

**EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DEL  
MUNICIPIO DE GUATAQUÍ, CUNDINAMARCA**

**CARLOS ESTEBAN SÁNCHEZ MEDINA  
NICOL TATIANA SÁNCHEZ ÁLVAREZ**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
SECCIONAL DEL ALTO MAGDALENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
GIRARDOT – CUNDINAMARCA  
2025**

**EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DEL  
MUNICIPIO DE GUATAQUÍ, CUNDINAMARCA**

**CARLOS ESTEBAN SÁNCHEZ MEDINA**  
carlos-sanchez7@upc.edu.co  
**NICOL TATIANA SÁNCHEZ ÁLVAREZ**  
nicol-sanchez2@upc.edu.co

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título profesional de  
Ingeniería Civil**

**Asesor**  
**JESÚS FLAMINIO OSPITIA PRADA**  
Esp. en Gerencia Integral de Obras  
Mgtr. en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos  
jesus-ospitia@unipiloto.edu.co

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA**  
**SECCIONAL DEL ALTO MAGDALENA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**GIRARDOT – CUNDINAMARCA**  
**2025**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

Jurado

## **DEDICATORIA**

Dedicamos este proyecto a Dios, por brindarnos la fuerza, la salud y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de nuestras vidas; A nuestras familias, por ser nuestro motor, por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante durante todos estos años de formación académica, su ejemplo y motivación fueron clave para no rendirnos en los momentos difíciles; A nuestros amigos, que con su compañía, consejos y palabras de aliento nos acompañaron en esta travesía, y en especial, a nosotros mismos, por haber mantenido viva la llama de la perseverancia, por no rendirnos ante las adversidades, por la dedicación con la que enfrentamos cada reto, y por el compromiso inquebrantable que demostramos en cada paso del camino hacia la culminación de este sueño.

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este proyecto de grado.

A nuestro asesor, Jesús Flaminio Ospitia Prada, por su constante acompañamiento, su invaluable guía y dedicación, así como por sus acertados aportes técnicos y académicos, que no solo enriquecieron este proyecto, sino que también contribuyeron significativamente a nuestro crecimiento profesional y personal.

A la Universidad Piloto de Colombia – Seccional del Alto Magdalena, por brindarnos la oportunidad de formarnos profesionalmente, así como los recursos y herramientas necesarios para el desarrollo de este proyecto.

A las oficinas del municipio de Guataquí, por la colaboración y disposición en la entrega de información clave para el desarrollo del proyecto.

A nuestras familias, por ser nuestro apoyo emocional, por su comprensión inquebrantable y por creer en nosotros incluso cuando dudamos.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron en este proceso. Muchas gracias.

## CONTENIDO

|                                              | Pág. |
|----------------------------------------------|------|
| DEDICATORIA                                  | 4    |
| AGRADECIMIENTOS                              | 5    |
| RESUMEN                                      | 12   |
| ABSTRACT                                     | 13   |
| INTRODUCCION                                 | 14   |
| 1. DEFINICION DEL PROBLEMA                   | 15   |
| 1.1 FORMULACION DEL PROBLEMA                 | 15   |
| 2. JUSTIFICACION                             | 16   |
| 3. OBJETIVOS                                 | 17   |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL                         | 17   |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS                    | 17   |
| 4. MARCO REFERENCIAL                         | 18   |
| 4.1 ANTECEDENTES                             | 18   |
| 4.2 MARCO TEORICO                            | 19   |
| 4.2.1 Principios de la hidráulica.           | 19   |
| 4.2.2 Acueductos.                            | 20   |
| 4.2.3 Sistema de acueducto.                  | 20   |
| 4.2.4 Elementos del sistema de acueducto.    | 21   |
| 4.2.5 Redes de Distribución.                 | 22   |
| 4.2.6 Tipos de redes de distribución.        | 23   |
| 4.2.7 Componentes de la red de distribución. | 23   |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.8 Métodos y técnicas para simular redes hidráulicas.                      | 23 |
| 4.2.9 EPANET.                                                                 | 24 |
| 4.2.10 Gestión de redes hidráulicas urbanas.                                  | 24 |
| 4.2.11 Modelación y Calibración Hidráulica Avanzada.                          | 26 |
| 4.2.12 Normas internacionales de diseño y operación de redes de agua potable. | 27 |
| 4.3 MARCO CONCEPTUAL                                                          | 28 |
| 4.4 MARCO LEGAL                                                               | 30 |
| 4.5 MARCO GEOGRAFICO                                                          | 32 |
| 4.6 MARCO DEMOGRAFICO                                                         | 33 |
| 5. DELIMITACIÓN                                                               | 35 |
| 6. METODOLOGÍA                                                                | 36 |
| 6.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN                                                     | 36 |
| 6.2 TIPO DE ESTUDIO                                                           | 36 |
| 6.3 MÉTODO                                                                    | 36 |
| 6.4 FASES DE LA INVESTIGACIÓN                                                 | 37 |
| 6.4.1 Fase 1: planificación y recopilación de información.                    | 37 |
| 6.4.2 Fase 2: diagnóstico y evaluación hidráulica.                            | 37 |
| 6.4.3 Fase 3: propuesta de optimización y análisis de resultados.             | 38 |
| 7. RECURSOS                                                                   | 39 |
| 7.1 HUMANO                                                                    | 39 |
| 7.2 MATERIAL                                                                  | 39 |
| 8. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN                                             | 40 |
| 8.1 PRIMERA FASE, PLANIFICACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN                  | 40 |

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.1.1 Descripción del sistema de acueducto actual.                                                           | 40 |
| 8.1.2 Bocatoma.                                                                                              | 40 |
| 8.1.3 Sistema de aducción.                                                                                   | 42 |
| 8.1.4 Almacenamiento.                                                                                        | 43 |
| 8.1.5 Sistema de distribución.                                                                               | 43 |
| 8.2 SEGUNDA FASE, DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN HIDRÁULICA                                                        | 47 |
| 8.2.1 Indicadores de desempeño hidráulico                                                                    | 47 |
| 8.2.2 Condiciones operativas del sistema de distribución según las Resoluciones 0799 de 2021 y 0330 de 2017. | 47 |
| 8.2.3 Parámetros de modelación.                                                                              | 48 |
| 8.2.4 Modelado en EPANET.                                                                                    | 54 |
| 8.2.5 Simulación y análisis de la red actual.                                                                | 60 |
| 8.2.6 Diagnóstico de la red existente.                                                                       | 65 |
| 8.3 TERCERA FASE, PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS                                         | 66 |
| 8.3.1 Propuesta de optimización basado en el modelo digital.                                                 | 66 |
| 8.3.2 Análisis de resultados.                                                                                | 71 |
| 9. CONCLUSIONES                                                                                              | 74 |
| 10. RECOMENDACIONES                                                                                          | 75 |
| BIBLIOGRAFÍA                                                                                                 | 76 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                      | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Normativa aplicable para la gestión del agua y saneamiento. | 31   |
| Tabla 2. Comparativos poblacionales                                  | 34   |
| Tabla 3. Recurso material                                            | 39   |
| Tabla 4. Capacidad tanque de almacenamiento                          | 43   |
| Tabla 5. Tubería existente en le red de distribución.                | 44   |
| Tabla 6. Nivel de complejidad del sistema.                           | 48   |
| Tabla 7. Dotación máxima.                                            | 49   |
| Tabla 8. Resumen parámetros de simulación.                           | 51   |
| Tabla 9. Resumen del cálculo de demandas.                            | 51   |
| Tabla 10. Catálogo de tuberías RDE 21 PAVCO PVC.                     | 60   |
| Tabla 11. Tuberías a optimizar.                                      | 67   |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                          | Pág. |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Localización municipio de Guataquí en Colombia.                | 33   |
| Figura 2. Fases de la metodología                                        | 37   |
| Figura 3. Bocatoma.                                                      | 41   |
| Figura 4. Fuga en la línea primera línea de aducción                     | 42   |
| Figura 5. Línea de aducción.                                             | 43   |
| Figura 6. Red de acueducto                                               | 44   |
| Figura 7. Red matriz existente                                           | 45   |
| Figura 8. Sectorización actual                                           | 46   |
| Figura 9. Curvas de nivel                                                | 55   |
| Figura 10. Superficie con curvas de nivel.                               | 56   |
| Figura 11. Red con cotas asignadas.                                      | 57   |
| Figura 12. Importación de red del municipio en EpaCAD                    | 58   |
| Figura 13. Red importada con sus respectivas cotas y mapa de referencia. | 59   |
| Figura 14. Simulación red de distribución actual.                        | 61   |
| Figura 15. Cambios realizados a la RDAP                                  | 67   |
| Figura 16. Sectorización.                                                | 69   |
| Figura 17. Esquema localización válvulas TCV.                            | 70   |
| Figura 18. Esquema localización válvulas PBV                             | 71   |
| Figura 15. Red de distribución actual.                                   | 73   |
| Figura 16. Red de distribución optimizada                                | 73   |

