409</b>	83.78	83.84	0.06
<b>NP625</b>	91.52	95.61	4.09
<b>NP700</b>	103.49	92.62	10.89
<b>NP573</b>	116.16	102.92	13.24
<b>NP1190</b>	52.8	54.3	1.49

La diferencia entre los valores observados y los valores simulados es mínima en la mayoría de los puntos, con excepción de algunos nodos donde se registran discrepancias notables. Sin embargo, se obtuvo una correlación de 0.946, un valor cercano a 1, lo que indica una alta similitud

entre los datos medidos y simulados. Esto sugiere que el modelo representa con precisión las condiciones reales del sistema, como se puede observar en la gráfica 6.

Además, una correlación de 0.946 implica que las variaciones en las presiones simuladas siguen de manera consistente las tendencias de las presiones medidas. En términos prácticos, por ejemplo, si en un punto de medición la presión medida como en el nodo NP409 es de 83.78 m.c.a y la simulada es de 83.84 m.c.a, esta pequeña diferencia indica un ajuste adecuado del modelo. Sin embargo, en nodos específicos donde la diferencia es más significativa, como la presión medida del nodo NP393 que es de 88 m.c.a frente a la simulada de 119.96, podrían reflejarse situaciones que ameritan una revisión más detallada, como una posible subestimación del consumo local o una falta de precisión en la caracterización de las condiciones hidráulicas como los diámetros de la tuberías y las rugosidades.

Estas diferencias, aunque puntuales, pueden tener implicaciones prácticas en la operación del sistema. Por ejemplo, en zonas críticas donde la presión mínima es esencial para garantizar el suministro, incluso pequeñas desviaciones podrían afectar la calidad del servicio. A pesar de estas discrepancias, la alta correlación confirma que el modelo es una herramienta confiable para el análisis y la planificación operativa del sistema.



Gráfica 6: Correlación de las presiones. Tomado de EPANET.

El gráfico de correlación de presiones muestra la relación entre todos los valores observados en capo (eje x) y los valores simulados por EPANET (eje y) para los diferentes puntos de la red de distribución. La línea diagonal representa la línea de perfecta correlación donde los

puntos que están más cerca indican que los valores simulados en el modelo están alineados con los valores medidos en campo, lo que sugiere que el modelo está reproduciendo de manera adecuada las presiones observadas. Algunos puntos están un poco alejados de la línea, por lo que hay discrepancias en las presiones calculadas para esas ubicaciones en comparación con las observadas, esto podría deberse a variaciones en el modelo o inexactitud en algunos datos de entrada.

## **7.2. Diagnóstico de la Red actual.**

Todo sistema de agua potable debe garantizar un servicio óptimo a los usuarios, por tal razón es importante analizar la variación de parámetros como la presión y la velocidad, siendo estos indicadores del funcionamiento hidráulico del sistema de abastecimiento de agua potable (Zúñiga Rodríguez, 2019).

### ***7.2.1. Chequeo de presiones.***

Para evaluar el estado actual de la red de abastecimiento en términos de presión, la ilustración 12 muestra las presiones en un momento de baja demanda en el mapa de la izquierda o "hora valle" a las 3 a.m. y el mapa de la derecha muestra la red en alta demanda o "hora pico," identificada en este estudio a las 10 a.m. Las horas valle normalmente son en las horas de descanso de las personas donde no hay casi demanda por lo que la red suele experimentar un aumento en la presión, debido a la menor cantidad de puntos de consumo simultáneo.

Esta menor demanda permite que las presiones en las tuberías aumenten, ya que el agua encuentra menos resistencia y fricción al desplazarse, lo que provoca que las presiones tiendan a estabilizarse en niveles más altos (Monsef et al., 2018). Todo lo contrario, a las horas pico que suelen coincidir con el inicio de la jornada, entre las primeras horas de la mañana, y el final de la tarde. Durante estas horas, el consumo de agua aumenta debido a la mayor demanda de los usuarios, lo que provoca que el sistema de abastecimiento deba distribuir agua simultáneamente a múltiples puntos. Esto genera una disminución en las presiones de ciertas áreas de la red, conocida como caída de presión, particularmente en los puntos más alejados o aquellos situados a mayor altitud.

Este fenómeno de caída de presión ocurre porque la demanda elevada reduce la capacidad del sistema para mantener niveles de presión constantes en todos los puntos (Tian et al., 2023). Además, el efecto de la fricción en las tuberías se incrementa bajo condiciones de alto flujo, lo que amplifica la pérdida de presión (Tavakoli et al., 2015).



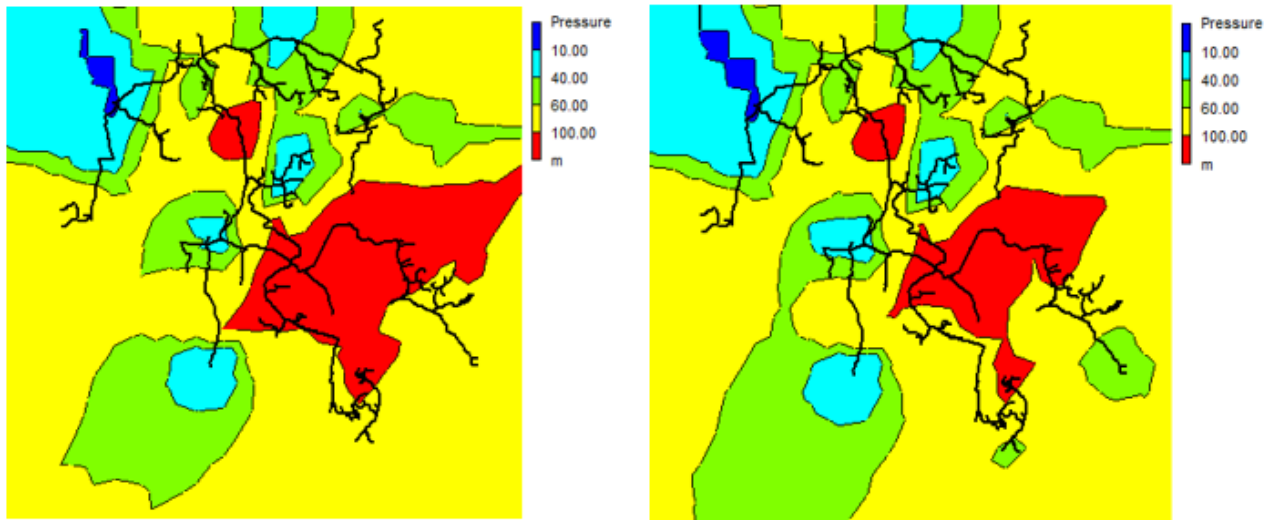


Ilustración 12: Mapas de contorno de presión para la hora de menor consumo (3 a.m.) y mayor consumo (10 a.m.) respectivamente. Tomado de EPANET.

Las zonas de color azul oscuro en la ilustración 12 representan puntos con presiones menores a 10 m.c.a. Este fenómeno se debe a su proximidad a la planta, lo cual puede considerarse un comportamiento hidráulico esperable en estas condiciones. Sin embargo, las presiones menores a 10 m.c.a. son indicativas de un servicio insuficiente para muchos usuarios, ya que podrían ocasionar fluctuaciones en el suministro, como baja disponibilidad de agua en pisos altos o interrupciones intermitentes, especialmente durante horas pico de consumo.

Por otro lado, las zonas amarillas muestran puntos con presiones mayores a 60 m.c.a., mientras que las zonas rojas representan presiones superiores a 100 m.c.a. Estas presiones elevadas, pueden ser problemáticas para la infraestructura y la calidad del servicio ya que incrementan el riesgo de fugas y rupturas en las tuberías, especialmente en materiales más antiguos o en tuberías mal instaladas. Además, estas presiones pueden ocasionar un desgaste acelerado en accesorios hidráulicos como válvulas y medidores, aumentando los costos de mantenimiento y la frecuencia de reparaciones.

La distribución de presiones observada en los mapas varía significativamente entre las zonas bajas de la red, donde se presentan diferencias de altura de hasta 130 metros con respecto a la planta, y otras áreas con desniveles menores, de aproximadamente 30 metros. Durante horas críticas, como las representadas en los mapas, estas variaciones se amplifican, especialmente en las colas de red, donde las presiones suelen ser más inestables. Por ejemplo, en estas áreas pueden

ocurrir fluctuaciones que impacten directamente la calidad del servicio, generando que los usuarios experimenten caídas bruscas en el caudal disponible o, en casos extremos, afectando la continuidad del suministro.

Así mismo, se simularon válvulas reguladoras de presión en distintos puntos de estas zonas bajas; sin embargo, su implementación no es factible, ya que la presión debe mantenerse dentro de estos rangos para no afectar el suministro en las áreas altas de la red, especialmente en las veredas Piedra Gorda y Barro Blanco. Por lo que se recomienda incorporar válvulas reguladoras de presión domiciliarias a los usuarios que estén conectadas en estas áreas para evitar rupturas en las redes domiciliarias.

Tabla 11: Presiones máximas y mínimas de trabajo para hora valle y hora pico en los nodos NP667, NP273 y NP716. Elaboración propia.

<b>Hora</b>	<b>Pmax [m.c.a.]</b>	<b>Pmin [m.c.a.]</b>
<b>3:00 a.m.</b>	173.04	4.79
<b>10:00 a.m.</b>	169.78	4.64

El RAS 2017 establece que hasta el 5% del área total de una red de distribución puede tener una presión dinámica mínima, siempre que esta no sea inferior a 5 m.c.a. para poblaciones de diseño de menos de 12,500 habitantes. De acuerdo con esta normativa, la red actual de Piedras Blancas no cumple con los requisitos mínimos de presión. Además, el artículo 62, párrafo 1, aclara que las presiones estáticas máximas pueden exceder los 50 m.c.a., pero solo si corresponden a un máximo del 5% del área de la zona de presión y sin sobrepasar los 60 m.c.a.

Como se muestra en la tabla 10, la red actual tampoco cumple con los límites de presión máxima especificados en la normativa. Sin embargo, cabe señalar que la red fue diseñada en 2009, por lo que el reglamento técnico colombiano (Resolución 0330/2017) no exige que los acueductos diseñados antes de su implementación cumplan estrictamente con sus parámetros. No obstante, es importante que futuras ampliaciones y optimizaciones en la red se realicen en conformidad con los valores de presión establecidos en esta normativa para garantizar la adecuada prestación del servicio y el cumplimiento de los estándares actuales.

### 7.2.2. Chequeo de velocidades

Las velocidades con los diámetros modelados, los accesorios involucrados y coeficientes de rugosidades de 0.0015 para PVC y 0.25 para Hierro Dúctil en pequeños tramos de la tubería, dan como resultado las siguientes velocidades de trabajo.

Tabla 12: Velocidades máximas y mínimas para hora valle y hora pico en los nodos P396, TP667, TP608 y TP611. Elaboración propia

Hora	Vmax [m/s]	Vmin [m/s]
3:00 a.m.	0.18	0
10:00 a.m.	1.05	0

Es fundamental evaluar las velocidades máximas correspondientes a las condiciones de presión mínima, es decir, durante la hora de mayor consumo, en este caso entre las 10 y 11 a.m., verificando la posibilidad de ocurrencia de golpes de ariete. También se deben analizar las velocidades mínimas en el intervalo de 3 a 4 a.m., cuando las presiones alcanzan su valor máximo debido a la baja o nula demanda. Esto permite asegurar velocidades operativas adecuadas para el lavado unidireccional de biopelículas, manteniendo así la calidad y funcionalidad de la red en condiciones controladas.

En la tabla 11 se puede notar que, la red de Piedras Blancas no cumple con las velocidades superiores a 0.5 m/s requeridas para prevenir la formación de puntos muertos en la red. Según Erdei-Tombor et al. (2024), mantener una velocidad mínima es crucial para evitar la acumulación de biofilm, ya que velocidades bajas permiten una mayor adherencia de bacterias y el desarrollo de matrices biológicas, afectando así la calidad del agua y promoviendo la proliferación de bacterias resistentes al cloro en sistemas de distribución de agua potable.

Para asegurar la remoción de biopelículas y depósitos inorgánicos dentro de las tuberías, es necesario que la velocidad de lavado alcance al menos 1.8 m/s, condición que no se logra en las tuberías de la red. En la lustración 13 se muestra las zonas que no cumplen con estas velocidades mínimas en la hora de menor consumo, así como la presencia de puntos muertos en color azul oscuro. En estas áreas, identificadas por sus bajas velocidades, se sugiere que se hagan mantenimientos continuos. Sin embargo, la ausencia de altas velocidades tiene la ventaja de reducir el riesgo de golpes de ariete al abrir ciertas válvulas y accesorios del sistema.



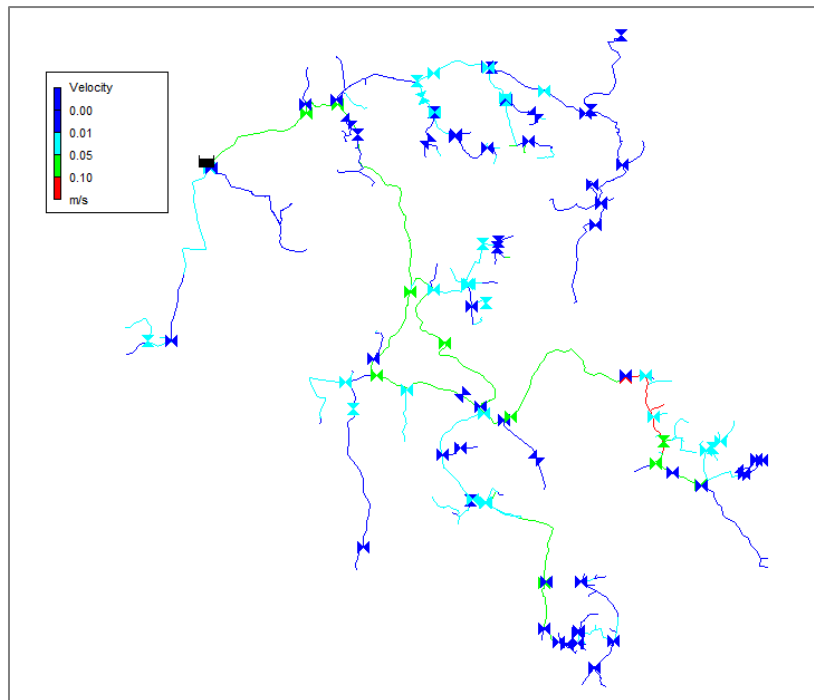


Ilustración 13: Velocidades de la red e identificación de puntos muertos. Tomado de EPANET.

### 7.2.3. Implementación de válvula reguladora de presión -VRP.

Se identificó una zona con un ramal cercano a la planta, donde se presenta la mayor presión del sistema, llegando a 170 m.c.a en la hora valle, como se muestra en la ilustración 14.

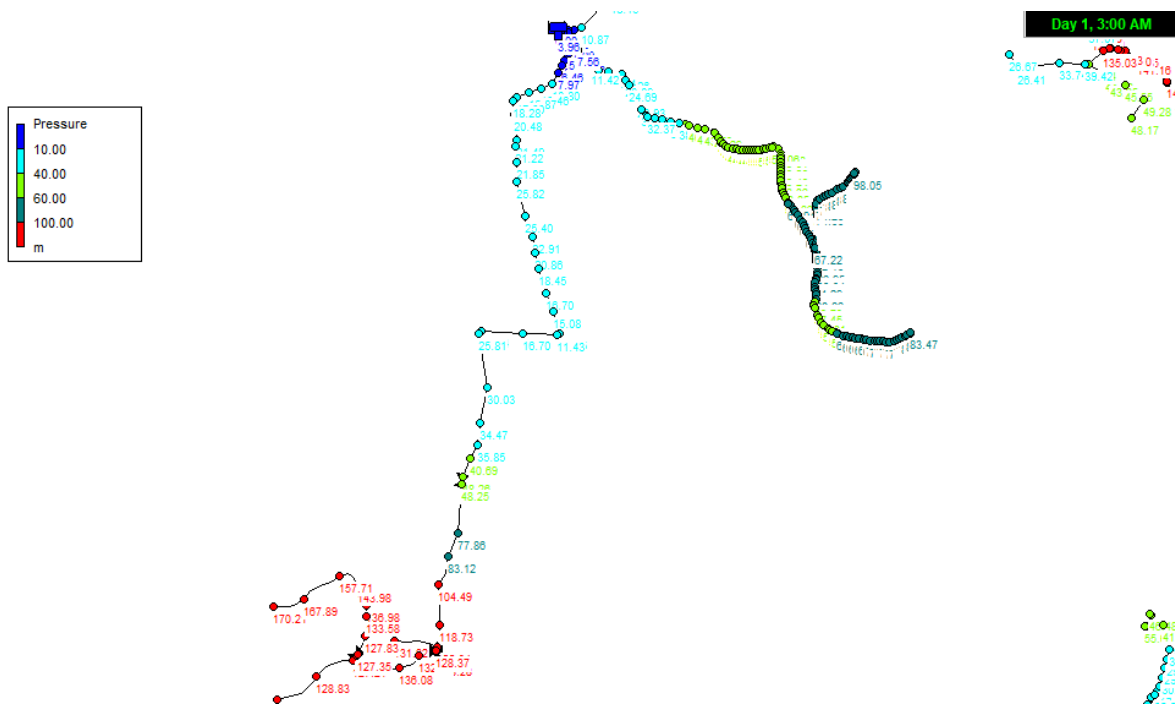


Ilustración 14: Zona de presiones muy altas en el sector Piedras Blancas. Tomado de EPANET.