## LISTA DE GRÁFICAS

|                                                                                               | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Gráfica 1. Análisis estático – Presiones a las 00:00 horas.                                   | 62   |
| Gráfica 2. Análisis dinámico – Presiones a las 8:00:00 A.M.                                   | 63   |
| Gráfica 3. Análisis dinámico – Presiones a las 10:00:00 A.M.                                  | 63   |
| Gráfica 4. Análisis dinámico – Presiones a las 11:00:00 A.M.                                  | 64   |
| Gráfica 5. Análisis dinámico – Presiones a las 12:00:00 P.M.                                  | 64   |
| Gráfica 6. Análisis dinámico – Presiones a las 01:00:00 P.M.                                  | 65   |
| Gráfica 7. Comparación red existente y red con modificaciones – Presiones a las 10:00:00 A.M. | 72   |

## RESUMEN

El presente trabajo realiza una evaluación hidráulica de la red de distribución de agua potable del municipio de Guataquí, Cundinamarca, con el objetivo de identificar y optimizar los factores que afectan su funcionamiento. Se llevó a cabo un diagnóstico técnico de la red existente, empleando modelación hidráulica mediante el software EPANET, para simular las condiciones actuales de presión, caudal y eficiencia. Se detectaron fluctuaciones de presión y pérdidas significativas debido a fugas, deficiencias en la sectorización y antigüedad de las tuberías. Con base en estos hallazgos, se propusieron estrategias de optimización de la infraestructura hidráulica, enfocadas en mejorar el desempeño operativo, reducir las pérdidas de agua y garantizar un suministro continuo y de calidad. Este estudio contribuye al fortalecimiento de la gestión del recurso hídrico en Guataquí, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con el acceso universal al agua potable.

**Palabras clave:** Red de distribución, Evaluación hidráulica, EPANET, Agua potable, Guataquí.

## ABSTRACT

This work presents a hydraulic evaluation of the potable water distribution network of Guataquí, Cundinamarca, aiming to identify and optimize the factors affecting its performance. A technical diagnosis of the existing network was conducted using hydraulic modeling through EPANET software to simulate current pressure, flow, and efficiency conditions. Pressure fluctuations and significant losses due to leaks, deficiencies in sectorization, and pipeline aging were detected. Based on these findings, optimization strategies for the hydraulic infrastructure were proposed to improve operational performance, reduce water losses, and ensure a continuous and high-quality water supply. This study supports the strengthening of water resource management in Guataquí, aligning with the Sustainable Development Goals related to universal access to potable water.

**Keywords:** Distribution network, Hydraulic evaluation, EPANET, Potable water, Guataquí.

## INTRODUCCION

El abastecimiento de agua es necesario para la existencia de los seres vivos y el desarrollo de la actividad económica. La provisión de agua ha sido un asunto relevante a lo largo de la historia, en la actualidad es tema de interés para autoridades, quienes tienen el deber de suministrar un adecuado servicio de agua. Organismos como la FAO, la OMS/OPS y entidades gubernamentales del país como el IDEAM y el DNP consideran el recurso hídrico como el recurso de mayor interés y confirman que el suministro de agua potable y saneamiento básico mejora significativamente la salud y la calidad de vida de las poblaciones (OPS/OMS, s.f)

Por otro lado, el proceso de distribución de agua potable juega un papel determinante en la garantía de un agua para consumo humano, ya que, a pesar de haber sido tratada, en la red de distribución pueden ocasionarse problemas asociados fundamentalmente a la falta de presión o al tratamiento deficiente del agua. La insuficiencia de presión en la red de distribución no garantiza un cambio eficiente en el agua almacenada en los tanques elevados de la población, no permite reparar los daños que se presentan en la red favoreciendo la entrada de contaminantes externos, no permite la operación adecuada de los hidrantes, y no permite suministrar la cantidad necesaria en todos los puntos del sistema de abastecimiento. Además, la falta de presión en la red produce incomodidades a los usuarios ya que traen como consecuencia la ocurrencia de cortes en el suministro de agua. Además, un tratamiento deficiente del agua puede generar contaminación, incrementando el riesgo de enfermedades de transmisión hídrica, especialmente por la presencia de materia orgánica en exceso e incrementar el riesgo de otros efectos en la salud de la población debido a la presencia de sustancias químicas que se encuentren en el cuerpo receptor.

Guataquí es un municipio que posea una población proyectada para el 2024 de 3,440 personas, compuestas por 1,655 mujeres (48.3%) y 1,785 hombres (51.7%), según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) basado en el censo general del 2005, donde existe la necesidad de enfrentar desafíos en la gestión de su red de distribución de agua, en pro de garantizar el servicio de agua potable sin interrupción o variaciones en las condiciones hidráulicas las veinticuatro (24) horas del día. Un análisis de la demanda actual es esencial para asegurar un suministro de agua confiable y eficiente, capaz de satisfacer las necesidades presentes. Este documento se enfoca en evaluar las características de la red de distribución de agua de Guataquí, identificando puntos críticos y oportunidades de mejora para optimizar su funcionamiento.

## **1. DEFINICION DEL PROBLEMA**

El municipio de Guataquí, enfrenta un problema persistente en su red de agua potable, caracterizado por variaciones en las presiones a lo largo del ciclo de demanda, entre los barrios más afectados se encuentra la parte alta de Santa Bárbara, en su punto más alejado de la red del municipio. Además, se han identificado fugas en varios puntos de la red de distribución, especialmente en las tuberías ubicadas en los barrios centro y plazuela.

La combinación de fluctuaciones de presión y fugas en la red de agua potable está ocasionando serias afectaciones para los habitantes del municipio. La resolución del problema es urgente para evitar una crisis mayor que afecta la calidad de vida de los habitantes y la sostenibilidad del servicio de agua potable.

Adicionalmente, estas problemáticas generan descontento entre los habitantes, quienes perciben una falta de atención por parte de las autoridades locales. La confianza en la gestión pública se ve erosionada, lo que dificulta la implementación de soluciones efectivas y sostenibles para mejorar el servicio.

### **1.1 FORMULACION DEL PROBLEMA**

¿De qué manera se puede realizar un análisis integral de la red de distribución de agua potable en el municipio de Guataquí, Cundinamarca, a través de una evaluación hidráulica y un diagnóstico del sistema, con el objetivo de identificar y optimizar los factores responsables de las fluctuaciones altas de presiones y fugas, asegurando un suministro más eficiente?