Con el fin de reducir la presión de esa zona y evitar daños en las redes internas de las casas conectadas en esta área, se propone la implementación de una válvula reguladora de presión en la coordenada X: 839817.852m y coordenada Y: 1184912.211m en el sistema de cordenadas MAGNA-SIRGAS. Con una configuración de presión de salida de 10 m.c.a. Al simular el escenario anterior en EPANET, se logra reducir la presión en esta zona sin afectar otros puntos de la red, como se visualiza en la ilustración 15.

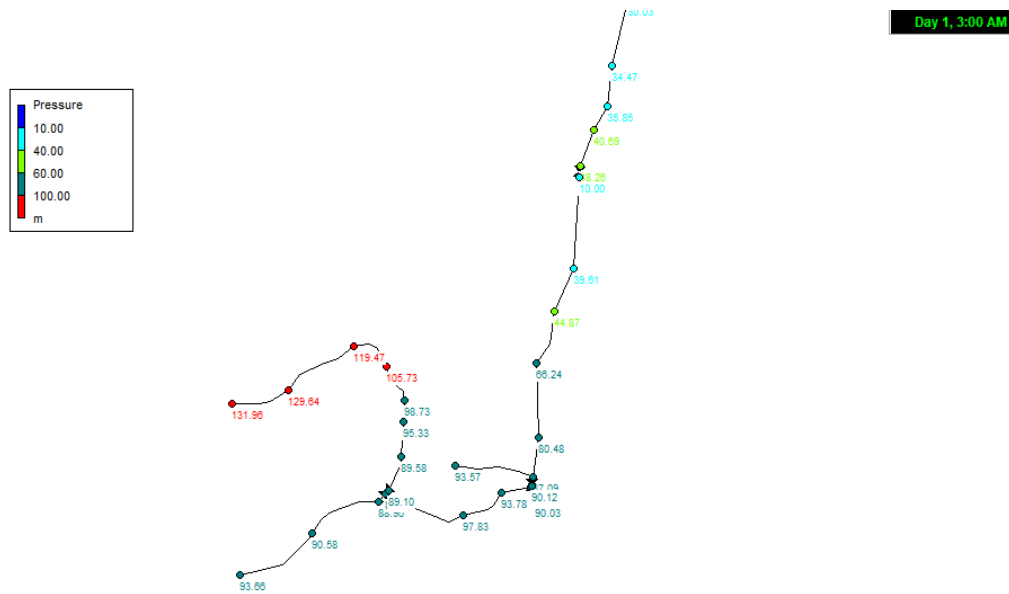
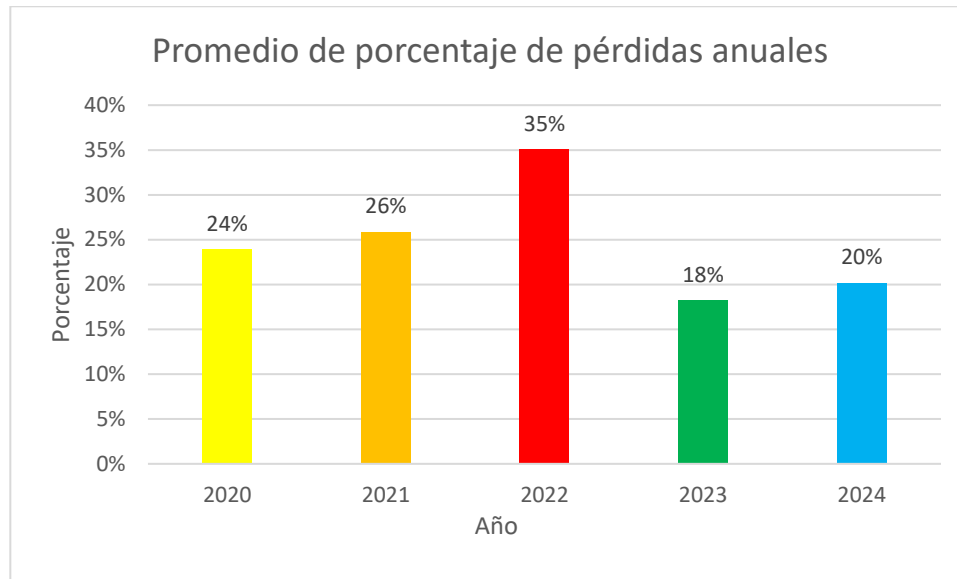


Ilustración 15: Implementación de válvula reguladora de presión en la red actual. Tomado de EPANET

#### ***7.2.4. Pérdidas Totales de agua del sistema***

Como parte del análisis de los datos suministrados por el acueducto, se realizó el cálculo del porcentaje de pérdidas anuales de los últimos 5 años, teniendo en cuenta el volumen tratado con respecto al volumen facturado. Dando como resultado el promedio del porcentaje de pérdidas de agua anuales mostrado en la siguiente gráfica.



Gráfica 7: Promedio de porcentaje de pérdidas anuales. Elaboración propia

La gráfica 7 muestra que, las pérdidas de agua aumentaron del 24% en 2020 al 35% en 2022. Este crecimiento del 11% según el acueducto, se debe a que en ese año se presentaron muchas fugas de agua como arreglos representativos en la red, aunque también puede indicar la falta de mantenimiento y conexiones irregulares. En 2023, las pérdidas se redujeron drásticamente al 18%, lo cual indica una posible intervención en la red que mejoró la eficiencia. Sin embargo, en los registros hasta julio del 2024, las pérdidas suben ligeramente a un 20%, lo que sugiere que las medidas implementadas en 2023 podrían no haber sido sostenibles o que surgieron nuevos problemas en el sistema.

La siguiente tabla muestra las pérdidas en dinero anuales, que tuvo el acueducto Piedras Blancas, debido a las pérdidas de agua de la gráfica anterior, manejando una tarifa de 3494.41 \$/m<sup>3</sup>.

Tabla 13: Pérdidas monetarias debido al agua fugada. Elaboración propia

Año	Pérdidas en pesos
<b>2020</b>	\$ 89,841,281.10
<b>2021</b>	\$ 103,804,943.46
<b>2022</b>	\$ 171,973,893.74
<b>2023</b>	\$ 69,437,421.11
<b>2024</b>	\$ 49,421,440.63
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 484,478,980.04</b>

Las pérdidas alcanzaron su punto máximo en 2022 con un valor de 171 millones de pesos lo que refleja un costo significativo que afecta las finanzas del acueducto ya que este monto representa el 35 % de las pérdidas en los 5 años analizados. En contraste, en el 2024 las pérdidas se redujeron a 49 millones, sin embargo, estas son las pérdidas de 7 meses de análisis por lo que no se podría decir que fue el año que menor pérdidas obtuvo. Ya que este monto sigue siendo significativo el cual podría destinarse para mejoras o expansiones en el sistema.

Las posibles causas de estas pérdidas pueden ser fugas no visibles, conexiones ilegales o irregulares, tuberías viejas o desgastadas, falta de sectorización y control de presiones.

Se recomienda hacer optimizaciones en las presiones de la red evaluadas en el modelo hidráulico, como la instalación de válvulas reguladoras en los puntos de máximas presiones como el recomendado en el ítem 7.2.3. También podrían implementar sensores de flujo y presión en puntos estratégicos como los mostrados en color rojo de las gráficas de presión que permitan detectar fugas de manera inmediata y reducir las pérdidas. Realizar mantenimiento preventivo en las tuberías más antiguas o en caso de cambio actualizarlas progresivamente y realizar una correcta sectorización.

### **7.3. Red de distribución Piedras Blancas proyectada a 25 años.**

Para un correcto desarrollo de la modelación hidráulica, se analizó la red con una proyección a 25 años, considerando la demanda futura estimada en el numeral 6.3.3.

#### ***7.3.1. Chequeo de presiones.***

Al ejecutar el modelo, se generó un informe que identificó presiones negativas en distintas horas del día, especialmente durante los picos de consumo. En la ilustración 16 se muestra el mapa de presiones en hora valle y hora pico, donde se evidencia la disminución significativa de presión en varias áreas de la red debido a la demanda proyectada.

Las áreas en amarillo y rojo en el mapa de la izquierda indican las zonas que experimentarán las presiones más elevadas del sistema con la demanda proyectada a 25 años, alcanzando un máximo de 167.07 m.c.a. (ver ANEXO 5 y modelación a 25 años). Esto se puede comparar con las áreas mostradas en la ilustración 12 del mapa de hora valle, donde estos sectores de la red, ubicadas en las cotas más bajas, son especialmente propensas a registrar altas presiones.

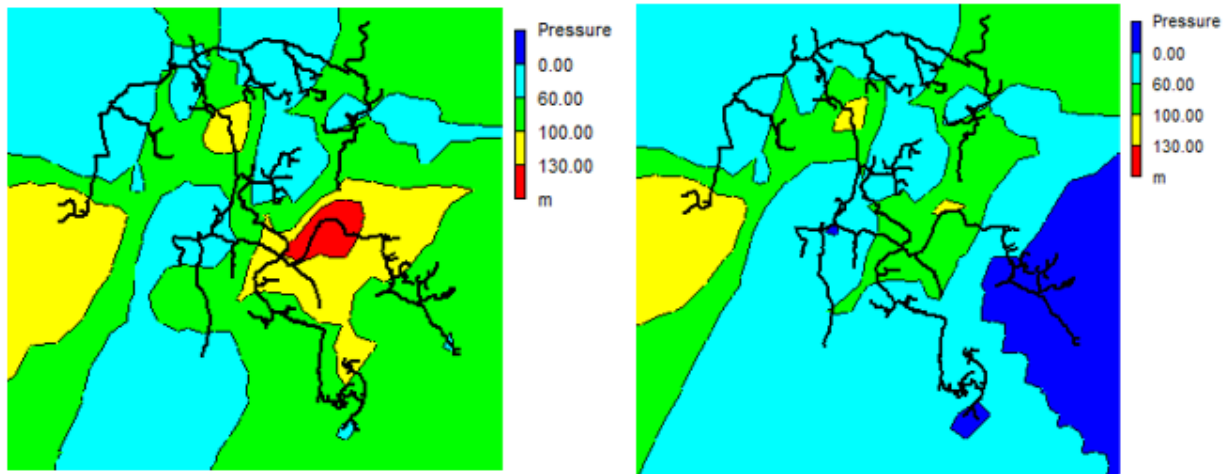


Ilustración 16: Mapas de contorno de presión de la red a 25 años para la hora de menor consumo (3 a.m.) y mayor consumo (10 a.m.) respectivamente. Tomado de EPANET

La zona en azul oscuro del mapa derecho representa los puntos en la red donde se proyectan presiones negativas, lo cual en términos físicos implica la falta de suministro de agua debido a la infraestructura actual de la red. Aunque en realidad las presiones negativas no existen físicamente, el software de modelación las muestra como áreas sin servicio a 25 años, dada la creciente demanda. Este fenómeno ocurre en las zonas más altas, donde la altura y la gravedad dificultan el suministro adecuado, favoreciendo el flujo hacia áreas de menor altitud. Diversos estudios como los de López et al., 2019 y Gómez et al., 2020 han indicado que, en redes con grandes variaciones de altitud, la demanda futura puede causar deficiencias en la presión en los puntos elevados, lo que requiere intervenciones en la infraestructura para mantener un servicio constante.

Por lo tanto, del mapa anterior se puede concluir que, sin mejoras y actualizaciones en la infraestructura como cambios en los diámetros de las tuberías, la red del acueducto Piedras Blancas no soportará la demanda futura y las zonas mostradas en el mapa seguirán siendo vulnerables a caídas de presión. Además, la planificación de futuros proyectos de expansión y actualización deberán considerar las presiones de diseño bajo escenarios de demanda creciente, asegurando un suministro adecuado en toda la red.

### 7.3.2. Chequeo de velocidades

Las velocidades que se manejan en la proyección a 25 años de la red del acueducto Piedras Blancas se muestran en la tabla 14.

Tabla 14: Velocidades máximas y mínimas para hora valle y hora pico del acueducto Piedras Blancas proyectado a 25 años en las tuberías TP66, TP318, TP831 y TP832. Elaboración propia

Hora	Vmax [m/s]	Vmin [m/s]
3:00 a.m.	0.55	0
10:00 a.m.	3.28	0

En la tabla anterior, se observa que las velocidades mínimas necesarias para evitar puntos muertos durante la hora valle no se cumplen. Además, en hora pico, la velocidad mínima registrada es de 0 m/s. Al analizar el modelo hidráulico para identificar las áreas donde se presenta esta velocidad, se constató que corresponde a las tuberías que conducen hacia los hidrantes de la red, los cuales no se utilizan constantemente. Como resultado, el modelo hidráulico muestra estas tuberías sin flujo de agua. Considerando este aspecto, la velocidad mínima registrada en la red es de 0.001 m/s (ver ANEXO 6 / Velocidades red a 25 años).

### 7.4. Análisis de conexión del acueducto Piedras Blancas con el acueducto de Mazo.

El acueducto Mazo dispone de dos líneas totalmente independientes, la red de gravedad y la red de impulsión como se denota en el siguiente mapa.

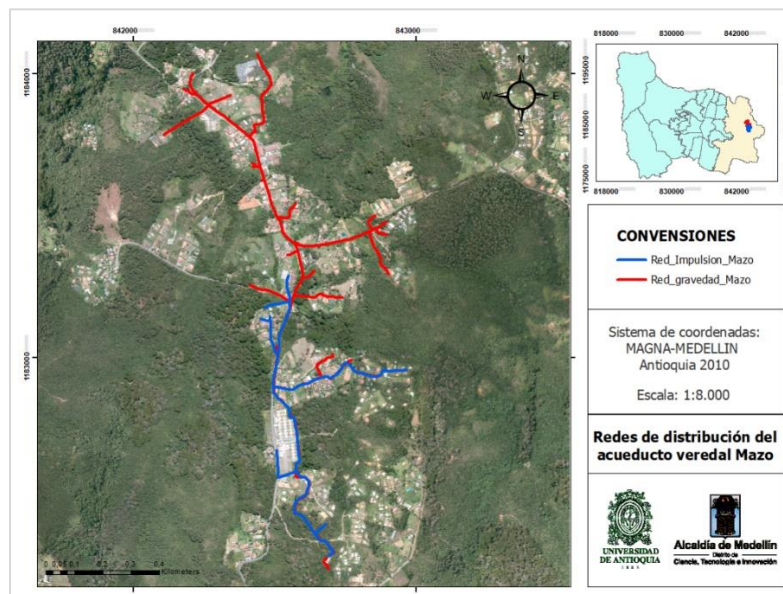


Ilustración 17: Mapa redes de distribución del acueducto veredal Mazo. Elaboración propia en ArcGIS

#### 7.4.1. Interconexión Piedras Blancas – Mazo.

Actualmente, existe una interconexión directa entre el acueducto Piedras Blancas y los tanques intermedios del acueducto Mazo (ver ilustración 8), regulada por una válvula de cierre. Estos tanques abastecen a la red de gravedad. Se propone abrir completamente esta interconexión e implementar una nueva conexión entre ambas redes de distribución del acueducto Mazo, cerca de la conexión con Piedras Blancas como se ve en la línea verde de la ilustración 18, con el objetivo de garantizar una distribución uniforme que permita abastecer a todos los usuarios del acueducto Mazo.

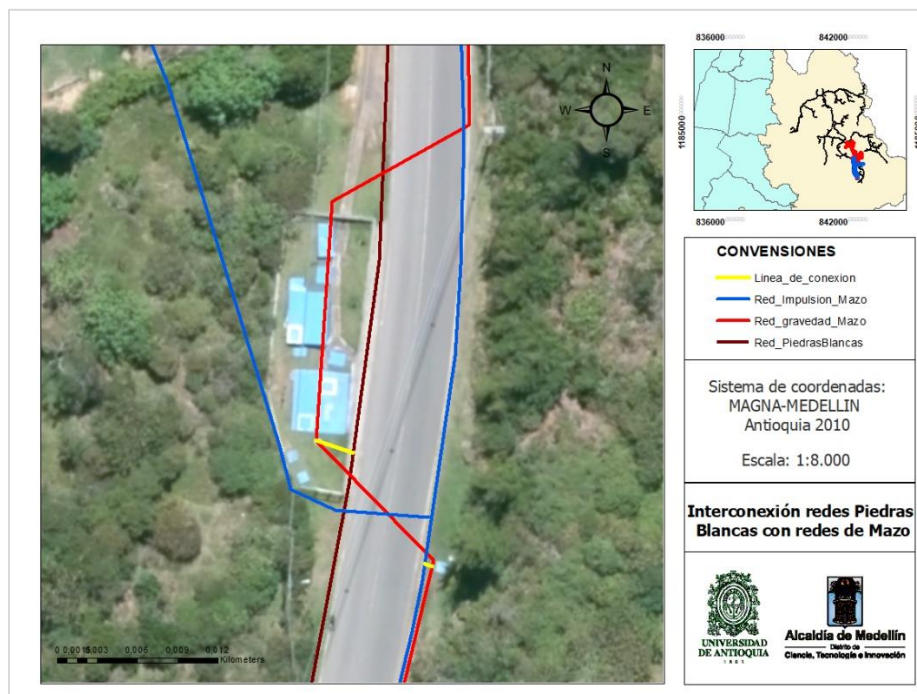


Ilustración 18: Mapa punto de interconexión de las redes de los acueductos Piedras Blancas y Mazo. Elaboración propia en ArcGIS

Como se puede notar, en el punto 7.3, la red de Piedras Blancas se deberá modificar para soportar a futuro la demanda de los usuarios proyectados. En la ilustración 19, se muestran 2 mapas de contorno, el mapa de la derecha representa la interconexión de los acueductos con los usuarios actuales en la hora de máximo consumo por lo que se puede visualizar la estabilidad de la red actual si se conecta al acueducto Mazo. Sin embargo, en el mapa de la derecha el cual representa la proyección a 25 años de ambos acueductos en la hora de mayor consumo, se muestra con zonas sin servicio (color azul oscuro), ya que al incluir más usuarios provenientes del sistema de la vereda



Mazo, la red aumenta su incapacidad de cubrir la demanda de los dos sistemas juntos en el horizonte de 25 años que se evaluó en esta interconexión.