## **2. JUSTIFICACION**

La evaluación hidráulica y diagnóstico de la red de agua potable en el Municipio de Guataquí, es fundamental para abordar los desafíos relacionados con el suministro de agua en el ámbito local. En un contexto donde las fugas, la falta de mantenimiento y distribución desigual de presión sumado al crecimiento poblacional están afectando la eficiencia y equidad del servicio.

Dentro del plan de desarrollo del municipio de Guataquí, es trascendental contar con una red de acueducto que suministre agua potable a la comunidad en cantidad adecuada y con presiones aceptables para darle continuidad a los procesos vitales del territorio. Teniendo en cuenta que el agua es crucial para todas las necesidades humanas, como la alimentación, la salud, la energía y el alojamiento. La gestión adecuada de este recurso es el desafío más urgente relacionado con la naturaleza.

La disponibilidad de agua es esencial para la existencia de la sociedad, el desarrollo económico, la preservación cultural y la vida misma. Aunque el agua es un tema complejo debido a sus múltiples usos, los problemas y soluciones suelen ser locales, a pesar de sus implicaciones globales (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2010).

En este contexto, el proyecto también responde a la meta 6.4 del ODS 6, que busca para el año 2030 Incrementar de manera significativa la utilización adecuada de los recursos hídricos en todos los sectores, garantizando la sostenibilidad en la captación y suministro de agua potable para hacerle frente a la escasez y disminuir notablemente la cantidad de personas que padecen la falta de este recurso (Naciones Unidas, 2022)

Este análisis busca identificar y comprender las necesidades actuales y futuras de la red de distribución de agua, permitiendo así la planificación de mejoras que optimicen la eficiencia del sistema, aseguren un suministro continuo y de calidad, y reduzcan los riesgos asociados a la mala gestión del recurso hídrico.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la red de distribución de agua potable en el municipio de Guataquí, a través de una evaluación hidráulica y un diagnóstico del sistema.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- ❖ Analizar información clave, incluyendo parámetros operativos y características técnicas, para desarrollar una evaluación hidráulica del sistema de distribución.
- ❖ Evaluar la demanda actual para determinar las necesidades de servicio que la red de distribución debe satisfacer.
- ❖ Desarrollar un modelo hidráulico utilizando software EPANET, basado en los análisis realizados, para proponer un escenario que ofrezca una solución óptima para la red del municipio.

## **4. MARCO REFERENCIAL**

### **4.1 ANTECEDENTES**

En el contexto local, no se han identificado investigaciones previas que aborden de manera directa el tema objeto de nuestra investigación. A pesar de esta ausencia de estudios específicos, existen antecedentes relevantes que proporcionan una base teórica y conceptual sobre el tema, que resultan útiles para el desarrollo de la presente investigación. A continuación, se exponen los trabajos más destacados en este campo.

En un estudio previo, (Rios & Rodriguez, 2016) llevó a cabo un estudio denominado “Diagnóstico de la planta de agua potable del municipio de Guataquí Cundinamarca” con el fin de diagnosticar la PTAP en el área urbana del municipio de Guataquí, Cundinamarca, se realizó una evaluación integral de sus procesos, desde la captación hasta la distribución final. Se examinó la eficiencia, la calidad del agua, los factores internos y externos, así como la condición estructural del sistema. Para establecer la capacidad y los parámetros operativos vigentes, se calculó un promedio de la proyección de población, teniendo en cuenta el nivel de complejidad y las características demográficas. Esta evaluación se apoyó en el RAS 2000, la normativa aplicable vigente y datos suministrados por la dependencia de servicios públicos. Una vez establecidos estos parámetros, se procedió a realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de las diferentes unidades mediante un estudio de caso, para finalmente plasmar un diagnóstico detallado.

Dentro de lo diagnosticado en el estudio ya mencionado, se determinó que a la fecha en la que se llevó a cabo el estudio, sin embargo, persiste la incertidumbre sobre la calidad del agua captada para el abastecimiento de la planta de tratamiento de agua potable en Guataquí. y no se tiene claridad sobre la evaluación funcional de la PTAP Guataquí, Cundinamarca, que ya llevaba a la fecha de hoy un tiempo de operación de alrededor de 38 años. También, alude que para optimizar el desempeño de la planta de tratamiento de agua potable y asegurar la calidad del agua que reciben los habitantes del municipio, es imprescindible llevar a cabo la reestructuración de algunas unidades debido al deterioro que han sufrido por haber sido utilizadas más allá de su vida útil de diseño y por la falta de mantenimiento preventivo y correctivo. Esta situación ha provocado una ineficiencia en el tratamiento del agua, resultando en una calidad del agua mediocre y un aumento en los costos operativos (Rios & Rodriguez, 2016).

El municipio de Guataquí, localizado en el departamento de Cundinamarca, cuenta con una red de agua potable, durante los primeros años de operación la red cumplió de manera adecuada con las necesidades de la población. Sin embargo, con el paso del tiempo, la infraestructura ha mostrado signos de deterioro, principalmente debido a la falta de mantenimiento y actualización tecnológica. Este deterioro ha llevado a la aparición de problemas significativos, como fugas frecuentes, baja presión en algunos sectores y problemas en la calidad del agua suministrada a los usuarios.

En un contexto similar está el municipio de Anapoima, ubicado en el departamento de Cundinamarca, ha enfrentado desafíos significativos en su sistema de acueducto debido a la

degradación de la infraestructura y la insuficiencia de las fuentes hídricas disponibles. Inicialmente, el suministro de agua del municipio dependía del Río Bogotá, pero los altos niveles de contaminación han obligado a buscar alternativas. Actualmente, el municipio se abastece de dos fuentes principales: la Quebrada Honda y el proyecto de Mesa de Yeguas, las cuales, aunque aportan un caudal significativo, han mostrado ser insuficientes para satisfacer la demanda actual, especialmente durante los fines de semana y temporadas vacacionales, cuando la población flotante se incrementa considerablemente (Monsalve, Reyes, & Ruiz, 2017).

El estado actual del sistema revela problemas críticos como pérdidas significativas de caudal debido a conexiones fraudulentas y la inestabilidad del terreno, que afecta las tuberías de conducción. Además, el sistema de almacenamiento y distribución presenta deficiencias que impactan la continuidad y calidad del suministro de agua potable.

Este diagnóstico ha generado la necesidad urgente de optimizar el sistema de acueducto del municipio, a través de la evaluación de diversas alternativas técnicas y económicas que permitan asegurar un suministro constante y de calidad para toda la población, incluyendo la creciente demanda en los periodos de alta afluencia turística (Monsalve, Reyes, & Ruiz, 2017).

De manera similar, el sistema de acueducto urbano del municipio de Sampedo, Sucre, también ha enfrentado desafíos que han comprometido su capacidad de operar de manera eficiente. El sistema ha sido objeto de un diagnóstico técnico para evaluar su situación actual. Este diagnóstico se realizó con el fin de identificar las deficiencias existentes en la infraestructura del acueducto, así como en los procesos operativos de la empresa encargada de la prestación del servicio (EMPASAM). La necesidad de este proyecto surge de la preocupación por la disminución en la capacidad y eficiencia del sistema de acueducto debido a la falta de políticas de planeación adecuadas, deterioro de la infraestructura, y el crecimiento poblacional (Peralta, Ruiz, & hernandez, 2007).

Históricamente, el sistema de acueducto de Sampedo fue construido con una capacidad adecuada. Sin embargo, con el tiempo, la ausencia de un mantenimiento adecuado, junto con la falta de expansión oportuna, ha resultado en una disminución significativa de su eficiencia operativa. Adicionalmente, las malas condiciones físicas de la infraestructura, causadas por el vencimiento de su vida útil, han exacerbado la necesidad de intervenir y optimizar el sistema para restaurar su funcionalidad plena (Peralta, Ruiz, & hernandez, 2007).

## **4.2 MARCO TEORICO**

### **4.2.1 Principios de la hidráulica.**

La hidráulica es una disciplina de la física que se enfoca en analizar cómo se comportan los fluidos tanto cuando están en reposo como en movimiento. El teorema de Bernoulli, considerado uno de los principios esenciales de la hidráulica, señala que en un flujo permanente la energía total —compuesta por la cinética, la potencial y la de presión— permanece constante a lo largo de una corriente de fluido. Este principio es esencial para entender el funcionamiento de las redes de distribución.

El teorema de Bernoulli es una representación de la implementación del principio de conservación de la energía en el flujo de líquidos a través de una tubería. La energía total en cualquier punto situado arriba de un plano de referencia horizontal casual se calcula como la suma de la altura geométrica, la altura relacionada con la presión y la altura asociada a la velocidad del fluido. (Crane, 1989)

### Ecuación 1 Bernoulli

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A = h_R + h_L + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Fuente: Crane, 1989

Donde:

$P_1$  = Presión inicial

$P_2$  = Presión final

$\gamma$  = Peso específico

$Z_1$  = Altura punto 1

$Z_2$  = Altura punto 2

$h_A$  = Energía añadida a la bomba

$h_R$  = Perdidas por tuberías

$h_L$  = Perdidas por accesorios

$V_1$  = Velocidad inicial

$V_2$  = Velocidad final

$g$  = Aceleración por gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

### 4.2.2 Acueductos.

El agua potable desempeña un papel fundamental en la salud pública, el desarrollo económico y el bienestar social de las comunidades. Su disponibilidad y calidad son determinantes clave para garantizar una vida digna y saludable. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el acceso a agua potable segura no solo es un recurso esencial, sino también un derecho humano básico que debe estar garantizado para toda la población sin distinción. La calidad del agua que consumen las personas incide de manera directa en los niveles de morbilidad y mortalidad, ya que la ingestión de agua contaminada puede derivar en la aparición de enfermedades gastrointestinales, como diarreas, cólera, fiebre tifoidea y disentería, entre otras. Estos problemas de salud afectan especialmente a las poblaciones más vulnerables, como los niños, los adultos mayores y las personas con sistemas inmunológicos debilitados. Por esta razón, asegurar un suministro de agua potable de calidad es una prioridad en las políticas de salud pública y desarrollo sostenible a nivel mundial.

### 4.2.3 Sistema de acueducto.

Un acueducto es una infraestructura hidráulica esencial cuyo propósito principal es transportar agua desde su fuente de origen —ya sea superficial o subterránea— hasta los centros de

consumo, como hogares, instituciones, industrias y zonas agrícolas. Esta red permite garantizar el acceso continuo y confiable al recurso hídrico por parte de las comunidades, promoviendo así la salud, el desarrollo y la calidad de vida. La forma, el diseño y la complejidad de los acueductos pueden variar significativamente en función de diversos factores, como la distancia entre la fuente de agua y los usuarios finales, las características topográficas del terreno, la disponibilidad de recursos financieros y tecnológicos, así como las condiciones climáticas de la región. Para garantizar un funcionamiento adecuado, un sistema de acueducto debe estar conformado por diversos componentes que operan de manera integrada, tales como estructuras de captación, unidades de tratamiento, estaciones de bombeo, depósitos de almacenamiento y redes destinadas al transporte y distribución del agua, así como válvulas, hidrantes y otros dispositivos de control. Cada uno de estos elementos debe ser cuidadosamente diseñado, operado y mantenido para garantizar la eficiencia del sistema, evitar pérdidas, preservar la calidad del agua y asegurar su disponibilidad en todo momento. (Romero, 2005).

#### 4.2.4 Elementos del sistema de acueducto.

Los sistemas de acueductos se conforman de la siguiente manera:

❖ **Cuenca:** Es un área geográfica donde el agua fluye a través de drenajes hacia un punto de salida principal, conocido como nacimiento o desagüe. Cuando este desagüe o río se conecta con cuerpos de agua más grandes, como lagos, ríos mayores, ciénagas o el mar, se le denomina cuenca. La cantidad de agua en una microcuenca depende de la vegetación presente y del estado de conservación de los suelos, siendo esencial para garantizar el suministro de agua en los hogares. La microcuenca es el área ideal para organizar la utilización y gestión de los recursos naturales, promoviendo la sustentabilidad de los procesos de fabricación y contribuyendo a la protección nutricional a través de los alimentos. Es en este espacio donde se observan las interrelaciones más significativas entre la gestión y aprovechamiento de los recursos naturales y su impacto en el entorno. Ningún otro ámbito de acción, como un municipio, finca, acueducto o sector, muestra una relación tan directa y evidente (Ortiz & Manzuera, 2014).

❖ **Captación:** Está compuesta por estructuras que permiten la captación controlada del agua desde la fuente, que pueden incluir una presa de embalse con compuertas de desbordamiento, amortiguadores de energía y una infraestructura de evacuación de aguas, o sencillamente captan el agua directamente de un cuerpo de agua (Ortiz & Manzuera, 2014).

❖ **Aducción:** Es el proceso responsable de transportar el agua sin tratar, ya sea de origen superficial o subterráneo, desde el punto de extracción hasta el desarenador, utilizando presión o flujo libre. Se trata de un sistema lineal el cual integra instalaciones de pretratamiento y sistemas de bombeo. El agua se transporta mediante canales de libre flujo, túneles a presión, tuberías o integraciones de estos (Ortiz & Manzuera, 2014).

❖ **Desarenador:** Son estructuras que se colocan después de la captación de agua y tienen la función de eliminar partículas como arena, arcilla, grava fina y material orgánico del agua proveniente de fuentes superficiales. Su principal propósito es proteger la infraestructura y

equipos de conducción, evitando la erosión y el desgaste. Las partículas se sedimentan por gravedad, lo que se facilita con la reducción de la velocidad del agua en el tanque desarenador, disminuyendo así el riesgo de acumulación de materiales en el sistema (Albuja, Pinos, & Samaniego, 2013).

❖ **Planta de tratamiento:** Las plantas de tratamiento de agua potable son esenciales para la vida en el planeta, ya que transforman agua sin tratar con propiedades fisicoquímicas diversificadas en agua tratada segura para uso humano, cumpliendo con los parámetros de calidad. Estas PTAP son clave para prevenir enfermedades transmitidas por el agua, muchas de ellas mortales. El proceso de tratamiento incluye etapas como: aireación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, corrección de dureza, desinfección, cloración y almacenamiento en tanques, asegurando un agua de alta calidad para la salud pública (Araque, 2022).

❖ **Sistemas de distribución y conexiones domiciliarias:** Los sistemas de distribución de agua y las conexiones domiciliarias son componentes esenciales para garantizar el suministro continuo de agua potable segura a los consumidores. Estos sistemas comprenden una red compleja de tuberías, estaciones de bombeo, tanques de almacenamiento y diversos componentes de transporte que conectan las plantas de tratamiento de agua con los hogares, empresas e instalaciones industriales. La infraestructura incluye tanto tuberías de abastecimiento como de retorno, y se debe diseñar cuidadosamente para gestionar de manera eficiente la demanda de agua en diferentes áreas. El diseño y la operación de estos sistemas deben abordar múltiples aspectos para asegurar la eficacia y seguridad del suministro. Esto incluye la capacidad de las tuberías para soportar las presiones de operación, la resistencia a la corrosión y otros daños físicos, y la correcta localización de los tanques de almacenamiento para equilibrar la oferta y la demanda. Además, es fundamental considerar la protección contra incendios, ya que los sistemas de distribución de agua deben proporcionar suficiente caudal y presión para enfrentar emergencias de incendio. (ostfeld, 2014)

#### 4.2.5 Redes de Distribución.

Las redes de distribución son sistemas complejos compuestos por tuberías, válvulas y accesorios diseñados para llevar agua desde las fuentes hasta los consumidores. Los aspectos clave incluyen:

❖ **Diseño hidráulico:** Consideraciones sobre el diámetro de las tuberías, pendientes y materiales utilizados.