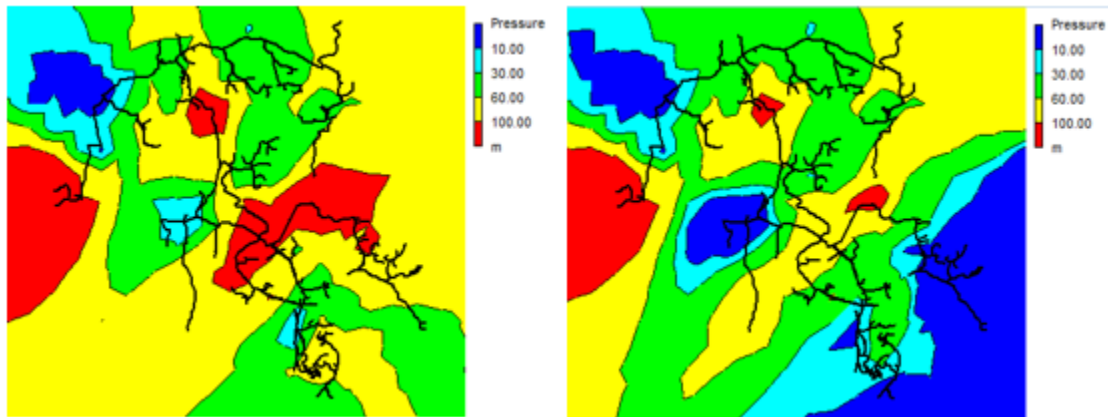


Ilustración 19: Mapas de contorno de la interconexión de los acueductos Piedras Blancas y Mazo en la hora de mayor consumo en el año actual (mapa izquierdo) y la proyección a 25 años (mapa derecho). Tomado de EPANET.

Al ingresar estos datos en el modelo hidráulico se hicieron los siguientes ajustes para garantizar la estabilidad de la red y el abastecimiento a ambos acueductos.

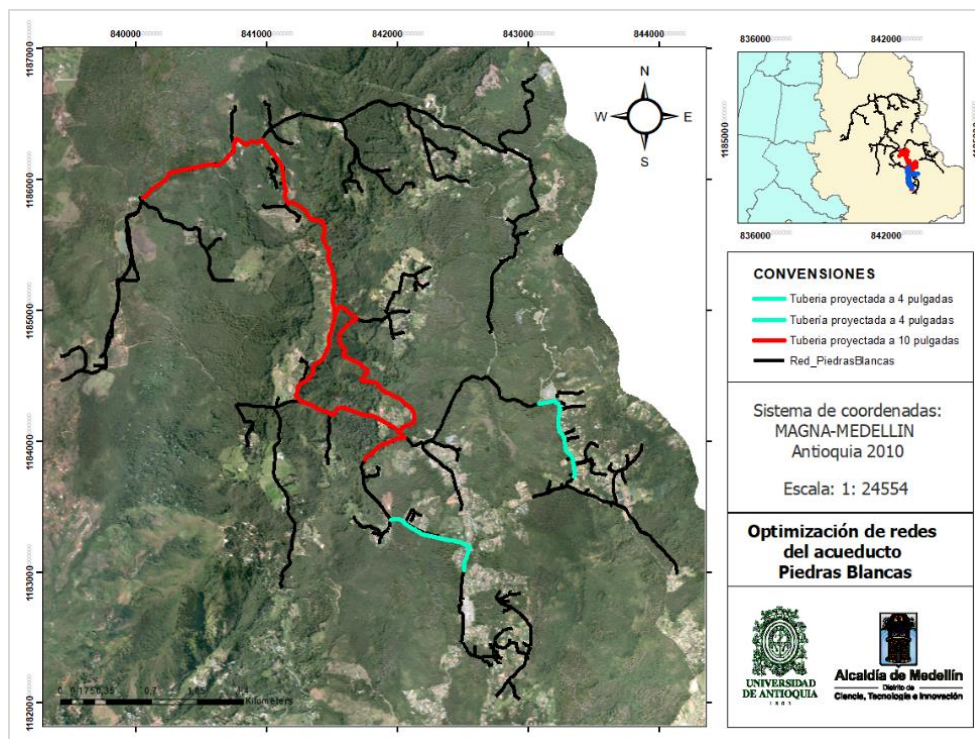


Ilustración 20: Optimización de las redes del acueducto Piedras Blancas. Elaboración propia en ArcGIS



En el mapa anterior se identifican los tramos de la red matriz que se requieren optimizar para asegurar una distribución adecuada de agua tanto al acueducto Piedras Blancas como al acueducto Mazo.

Las tuberías marcadas en color rojo representan los tramos a repotenciar, actualmente de diámetros de 6, 4 y 3 pulgadas, que se recomienda sustituir por tuberías de PEAD de 10 pulgadas PN16 RDE-11. El tramo en color verde agua tiene un diámetro actual de 3 pulgadas que va hasta la entrada de los tanques intermedios del acueducto Mazo, se sugiere reemplazarlo con tubería de 4 pulgadas PEAD PN16 RDE-11. Finalmente, el tramo verde agua, que inicia en el medidor ubicado frente a Comfama, se recomienda cambiarlo por una tubería de 4 pulgadas PEAD PN16 RDE-11. Estos ajustes propuestos buscan mejorar la estabilidad de ambas redes y asegurar una distribución efectiva en todas las áreas. Es importante aclarar que este es un modelo tentativo; sin embargo, es recomendable realizar un análisis complementario que explore otras opciones viables desde el punto de vista económico que también garanticen la estabilidad del sistema.

Finalmente, se realizaron los APUs (Análisis de precio unitario), correspondientes al proyecto de optimización de tuberías de la red de distribución del acueducto Piedras Blancas donde se muestra un presupuesto tentativo resumido del costo total del proyecto.

Tabla 15: Presupuesto tentativo de la optimización de la red matriz de distribución del acueducto Piedras Blancas.  
Elaboración propia.

<b>PRESUPUESTO OPTIMIZACIÓN DE LA RED MATRIZ DE DISTRIBUCIÓN DEL ACUEDUCTO PIEDRAS BLANCAS.</b>		
<b>1</b>	<b>Obras preliminares</b>	\$ 31,446,933.34
<b>2</b>	<b>Movimiento de tierra y excavaciones</b>	\$ 845,860,535.71
<b>3</b>	<b>Llenos y reemplazos</b>	\$ 874,757,560.78
<b>4</b>	<b>Tubería</b>	\$ 2,159,145,014.69
<b>5</b>	<b>Accesorios</b>	\$ 102,064,013.04
<b>6</b>	<b>Válvulas</b>	\$ 17,430,625.59
<b>7</b>	<b>Obras civiles</b>	\$ 22,990,260.17
	<b>Subtotal</b>	\$ 4,053,694,943.30
	<b>Administración (23%)</b>	\$ 920,188,752.13
	<b>Imprevistos (2%)</b>	\$ 81,073,898.87
	<b>Utilidad (5%)</b>	\$ 202,684,747.17
	<b>Valor total del proyecto</b>	\$ <b>5,257,642,341.30</b>

### 7.4.2. Chequeo de presiones.

Con los cambios establecidos en el numeral anterior, se presentan los siguientes mapas de contorno donde se puede ver el efecto de las presiones en ambas redes.

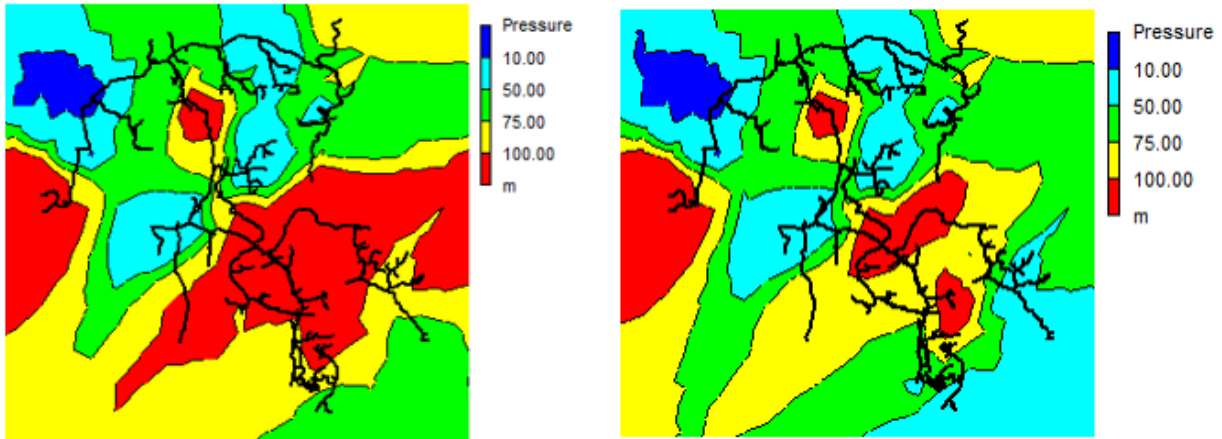


Ilustración 21: Mapas de contorno de presión de las redes de Piedras Blancas y Mazo a 25 años para la hora de menor consumo (3 a.m.) y mayor consumo (10 a.m.) respectivamente. Tomado de EPANET

El mapa de la derecha en la ilustración 21 muestra la condición del sistema en hora valle (3 a.m.), evidenciando un notable incremento de presión en sectores como Piedra Gorda que previamente mantenían niveles más bajos. Este aumento es una consecuencia directa de la conexión entre el acueducto Mazo y el acueducto Piedras Blancas, lo que ha generado redistribuciones en las presiones a lo largo de ambas redes.

En particular, en el acueducto de Mazo se registran presiones más altas en tramos que, antes de la interconexión, no estaban sometidos a estas condiciones. Este cambio podría ocasionar problemas como fisuras, fugas o rupturas en las tuberías, así como daños potenciales en las redes internas de los hogares, especialmente en accesorios o instalaciones diseñadas para operar bajo presiones más bajas.

Dado este panorama, es crucial llevar a cabo una evaluación de la resistencia de las tuberías y accesorios en ambas redes. Esto incluye consultar las especificaciones técnicas del fabricante para confirmar que los materiales instalados puedan soportar los nuevos niveles de presión sin comprometer su integridad estructural. Por ejemplo, tuberías fabricadas en PVC o materiales plásticos podrían estar más expuestas a deformaciones o daños si las presiones exceden los límites recomendados.

Adicionalmente, es recomendable evaluar la instalación dispositivos de control, como válvulas reductoras de presión (VRP), en puntos críticos de ambas redes para mitigar los efectos de las sobrepresiones. Estos dispositivos no solo reducirán el riesgo de fugas o roturas, sino que también protegerán las instalaciones internas de los usuarios.

Por último, el incremento de presión podría alterar la operación de los sistemas internos de distribución en los hogares, como calentadores de agua, grifos, lavadoras, incrementando el riesgo de fallos o disminución en la vida útil de estos equipos. Una campaña de comunicación con los usuarios finales podría ser beneficiosa para informarles sobre posibles ajustes o cambios necesarios en sus instalaciones internas a raíz de la conexión.

En contraste, el mapa correspondiente a la hora pico (10 a.m.) evidencia un comportamiento estable, similar al de los mapas previos de la red de Piedras Blancas en ese horario, y asegura que en ningún momento la red experimentará desabastecimiento, lo cual garantiza la continuidad del servicio.

Tabla 16: Presiones máximas y mínimas de trabajo para hora valle y hora pico de la red unificada de los acueductos de Piedras Blancas y Mazo en los nodos NP667, NP273 y NP716. Elaboración propia.

<b>Hora</b>	<b>Pmax [m.c.a.]</b>	<b>Pmin [m.c.a.]</b>
<b>3:00</b>	168.51	4.83
<b>10:00</b>	163.47	4.81

En la tabla anterior se observa que la red unificada de Piedras Blancas y Mazo no cumple con las presiones máximas establecidas por el RAS/2017; sin embargo, mantener estas presiones es esencial para garantizar la estabilidad en los tramos finales de la red y asegurar el suministro de agua en estas áreas, que, además de estar alejadas de la planta, se ubican en puntos altos. Las presiones mínimas también resultan inferiores a las exigidas, pero corresponden a zonas cercanas a los tanques, donde es común que se registren niveles de presión más bajos.

#### **7.4.3. Chequeo de velocidades.**

Las velocidades que maneja la red que une a acueducto Piedras Blancas y Mazo se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 17: Velocidades máximas y mínimas para hora valle y hora pico de los acueductos Piedras Blancas y Mazo proyectado a 25 años en las tuberías P517, TP152 y P582. Elaboración propia.

<b>Hora</b>	<b>Vmax [m/s]</b>	<b>Vmin [m/s]</b>
<b>3:00</b>	0.41	0
<b>10:00</b>	1.98	0

Como puede observarse, en la tabla 17, las velocidades en la hora valle son bajas, lo cual es habitual en este periodo. Sin embargo, se recomienda seguir las indicaciones mencionadas en los ítems 7.2.2. y 7.3.2. Cabe destacar que la red unificada cumple con la velocidad mínima de lavado de 1.8 m/s, aunque no en todos los tramos; por ello, es importante reforzar las recomendaciones de los ítems señalados. Además, estas velocidades ayudan a reducir la probabilidad de golpe de ariete en la red.

### **7.5. Volumen de almacenamiento futuro.**

Cada sistema de acueducto debe contar con tanques de almacenamiento que aseguren el suministro de agua suficiente para cubrir la demanda de la comunidad servida. Estos tanques deben compensar las variaciones entre el caudal de entrada al tanque y el consumo diario de los usuarios, garantizando a su vez la calidad necesaria para el consumo humano.

#### ***7.5.1 Opción 1: Planta funcionando las 24 horas.***

Para asegurar un almacenamiento adecuado en los tanques que atienda las necesidades de los futuros usuarios de los acueductos Piedras Blancas y Mazo, se realizó el cálculo de la capacidad de regulación y la capacidad de almacenamiento, considerando que la planta opere las 24 horas del día (ver ANEXO 5 / Análisis planta 24 h).

Tabla 18: Capacidad de regulación y capacidad de almacenamiento de los tanques. Elaboración propia.

<b>Capacidad de regulación [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Capacidad de almacenamiento [m<sup>3</sup>]</b>
362.3	606.2

La Tabla 18 presenta los resultados de ambos cálculos, donde se observa que la capacidad de almacenamiento supera a la capacidad de regulación de los tanques. De acuerdo con el artículo 81 de la Resolución 0330/2017, el volumen de diseño debe ser el valor mayor entre la capacidad

de regulación y la capacidad de almacenamiento. Por esta razón, se ha tomado la capacidad de almacenamiento como el volumen de diseño proyectado.

Además, la norma exige que al volumen final se le sume un porcentaje que cubra el caudal de emergencia correspondiente al nivel de riesgo de incendios en la zona. Según el Plan Municipal de Gestión de Riesgos de Desastres de Medellín 2015-2030, Santa Elena presenta un nivel de riesgo del 15%. Así, el volumen final de diseño para garantizar la continuidad del servicio a todos los usuarios de Piedras Blancas y Mazo se encuentra reflejado en la Tabla 19.

Tabla 19: Volumen final de los tanques de almacenamiento. Elaboración propia.

<b>Volumen final [m3]</b>
697.2

Es importante señalar que la planta actualmente dispone de un volumen de almacenamiento de 220 m<sup>3</sup>, por lo que el volumen adicional que se debe proyectar para integrar en el futuro para abastecer a los usuarios de Piedras Blancas y Mazo es de 477.2 m<sup>3</sup>.

### **7.5.2. Opción 2: Planta en pausa.**

Se propone una segunda opción de almacenamiento para la planta en caso de que se desee mantener la dinámica actual, en la cual se suspende el servicio de tratamiento durante la noche y se reactiva en la mañana. Los cálculos correspondientes se encuentran en el ANEXO 5 / Análisis de planta en reposo. La Tabla 20 detalla el volumen necesario para evitar desabastecimientos en ciertas zonas de la red y asegurar la continuidad del servicio incluso cuando la planta esté en pausa.

Tabla 20: Análisis de almacenamiento en los tanques con planta en pausa. Elaboración propia.

<b>Capacidad de regulación [m3]</b>	<b>Capacidad de almacenamiento con la planta en pausa [m3]</b>	<b>Volumen final con caudal de emergencia [m3]</b>
407.6	1274.2	1475.31

En el análisis realizado, se determinó que la capacidad de almacenamiento supera la capacidad de regulación, razón por la cual se ha seleccionado esta capacidad como el almacenamiento de diseño, incorporando además el caudal de emergencia como se puede ver en la

---

Tabla 20. Actualmente, el volumen de almacenamiento de la planta es de 220 m<sup>3</sup>, por lo que el volumen adicional requerido es de 1245.3 m<sup>3</sup>.