❖ **Zonificación:** Organización del sistema para garantizar un suministro equitativo y eficiente a diferentes áreas geográficas.

Los sistemas de distribución pueden enfrentar varios desafíos, tales como:

❖ **Fugas:** Pérdidas significativas que afectan tanto la disponibilidad como la calidad del agua.

❖ **Contaminación cruzada:** Riesgo asociado a conexiones inadecuadas o fallas en el sistema que permiten que aguas residuales ingresen a la red potable.

❖ **Obsolescencia:** Infraestructura envejecida que puede no cumplir con las demandas actuales.

#### 4.2.6 Tipos de redes de distribución.

❖ **Redes de distribución abiertas o ramificadas:** se distinguen por la presencia de una tubería principal de mayor diámetro, desde la cual se desprenden ramales que finalizan en puntos ciegos, es decir, sin conexión con otras tuberías dentro del sistema de distribución de agua potable. Este tipo de configuración es común en desarrollos urbanos cuya expansión se ha estructurado en torno a una vía principal, con calles sin salida que impiden la interconexión entre los ramales debido a restricciones topográficas, lo que dificulta la formación de circuitos cerrados (Tutoriales al Día – Ingeniería Civil, 2012).

❖ **Redes de distribución cerrada o mallada,** los ramales están interconectados, permitiendo la formación de circuitos dentro del sistema de distribución de agua potable. Esta configuración presenta una ventaja significativa en términos de eficiencia y continuidad del servicio, ya que, en caso de una falla o rotura en alguna tubería, el suministro puede redistribuirse a través de rutas alternas dentro de la malla, minimizando así el impacto en los usuarios afectados (Tutoriales al Día – Ingeniería Civil, 2012).

#### 4.2.7 Componentes de la red de distribución.

Una red de distribución de agua potable está formada principalmente por tuberías, que consisten en tubos de sección circular y sus sistemas de unión. Las tuberías conectan diversos puntos conocidos como nudos o uniones. La red se divide en dos partes: primaria y secundaria, según el tamaño y el diámetro de las tuberías. La red primaria se compone de los tubos de mayor diámetro, que transportan el agua desde el tanque de regulación, mientras que la red secundaria abarca las tuberías más pequeñas, distribuidas en la mayoría de las calles de la localidad. La clasificación entre red primaria y secundaria depende de las dimensiones y del alcance de la infraestructura.

#### 4.2.8 Métodos y técnicas para simular redes hidráulicas.

Existen diversos métodos y técnicas para simular redes hidráulicas que se basan en la resolución de ecuaciones hidráulicas fundamentales. A continuación, se describen algunos de los principales enfoques y técnicas utilizados para la simulación de redes hidráulicas:

❖ **Método de Hardy Cross:** Es un método iterativo para balancear caudales y presiones en redes cerradas. Aunque ha sido reemplazado en parte por métodos más modernos, sigue siendo una técnica fundamental para el análisis básico de redes hidráulicas (Sadiq, Rajani, & Kleiner, 2004).

❖ **Método de las Características (MOC):** El Método de las Características es ampliamente utilizado para la simulación de transitorios hidráulicos, como el golpe de ariete. Este enfoque transforma las ecuaciones diferenciales parciales del flujo transitorio en ecuaciones algebraicas a lo largo de líneas características, permitiendo así resolverlas de manera eficiente (Twyman, 2017).

❖ **Modelos Basados en EPANET:** es una de las herramientas más comunes para la simulación de redes hidráulicas. Utiliza un enfoque basado en la resolución iterativa de ecuaciones de continuidad y energía mediante el método de Newton-Raphson y puede simular tanto el comportamiento hidráulico como la calidad del agua en redes a lo largo del tiempo (Us Epa, 2014).

Estos métodos proporcionan una base sólida para el análisis y la simulación de redes hidráulicas, adaptándose a distintos contextos y necesidades según la complejidad de la red y los objetivos de la simulación.

#### **4.2.9 EPANET.**

Es un software de código abierto desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos. Es una herramienta comúnmente aplicada en la evaluación del desempeño de redes de distribución de agua potable. El programa permite realizar un análisis a lo largo del tiempo, evaluando el funcionamiento de la red de distribución de agua mediante capturas en diferentes momentos, las cuales luego se conectan para obtener una visión completa del sistema (Domingo, 2019).

Este software se rige por un conjunto de ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento hidráulico y de calidad del agua en los sistemas de distribución. Las ecuaciones principales son:

- ❖ Ecuación de continuidad
- ❖ Principio de Bernoulli
- ❖ Ecuación de pérdidas de Darcy - Weisbach.

#### **4.2.10 Gestión de redes hidráulicas urbanas.**

La gestión de redes hidráulicas urbanas constituye un componente esencial para garantizar la sostenibilidad y eficiencia en la distribución de agua potable en contextos urbanos. Esta gestión involucra procesos de planificación, operación, mantenimiento, monitoreo y renovación de la infraestructura hidráulica, todo ello dentro de un marco de eficiencia técnica, sostenibilidad ambiental y equidad social (Aguas residuales, 2024)

#### **4.2.10.1 Fundamentos de la gestión hidráulica urbana.**

Una red hidráulica urbana está compuesta por sistemas interconectados de tuberías, válvulas, tanques de almacenamiento, estaciones de bombeo y dispositivos de control, cuya función principal es transportar agua desde las fuentes de captación o plantas de tratamiento hasta los usuarios finales. El manejo adecuado de estas redes asegura no solo la continuidad y calidad del servicio, sino también la reducción de pérdidas de agua, la optimización del consumo de energía y la reducción de los efectos ambientales (Aguasresiduales.info, 2024).

En este contexto, las empresas operadoras de servicios públicos deben implementar estrategias integrales que combinen elementos técnicos, administrativos y sociales para alcanzar una operación sostenible. Estas acciones comprenden la programación de inversiones, la implementación de mantenimiento anticipado, la disminución del agua no registrada y el refuerzo de los marcos institucionales y regulatorios. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2025).

#### **4.2.10.2 Problemáticas actuales en la gestión de redes.**

Uno de los mayores desafíos en América Latina es la elevada cantidad de agua no contabilizada, que puede superar el 40% del volumen total generado, debido a fugas, conexiones clandestinas, errores en la medición y el desgaste de las infraestructuras (Aguas residuales, 2024).

Asimismo, fenómenos como el cambio climático, el crecimiento urbano descontrolado y la escasez de recursos hídricos agravan la presión sobre los sistemas existentes.

En Colombia, ciudades como Bogotá han enfrentado crisis hídricas recientes que han motivado llamados urgentes a fortalecer la planificación y gestión del recurso, implementando soluciones tanto tecnológicas como comunitarias

#### **4.2.10.3 Tecnologías aplicadas a la gestión moderna.**

La modernización de las redes hidráulicas urbanas ha sido impulsada por la digitalización y el uso de tecnologías emergentes. Entre estas destacan los sistemas SCADA para el monitoreo remoto, sensores para la detección de fugas, plataformas de modelación hidráulica como EPANET, y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la gestión espacial del sistema (Aguas residuales, 2024).

Estas herramientas permiten una toma de decisiones basada en datos, lo que incrementa la eficiencia operativa, reduce costos y mejora la capacidad de respuesta ante contingencias. Además, la implementación de redes inteligentes que permite gestionar los sistemas en tiempo real, adaptándose a la demanda y optimizando el uso del agua y la energía (Aguasresiduales.info, 2024).