### ***7.5.3. Análisis opción 1 y opción 2.***

Como se puede observar, la opción 2 presenta un almacenamiento mayor que la opción 1, ya que en esta última el tratamiento es continuo, mientras que en la opción 2 el tratamiento se interrumpe durante la noche, lo que demanda un mayor volumen de almacenamiento para cubrir las necesidades de suministro en esas horas. En función de estos resultados, es recomendable llevar a cabo un análisis de costo-beneficio que evalúe las implicaciones de ambas opciones. Este análisis debería considerar:

- **Opción 1:** Un volumen de almacenamiento de 477.2 m<sup>3</sup>, con la planta operando las 24 horas del día, y el impacto en los costos de energía asociados a la operación continua.
- **Opción 2:** Un almacenamiento de 1245.3 m<sup>3</sup>, con la planta en pausa nocturna, que evita el costo energético de funcionamiento continuo, pero requiere una inversión inicial mayor para el volumen adicional de almacenamiento.

Este análisis permitirá determinar la opción más eficiente y sostenible, considerando tanto la capacidad para garantizar la continuidad del servicio a los usuarios de Piedras Blancas y Mazo, como los costos energéticos y de infraestructura asociados a cada alternativa.

---

## 8. CONCLUSIONES

Se halló un número representativo de hoteles/cabañas y fincas de recreo, en la extensión de la red de Piedras Blancas, los cuales no se encuentran como establecimientos comerciales suscritos al acueducto, esto genera una carga significativa que aumenta la demanda los fines de semana en un 9%, lo que afecta el comportamiento de la red ya que al incorporar esta carga al sistema las presiones cambian significativamente respecto a las presiones en semana.

El acueducto Mazo enfrenta un reto significativo, ya que la proyección de su demanda futura excede la capacidad máxima de tratamiento de su sistema actual. Para garantizar un suministro continuo y suficiente, será necesario ampliar la capacidad de la planta existente e incorporar una fuente de abastecimiento adicional. Una posible fuente se encuentra a 1 kilómetro de distancia y a 30 metros por debajo del nivel de la planta, lo que requeriría el uso de sistemas de bombeo. Esto generaría un aumento considerable en los costos operativos, tanto en mantenimiento como en consumo energético, lo que podría traducirse a un incremento tarifario para los usuarios del servicio. Sin embargo, una opción más viable sería aprovechar la red de distribución del acueducto Piedras Blancas, como se detalla en la ilustración 18. Gracias a su cercanía y la posibilidad de conexión directa con los tanques intermedios del acueducto Mazo, esta alternativa permitiría evitar inversiones en nuevas estructuras hidráulicas, como estaciones de bombeo o redes de conducción, garantizando un suministro eficiente reduciendo así los costos operativos que traería la implementación de la otra fuente.

El modelo hidráulico alcanzó una correlación de 0.94 entre los datos medidos en campo y los simulados por EPANET. Esto indica que las presiones simuladas reflejan con precisión la tendencia de las presiones reales del sistema, lo que lo convierte en una herramienta confiable para realizar análisis hidráulicos, como modificaciones en tuberías, instalación de válvulas reguladoras de presión, entre otros ajustes, garantizando así la calidad y continuidad del servicio. Sin embargo, el modelo generado por EPANET no es capaz de prever los golpes de ariete.

La red actual del acueducto Piedras Blancas no cumple con los parámetros establecidos en la normativa 0330/2017, que define límites de presión máxima y mínima. Estas presiones son ampliamente superadas debido a la topografía irregular y quebrada de la zona, lo que dificulta mantenerlas dentro de los rangos adecuados. Además, la red fue diseñada antes de la implementación de esta normativa, por lo que no está obligada a cumplir estrictamente con sus

---

requisitos. A pesar de ello, es fundamental que las futuras ampliaciones y optimizaciones de la red se ajusten a los valores de presión definidos por la normativa para garantizar un servicio eficiente y alineado con los estándares actuales. El incumplimiento, especialmente en el caso de presiones elevadas, incrementa significativamente el riesgo de fugas y rupturas en las tuberías, afectando con mayor frecuencia a materiales antiguos o instalaciones deficientes. Por otro lado, las altas presiones también pueden generar daños en los sistemas internos de distribución en los hogares, como calentadores de agua, grifos y lavadoras, reduciendo su vida útil e incrementando el riesgo de fallos. Para mitigar estos problemas, la instalación de válvulas reguladoras de presión en las viviendas cercanas a la Universidad Nacional, la vereda Mazo y la parte baja de la vereda Piedras Blancas se presenta como una solución temporal.

La red de distribución de Piedras Blancas no cumple con la velocidad mínima requerida para prevenir puntos muertos y reducir la probabilidad de formación de biofilm. Tampoco alcanza la velocidad de lavado recomendada, que es de al menos 1.8 m/s. En las áreas identificadas con bajas velocidades, se recomienda implementar un plan de mantenimiento continuo, incluyendo inspecciones periódicas y la apertura de válvulas de purga cada seis meses, de manera sectorizada y preferiblemente durante la noche para minimizar las interrupciones en las actividades diarias de los usuarios. Adicionalmente, se sugiere utilizar los hidrantes del acueducto cada seis meses como parte de este mantenimiento y realizar una limpieza anual de las tuberías con hipoclorito de sodio. Estas acciones contribuirán a poner en circulación el agua en las zonas afectadas, reduciendo significativamente la formación de biofilm y mejorando la calidad del sistema de distribución al evitar la contaminación del agua.

Los resultados de las simulaciones realizadas en este trabajo muestran que la red de distribución del acueducto Piedras Blancas no soportará la demanda futura, incluso sin realizar interconexiones de nuevos sistemas como se está pensando en la actualidad, las zonas mostradas en la ilustración 16 seguirán siendo vulnerables a caídas de presión, a menos que se realicen las mejoras y actualizaciones en la infraestructura como cambios en los diámetros de las tuberías. Así mismo, la planificación de futuros proyectos de expansión y actualización deberán considerar las presiones de diseño bajo escenarios de demanda creciente, asegurando un suministro adecuado en toda la red.

La conexión entre Piedras Blancas y Mazo, es técnicamente posible y viable siempre y cuando se realicen las optimizaciones de las tuberías con los diámetros sugeridos en el numeral



---

7.4.1 de la red matriz del acueducto Piedras Blancas y las opciones de almacenamiento presentadas en el numeral 7.5.3. Estos ajustes propuestos buscan mejorar la estabilidad de ambas redes y asegurar una distribución efectiva en todas las áreas. Es importante aclarar que este es un modelo tentativo; sin embargo, es recomendable realizar un análisis complementario que explore otras opciones viables desde el punto de vista económico que también garanticen la estabilidad del sistema.

Dado que la concesión de agua actual del acueducto Piedras Blancas es insuficiente para cubrir la demanda proyectada, será necesario que el acueducto en el transcurso de estos años presente una nueva solicitud de ampliación ante Corantioquia por un caudal de 20 L/s.

Para garantizar el suministro suficiente a la demanda futura se deberá ampliar la capacidad de almacenamiento de los tanques, por lo que se presentaron 2 posibles opciones, una con la planta funcionando las 24 horas y otra con la planta en suspensión durante 8 horas. A las cuales se les deberá realizar un análisis técnico – económico.

Después de evaluar las opciones de almacenamiento continuo y almacenamiento con pausa nocturna, se concluye que la opción con pausa nocturna puede representar un ahorro significativo en costos energéticos, aunque requiere una mayor inversión inicial. Esta opción se recomienda si se cuenta con financiamiento suficiente para la infraestructura adicional, dado que proporciona una solución más sostenible a largo plazo.

Las pérdidas de agua en el sistema han mostrado fluctuaciones considerables en los últimos años, indicando la necesidad de una intervención más estructurada y sostenida. Para mejorar la eficiencia del sistema, es imprescindible implementar monitoreo en tiempo real y optimizar las tuberías de acuerdo con los puntos de mayor pérdida identificados.

La interconexión entre los acueductos de Piedras Blancas y Mazo puede mejorar significativamente la capacidad de suministro en la zona. Sin embargo, para evitar problemas de presión y garantizar la calidad del servicio, se debe llevar a cabo una serie de mejoras en las tuberías principales y la instalación de válvulas reguladoras de presión estratégicamente distribuidas

---

## 9. RECOMENDACIONES.

Se recomienda hacer una revisión de los hoteles que están en el área de prestación de servicio del acueducto y de ser necesario revisar la posibilidad de hacer un cambio de usuario residencial a usuario comercial. Además de verificar si estos usuarios están suscritos al auspicio de mínimo vital y el subsidio del fondo de solidaridad y redistribución del ingreso. Ya que, podrían no cumplir con los criterios para recibir estas ayudas.

Se sugiere la implementación de una válvula reguladora de presión en la coordenada X, 839817.852 y coordenada Y, 1184912.211. Con una configuración de 10 m.c.a. como presión de salida, ya que esta ubicación es idónea para no alterar las presiones de otros tramos de la red, además, pese a la diferencia de cota que se presenta en esta zona, alcanza a disminuir las altas presiones presentadas en la cola de red mostrada en la ilustración 14.