#### **4.2.11 Modelación y Calibración Hidráulica Avanzada.**

La modelación y calibración de modelos hidráulicos son herramientas clave para la gestión de las redes de distribución de agua potable. A través de la simulación computacional, es posible predecir el comportamiento hidráulico del sistema bajo diferentes escenarios operativos. Sin embargo, para que un modelo hidráulico represente fielmente la realidad, es necesario un proceso riguroso de calibración utilizando datos reales obtenidos en campo.

##### **4.2.11.1 Principios de Calibración de Modelos Hidráulicos.**

La calibración de modelos hidráulicos consiste en ajustar los parámetros del modelo (como La calibración de modelos hidráulicos se basa en modificar los parámetros del modelo (como los coeficientes de rugosidad, las demandas en los nodos o las configuraciones de válvulas) para que los resultados obtenidos en la simulación (presiones, caudales, pérdidas de carga) correspondan con los valores medidos en el sistema real . Este proceso es iterativo y se basa en la comparación entre los datos simulados y las mediciones reales tomadas en puntos estratégicos de la red.

Según la metodología propuesta por (Díaz, Castañeda, 2023) para una correcta calibración se requiere una verificación de los datos topográficos, operacionales y de diseño, ya que los errores en estas fuentes pueden afectar directamente la exactitud del modelo hidráulico. Además, se destaca la necesidad de realizar múltiples simulaciones bajo condiciones variables para evaluar la robustez del modelo calibrado.

Asimismo, en un estudio desarrollado por (Gómez Zambrano, López Ríos, & Toro Botero, 2017) se propuso una nueva estrategia de calibración basada en regresión estadística, enfocada en modelos de canales curvos, logrando mejorar la precisión de las predicciones hidráulicas sin aumentar significativamente el tiempo de cálculo.

En síntesis, tanto la metodología de (Díaz, Castañeda, 2023) como la estrategia propuesta por (Gómez Zambrano, López Ríos, & Toro Botero, 2017) evidencian que la calidad y verificación de los datos, junto con el uso de técnicas de calibración adecuadas, son fundamentales para garantizar la precisión y confiabilidad de los modelos hidráulicos. La combinación de enfoques rigurosos y herramientas estadísticas permite optimizar los procesos de simulación sin comprometer la eficiencia computacional.

##### **4.2.11.2 Importancia de los Datos Reales en Campo.**

Los datos reales recolectados en el campo son fundamentales para una calibración precisa. Sin datos exactos sobre presiones en los nodos, flujos en las tuberías y patrones de consumo, cualquier modelo hidráulico estará expuesto a grandes incertidumbres. Por esta razón, se aconseja llevar a cabo campañas de medición periódicas y utilizar sensores correctamente calibrados.

El estudio de (Sánchez Tapiero, Peña Cortés, & Ramón Valencia, 2023) muestra cómo el uso de procesamiento digital de imágenes puede mejorar la captura de datos hidráulicos en entornos urbanos difíciles de instrumentar. Esta metodología ha sido aplicada con éxito en el análisis de redes de drenaje pluvial.

Adicionalmente, (Bonilla & Sanchez Tapiero, 2024) Resaltan la importancia de combinar imágenes satelitales y bases de datos obtenidas en campo para crear modelos hidráulicos precisos mediante QGIS y EPANET, lo que permite evaluar tanto el desempeño hidráulico como la calidad del agua en las redes de distribución.

La normativa técnica también respalda esta importancia. Según la AWWA (American water works association, 2023), para considerar aceptable una calibración, al menos el 85% de los puntos medidos deben coincidir con el modelo dentro de un margen de  $\pm 0.5$  m de presión o  $\pm 5\%$  del caudal esperado.

#### **4.2.12 Normas internacionales de diseño y operación de redes de agua potable.**

El diseño y operación de redes de agua potable requiere de la aplicación de normas técnicas y marcos regulatorios que garanticen la calidad del servicio, la eficiencia operativa y la sostenibilidad del recurso. A nivel internacional, diversas organizaciones han formulado lineamientos que sirven como referencia para la formulación de políticas públicas, el desarrollo de infraestructura y la mejora de los servicios. Entre las entidades de mayor influencia se destacan la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Internacional de Normalización (ISO) y el Banco Mundial.

##### **4.2.12.1 Aportes de la Organización Mundial de la Salud (OMS).**

La OMS ha sido un referente clave en el establecimiento de directrices para la calidad del agua potable, priorizando la protección de la salud pública. En 2024, publicó nuevas herramientas orientadas a mejorar los sistemas pequeños de abastecimiento, especialmente aquellos que operan en contextos rurales o con limitaciones técnicas y financieras. Estas guías tienen como propósito aumentar la resiliencia de estos sistemas frente a desafíos como el cambio climático, garantizar la inocuidad del agua y fortalecer las capacidades locales para la gestión eficiente del recurso (Organizacion mundial de la salud, 2024).

##### **4.2.12.2 Norma ISO 24510:2024.**

La norma ISO 24510:2024 establece directrices específicas para evaluar y mejorar la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento, con énfasis en las necesidades y expectativas de los usuarios. Esta norma promueve la participación ciudadana y la transparencia, al proponer indicadores de desempeño que permiten valorar la calidad del servicio desde la perspectiva del usuario. Además, define un lenguaje común entre prestadores de servicios, usuarios y autoridades regulatorias, facilitando procesos de mejora continua en la operación de las redes (Organización Internacional de Normalización, 2024).

### 4.3 MARCO CONCEPTUAL

❖ **Calidad de aguas:** De acuerdo con (Ramírez, 2021) en su libro “Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico”, determina que la calidad del agua no se define únicamente por la ausencia de contaminantes, sino que también abarca la presencia de propiedades que favorecen el equilibrio en los ecosistemas acuáticos. Esta calidad se determina mediante las características físicas, químicas y biológicas del agua, y se mide en función de estándares que varían según los diferentes usos, como la protección de la salud humana y la preservación ambiental.

❖ **Diagnóstico hidráulico:** según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017) es una evaluación técnica integral que examina el rendimiento de un sistema de distribución de agua, abarcando aspectos clave como los flujos, las presiones y las condiciones operativas de las tuberías y otros componentes. Este análisis permite detectar problemas como fugas, fluctuaciones en la presión o ineficiencias en la distribución, proporcionando información crítica para la planificación de mantenimientos preventivos y la optimización del sistema. Utilizando herramientas de modelado hidráulico y monitoreo en tiempo real, se garantiza que el sistema funcione de manera eficiente y sostenible, permitiendo también tomar decisiones informadas en proyectos de expansión o modernización.

❖ **Distribución:** Proceso mediante el cual el agua potable es transportada desde las fuentes hasta los usuarios finales a través de una red de tuberías.

❖ **Fugas:** pérdidas de agua que ocurren en la red de distribución, lo que puede incluir cualquier tipo de escape o filtración de agua a través de fisuras, uniones defectuosas o cualquier fallo en las tuberías que comprometa la integridad del sistema (RAS - Título B: Sistemas de acueducto, 2010).

❖ **Mantenimiento preventivo:** Actividades programadas para asegurar que la infraestructura del sistema hídrico funcione correctamente y minimizar fallas.

❖ **Válvula:** Dispositivo utilizado en sistemas hidráulicos para regular el flujo y la presión del agua en las tuberías.

❖ **Zonas rurales/urbanas:** Clasificación geográfica que puede influir en la disponibilidad y calidad del servicio de agua potable, así como en las estrategias de gestión implementadas.

❖ **Población de diseño:** Población prevista que se beneficiará del proyecto, tomando en cuenta el índice de cobertura, el crecimiento demográfico y el análisis de la demanda proyectada durante el periodo para el cual se va a diseñar (Rincón & Córdoba, 2017).

❖ **Periodo de diseño:** El período de diseño hace referencia al lapso en el que una obra o infraestructura puede funcionar sin requerir mejoras sustanciales en el sistema o ampliaciones. En lo que respecta a los sistemas de abastecimiento de agua potable, este período debe garantizar que el servicio proporcionado a la comunidad sea adecuado durante un tiempo

prolongado, manteniendo las condiciones de diseño, así como la confiabilidad y economía del sistema (RAS - Título B: Sistemas de acueducto, 2010).

❖ **Red matriz:** La red matriz de acueducto, o red de distribución primaria, es el conjunto de tuberías principales de mayor tamaño utilizadas para distribuir agua potable desde la planta de tratamiento o líneas expresas hacia las redes secundarias más pequeñas. Estas tuberías forman las mallas principales del sistema y son responsables de mantener las presiones básicas necesarias para el correcto funcionamiento de la red de distribución. No se permiten conexiones directas de usuarios a las tuberías de la red matriz debido a su función crítica en la distribución general (RAS - Título B: Sistemas de acueducto, 2010).

❖ **Red de distribución:** Conjunto de elementos, estructuras y tuberías que transportan el agua tratada desde el depósito de almacenamiento o desde la planta de tratamiento hacia los puntos de abastecimiento (Beltrán & Abril, 2014).

❖ **Caudal de diseño:** Flujo de agua calculado que se utiliza para dimensionar los equipos, dispositivos y estructuras en un sistema hidráulico específico. Este valor es fundamental para garantizar que las infraestructuras, como plantas de tratamiento y redes de distribución, puedan manejar adecuadamente las demandas máximas esperadas. Se determina considerando factores como el consumo poblacional, el uso del agua y las condiciones climáticas, lo que permite a los ingenieros planificar y construir sistemas eficientes y resilientes (Rincón & Córdoba, 2017).

❖ **Caudal máximo diario:** Consumo máximo a lo largo de las veinticuatro horas del día, registrado durante un año, sin considerar las demandas por incendios que hayan ocurrido (RAS - Título B: Sistemas de acueducto, 2010).

❖ **Caudal máximo horario:** Máximo consumo registrado en una hora dentro de un período anual, excluyendo las demandas generadas por incendios que hayan ocurrido durante ese tiempo (RAS - Título B: Sistemas de acueducto, 2010).

❖ **Caudal medio diario:** Consumo promedio en un período de veinticuatro horas, calculado a partir del promedio de los consumos diarios a lo largo de un año (RAS - Título B: Sistemas de acueducto, 2010).

❖ **Continuidad de servicio:** La continuidad del servicio de agua potable implica la capacidad de un sistema de suministro para proporcionar agua de manera constante y sin interrupciones, garantizando que los consumidores tengan acceso continuo al agua potable confiable y de alta calidad. Un sistema bien gestionado debe ser capaz de manejar emergencias, reparaciones y mantenimientos sin afectar significativamente la disponibilidad del agua, garantizando así la continuidad del servicio las 24 horas del día y todos los días de la semana.

❖ **Presión de servicio máximas en la red de distribución:** A partir del reglamento técnico vigente, para nuevos sistemas o mejoras, la presión estática máxima permitida será de 50 metros de columna de agua (m.c.a.). Para alcanzar este objetivo, la red de distribución deberá

dividirse en múltiples zonas de presión, según sea necesario, a fin de garantizar que la presión estática no exceda el valor máximo establecido (Resolución 0330, 2017).

❖ **Golpe de ariete:** Fenómeno hidráulico de naturaleza dinámica y oscilatoria, generado por una interrupción brusca del flujo en una tubería, ya sea por el cierre repentino de una válvula o la detención del sistema de bombeo. Este evento provoca la conversión de la energía cinética en energía elástica, tanto en el fluido como en la tubería, lo que ocasiona un aumento de presión, subpresiones y alteraciones en la dirección de la velocidad del flujo (Beltrán & Abril, 2014).

❖ **Macromedidor:** Estos son medidores diseñados para medir grandes caudales de agua. Su característica principal es su capacidad para medir o totalizar el agua que ha sido tratada en la planta (Higuera, 2021).

❖ **Micro medición:** Sistema utilizado para medir el volumen de agua consumido por cada suscriptor de un sistema de acueducto durante un período de tiempo específico.

❖ **Perdidas reales de agua:** Las pérdidas de agua en el sistema de acueducto representan la diferencia entre el volumen de agua tratada y registrado a la salida de las plantas potabilizadoras y el volumen entregado a la población, medido en las conexiones domiciliarias del municipio. Estas pérdidas se dividen en dos categorías principales: pérdidas físicas o técnicas y pérdidas comerciales (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2010).

❖ **Optimización:** Procedimiento de planificación y/o construcción orientada a alcanzar la máxima concordancia y compatibilidad dentro de los elementos de un sistema u optimizar el uso de todos los recursos disponibles para mejorar su capacidad (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2010).

#### 4.4 MARCO LEGAL

Según el artículo 365 de la constitución política de Colombia de 1991, establece que el estado es el responsable de la prestación de los servicios públicos donde reconoce que estos deben ser adecuados, eficientes y de calidad, también esos servicios públicos estarán sometidos al régimen jurídico que fije la ley y podrán ser prestados por el estado de forma directa o indirecta a comunidades particulares u organizadas para sí mantener la regulación, el control y la vigilancia de dichos servicios (Constitucion política de colombia, 1991).

También se establecen las siguientes normativas y leyes:

**Tabla 1. Normativa aplicable para la gestión del agua y saneamiento.**

| Categoría    | Norma                   | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                    | Categoría                  |
|--------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Leyes        | Ley 9 de 1979           | Por la cual se establecen medidas para preservar, restaurar o mejorar las condiciones sanitarias, incluyendo la legalización, regulación y control de los vertimientos de residuos                                                                                             | Salud pública              |
|              | Ley 99 de 1993          | Por la cual se establece el Ministerio del Medio Ambiente, se reorganiza el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se estructura el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y se adoptan otras disposiciones. | Medio ambiente y sanitario |
|              | Ley 142 de 1994         | Por la cual se regula el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se establecen otras disposiciones.                                                                                                                                                                  | Servicios públicos         |
|              | Ley 373 de 1997         | Por la cual se implementa el programa para la eficiencia y el ahorro en el uso del agua.                                                                                                                                                                                       | Uso del agua               |
|              | Ley 388 de 1997         | Planes de Ordenamiento Territorial.                                                                                                                                                                                                                                            | Ordenamiento territorial   |
| Decretos     | Decreto 2811 de 1974    | Por el cual se promulga el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y Protección del Medio Ambiente.                                                                                                                                                                   | Medio ambiente             |
|              | Decreto 2945 de 2010    | A través del cual se establecen las normas para el monitoreo, seguimiento y control mencionadas en el Decreto 028 de 2008 para el sector de agua potable y saneamiento básico, y se adoptan otras disposiciones.                                                               | Agua y saneamiento         |
|              | Decreto 3930 de 2010    | Por el cual se regula parcialmente el Título II de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- del Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en lo referente a los usos del agua y a los residuos líquidos, y se establecen otras disposiciones.           | Uso del agua               |
| Resoluciones | Resolución 0330 de 2017 | Normatividad del reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico                                                                                                                                                                                            | Agua y saneamiento         |

Fuente: autores

## 4.5 MARCO GEOGRAFICO

Colombia se encuentra ubicado en la región noroccidental de América del sur, se destaca por su biodiversidad, es el único país que cuenta con una conexión con el océano pacífico y el mar caribe. Su extensión territorial es de 1141748 km<sup>2</sup>, siendo así el cuarto país más grande de América latina.