Con el fin de evitar pérdidas grandes en el sistema se recomienda hacer optimizaciones en las presiones de la red evaluadas en el modelo hidráulico, como la instalación de válvulas reguladoras en los puntos de máximas presiones como el recomendado en el ítem 7.2.3. También podrían implementar sensores de flujo y presión con una RTU (la cual enviaría información en tiempo real) en puntos estratégicos como los mostrados en color rojo de las gráficas de presión que permitan detectar fugas de manera inmediata y reducir las pérdidas. Realizar mantenimiento preventivo semestralmente en las tuberías más antiguas o en caso de cambio, actualizarlas progresivamente y realizar una correcta sectorización.

Se simulon válvulas reguladoras de presión en distintos puntos de la zona donde se encuentra la sede de la Universidad Nacional la cual se presentan las mayores presiones; sin embargo, su implementación no es factible, ya que la presión debe mantenerse dentro de los rangos de presión mostrados por el modelo para no afectar el suministro en las áreas altas de la red, especialmente en las veredas Piedra Gorda y Barro Blanco. Por lo que se recomienda incorporar válvulas reguladoras de presión domiciliarias a los usuarios que estén conectadas en estas áreas para evitar rupturas en las redes domiciliarias. Otra opción es evaluar la alternativa de implementar un tanque intermedio elevado que haga disminuir las presiones en algunas zonas.

---

Se recomienda optimizar los tramos mostrados en la ilustración 20, una de las posibilidades es la de reemplazar estos tramos por tuberías PEAD RDE-11 de 10 y 8 pulgadas para garantizar la estabilidad y continuidad de la red de Piedras Blancas cuando se conecte el total de suscriptores de la red de distribución del acueducto Mazo.

Realizar un análisis de costos de las opciones presentadas en el numeral 7.5.3 permitirá identificar la alternativa más eficiente y sostenible, considerando múltiples factores clave. Este análisis debe incluir el costo inicial de inversión necesario para implementar cada opción, el costo operativo anual asociado a su funcionamiento, y la proyección de ahorro energético que se podría alcanzar a largo plazo. Además, es fundamental evaluar el impacto ambiental de cada alternativa, considerando aspectos como la huella de carbono y los efectos en los recursos naturales y así determinar cuál es la opción más viable desde una perspectiva técnica, económica y ambiental.

Debido a la cantidad de agua que se debe tratar se recomienda realizar un análisis técnico-económico para la implementación de un segundo tren de tratamiento con una planta tradicional compacta que ayude a tratar el caudal faltante que permita realizar un tratamiento más eficiente y se pueda suplir la demanda futura de ambas redes.

Se recomienda desarrollar un plan a largo plazo que incluya la expansión de la red en base a la proyección de demanda creciente de las veredas de Mazo y Piedras Blancas. Este plan debería considerar diferentes escenarios de crecimiento demográfico y los posibles impactos climáticos que podrían afectar el suministro de agua en el futuro.

Se recomienda realizar un monitoreo continuo de la calidad del agua después de la interconexión de los sistemas de Piedras Blancas y Mazo, para asegurar que se cumplen los estándares de calidad exigidos por la normativa vigente. Esto garantizará que la fusión de ambos sistemas no genere problemas adicionales relacionados con la calidad del agua suministrada.

---

## 10. REFERENCIAS.

Distrito de Medellín. [Distrito de Medellín Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación]. (2024). Acta de bienes con inventario de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Corporación de Acueducto Piedras Blancas. En *NAS*.

Distrito de Medellín. [Distrito de Medellín Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación]. (2024). Acta de bienes con inventario de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Corporación de Acueducto Mazo. En *NAS*.

*Corregimiento Santa Elena de Medellín*. (2024, 25 septiembre). Distrito de Medellín. <https://www.medellin.gov.co/es/corregimientos/gerencia/santa-elena/>

Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres [DAGR]. (2015). Plan municipal de la gestión de riesgos de desastres de Medellín 2015 -2030. En *Alcaldía de Medellín*. Recuperado 30 de octubre de 2024, de <https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/GestionRiesgo/Publicaciones/Shared%20Content/Documentos/2017/sintesisPMGRD.pdf>

EPANET | US EPA. (2024, 8 mayo). US EPA. <https://www.epa.gov/water-research/epanet>

Erdei-Tombor, P., Kiskó, G., & Taczman-Brückner, A. (2024). Biofilm Formation in Water Distribution Systems. *Processes*, 12(2), 280. <https://doi.org/10.3390/pr12020280>

Gómez, A., Ramírez, P., & Martínez, L. (2020). Negative Pressure Management in Water Distribution Networks. *Water Research Journal*, 54(2), 567–575.

López, J., Herrera, C., & Aguilar, E. (2019). Pressure Distribution and Demand Projection in Urban Water Supply Systems. *International Journal of Water Resources*, 18(4), 333-348.

Maria, N. V. L., Juliana, O. S., Maria, P. F. L., & Camilo, Z. W. (2002). *Interconexión de los acueductos: Multiveredal Santa Elena, Multiveredal Plan-Llano, Las Flores y Mazo*. Repositorio Institucional Universidad Eia. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/5324>

Ministerio de Desarrollo Económico, Universidad de los Andes (2000). Planeamiento y diseño hidráulico de redes de distribución de agua potable. Guía 003 RAS-98.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico. (2010). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - RAS (2.a ed.). <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulob-030714.pdf>

Monsef, H., Naghashzadegan, M., Farmani, R., & Jamali, A. (2018). Pressure management in water distribution systems in order to reduce energy consumption and background leakage. *Journal Of Water Supply Research And Technology—AQUA*, 67(4), 397-403. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.002>

---

*Perdidas por Fricción en Tuberías – Fesmex.* (s. f.).  
<https://www.fesmex.com.mx/article/perdidas-por-friccion-en-tuberias/>

Plan de Desarrollo Local Corregimiento de Santa Elena. (2015). En *Alcaldía de Medellín*. Recuperado 8 de agosto de 2024, de [https://www.medellin.gov.co/ndesarrollo/wp-content/uploads/Archivos\\_ND/CD\\_PDLs/CORREGIMIENTO\\_90/PDL/COMUNA%2090%20SANTA%20ELENA.pdf](https://www.medellin.gov.co/ndesarrollo/wp-content/uploads/Archivos_ND/CD_PDLs/CORREGIMIENTO_90/PDL/COMUNA%2090%20SANTA%20ELENA.pdf)

Tian, Y., Gao, J., Chen, J., Xie, J., Que, Q., Munthali, R. M., & Zhang, T. (2023b). Optimization of Pressure Management in Water Distribution Systems Based on Pressure-Reducing Valve Control: Evaluation and Case Study. *Sustainability*, 15(14), 11086. <https://doi.org/10.3390/su151411086>

Ravi, S. C., Renganathan, N. T., Perumal, S., & Paez, D. (2019). Analysis of water distribution network under pressure-deficient conditions through emitter setting. *Drinking Water Engineering And Science*, 12(1), 1-13. <https://doi.org/10.5194/dwes-12-1-2019>

Resolución 0330 - 2017 | MinVivienda. (2017). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>

SCHAUM, R. V. G., Evett, J. B., & Liu, C. (2005). *Mecánica de los fluidos e Hidráulica*. Editorial McGraw–Hill/Interamericana de España, Madrid.

Tavakoli, R., Golkar Hmzeie Yazd, H. R., & Tavoos, M. (2015). PRESSURE MANAGEMENT TO REDUCE LEAKS IN WATER SUPPLY NETWORKS. *Indian Journal Of Fundamental And Applied Life Sciences*, 5, 795-802. <https://www.cibtech.org/sp.ed/jls/2015/04/101-JLS-S4-031-REZA-PRESSURE-CORRECTED.pdf>

Tian, Y., Gao, J., Chen, J., Xie, J., Que, Q., Munthali, R. M., & Zhang, T. (2023). Optimization of Pressure Management in Water Distribution Systems Based on Pressure-Reducing Valve Control: Evaluation and Case Study. *Sustainability*, 15(14), 11086. <https://doi.org/10.3390/su151411086>

Zúñiga Rodríguez, M. G. (2019). Análisis y diagnóstico de la red del sistema de agua potable de la cabecera cantonal del cantón guano, provincia de chimborazo, Ecuador. [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de València]. <https://m.riunet.upv.es/handle/10251/118836>

---

## ANEXOS

SE ADJUNTAN LOS ANEXOS EN EL SIGUIENTE QR.



- ANEXO 1 – PROYECCIONES PIEDRAS BLANCAS.
- ANEXO 2 – PROYECCIONES MAZO.
- ANEXO 3 – CONSUMOS PIEDRAS BLANCAS.
- ANEXO 4 – CONSUMOS MAZO.
- ANEXO 5 - ANALISIS ALMACENAMIENTO.
- ANEXO 6- VELOCIDADES Y PRESIONES.

### MODELACIONES HIDRÁULICAS:

- MAZO A 25 AÑOS.
- MODELO PIEDRAS BLANCAS – MAZO A 25 AÑOS.
- MODELO PIEDRAS BLANCAS A 25 AÑOS.
- MODELO PIEDRAS BLANCAS RED EXISTENTE.