Este limita con al norte con el mar caribe, al oeste con Panamá y el océano pacifico, al este con Venezuela y Brasil y al sur con Perú y Ecuador, es atravesado por la cordillera de los andes dándole a si una gran diversidad en su clima y paisaje. Además, el país está surcado por importantes ríos como el Magdalena y el Cauca, y posee una gran variedad de ecosistemas, desde selvas tropicales en la Amazonía hasta montañas en la región Andina.

En este territorio se encuentra el departamento de Cundinamarca, uno de los 33 departamentos que conforman Colombia. Este se encuentra situado en el centro del país limita con los departamentos de Meta al este, Tolima al sur, y Valle del Cauca y Huila al oeste, Boyacá al norte y rodea por completo a Bogotá distrital capital de Colombia.

El departamento cuenta con una extensión de 24210 km<sup>2</sup> con topografía montañosa, diversidad de clima, ya que se encuentra en la región andina. La economía de Cundinamarca es de gran relevancia para Colombia, es un motor clave para la economía, donde se destacan sectores como la agricultura, la ganadería, la industria y los servicios. Además, Cundinamarca es un centro clave para la conservación ambiental, con parques naturales como el Parque Nacional Natural Sumapaz, el cual es uno de los páramos más grandes de Colombia y posee una rica biodiversidad.

El área de estudio se centra en el casco urbano del municipio de Guataquí – Cundinamarca, ubicado en la provincia del alto magdalena, Su territorio se extiende en una zona de clima cálido y seco, con una temperatura media anual de 27.7 °C.

Su límite norte corresponde al municipio de Beltrán, mientras que al sur colinda con el municipio de Nariño. Hacia el oriente, sus fronteras se establecen con los municipios de Jerusalén y Tocaima, y al occidente está delimitado por el río Magdalena, el cual lo separa del departamento del Tolima. Sus Coordenadas geográficas son: Latitud: 4.51841, Longitud: 74.791 4° 31' 6" Norte, 74° 47' 28" Oeste (Alcaldía Municipal de Guataquí, 2018).

**Figura 1. Localización municipio de Guataquí en Colombia.**



Fuente: Autores, tomado de Mapchart

#### **4.6 MARCO DEMOGRAFICO**

El municipio de Guataquí es uno de los 116 municipios del departamento de Cundinamarca, según proyecciones del DANE, en 2024 cuenta con una población de 3440 habitantes de los cuales 1,655 son mujeres, aproximadamente el 48.1% y 1785 son hombres que representan el 51.9%. los habitantes de Guataquí representan el 0.10% de la población total de Cundinamarca, que en total están distribuidos en un área de 87 km<sup>2</sup> que tiene el municipio. En promedio la población está comprendida entre los 40-65 años que constituye un 53.2% (Telencuestas, 2024).

En este contexto, las proyecciones para 2024 Guataquí cuenta con una población adulta considerable, con 2,706 personas mayores de 18 años, lo que sugiere una fuerza laboral amplia y potencial para el desarrollo económico del municipio. De esta población adulta, el 48.4% son mujeres y el 51.6% son hombres, lo que refleja una distribución de género relativamente equilibrada dentro de la fuerza laboral. en 2024 Guataquí tiene 2,706 personas mayores de 18 años, de los cuales 1,310 son mujeres (48.4%) y 1,396 son hombres (51.6%) del total por lo que existe una fuerza laboral amplia (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2023).

En base a los censos realizados por el Departamento Nacional de Estadística DANE, en conjunto con el análisis Geoespacial del CNPV 2018 y la información del sistema de identificación de potenciales beneficiarios de programas sociales (Sisbén) suministrada por el municipio, se estableció comparativos poblacionales como se indica en la tabla 2.

**Tabla 2. Comparativos poblacionales**

| Concepto | Censo DANE |      |        |      | SISBÉN IV |            |
|----------|------------|------|--------|------|-----------|------------|
|          | %          | 2005 | %      | 2018 | %         | MARZO/2025 |
| Urbano   | 47.05      | 1046 | 57.41  | 1135 | 61.00     | 1494       |
| Rural    | 52.95      | 1177 | 42.59  | 842  | 39.00     | 955        |
| Hombres  | 53.60      | 1192 | 49.06  | 970  | 50.63     | 1240       |
| Mujeres  | 46.40      | 1031 | 50.94  | 1007 | 49.37     | 1209       |
| TOTAL    | 100.00     | 2223 | 100.00 | 1977 | 100.00    | 2449       |

Fuente: Autores, información tomada de Censo DANE 2005 – Censo DANE 2018 y Sisbén IV

## **5. DELIMITACIÓN**

Las siguientes delimitaciones de este proyecto aseguran que los esfuerzos estén dirigidos específicamente a la evaluación técnica de la red de distribución de agua potable de Guataquí, con un enfoque práctico y el diseño de soluciones técnicas que mejoren el funcionamiento y la sostenibilidad del sistema.

Este proyecto tiene como propósito principal la evaluación hidráulica y diagnóstico de la red de distribución de agua potable del municipio de Guataquí, ubicado en el departamento de Cundinamarca, Colombia, centrándose exclusivamente en el área urbana donde dicha red se encuentra en operación. No se incluirán zonas rurales, sistemas alternos de abastecimiento de agua ni otras infraestructuras que no formen parte de la red principal de distribución.

La evaluación hidráulica y el diagnóstico se realizarán con base en datos recopilados durante un periodo específico de tiempo, que comprenderá los últimos 6 meses previos al inicio del estudio, para obtener una visión actual y representativa del comportamiento de la red. Además, se considerarán aspectos históricos y proyecciones futuras en función de las tendencias de crecimiento poblacional y demanda de agua potable en el municipio.

La investigación se limitará al análisis de los componentes hidráulicos y operativos de la red de distribución, lo que incluye la evaluación de caudales, presiones, pérdidas de agua, eficiencia del sistema y estado de la infraestructura de distribución. No se abordarán aspectos de calidad del agua, a menos que estén relacionados directamente con el comportamiento hidráulico de la red. Asimismo, no se incluirá el análisis de la PTAP, ni fuentes de abastecimiento (acuíferos o captaciones) ni los aspectos legales o políticos relacionados con la gestión del recurso hídrico.

El proyecto se enfocará principalmente en los aspectos técnicos e ingenieriles del sistema de distribución de agua potable, sin entrar en análisis sociales o económicos detallados, salvo cuando dichos factores influyan directamente en el diagnóstico hidráulico y la propuesta de optimización. El estudio también estará limitado por la disponibilidad de información técnica proporcionada por las autoridades locales y la operadora del servicio.

## **6. METODOLOGÍA**

### **6.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El enfoque general de este trabajo corresponde a una investigación de tipo descriptiva y aplicada, conforme a los objetivos planteados.

En primer lugar, la investigación descriptiva estará orientada a detallar el estado actual de la red de distribución de agua potable en el municipio de Guataquí, Cundinamarca. El propósito de esta fase es realizar una caracterización exhaustiva y técnica del sistema existente, sin intervenir directamente en la red ni modificar las condiciones existentes, para que, a partir de este conocimiento previo, se diseñe una propuesta de optimización. Según Sampiere (2014) la investigación descriptiva permite caracterizar fenómenos o situaciones sin intervención directa, logrando así un diagnóstico objetivo y completo del sistema en su estado actual.

Por otro lado, la investigación aplicada se enfocará en el desarrollo de una alternativa de solución concreta para los problemas identificados durante la evaluación descriptiva. El objetivo es presentar un esquema de optimización hidráulica para el sistema de distribución de agua potable. Este enfoque, propio de la investigación aplicada, busca resolver problemáticas específicas mediante soluciones efectivas y técnicamente viables, logrando mejoras funcionales en el sistema evaluado (Tamayo, 2001).

### **6.2 TIPO DE ESTUDIO**

El tipo de estudio es de caso, debido a que se centra en el análisis exhaustivo y particularizado del sistema en específico. El estudio se limita al municipio de Guataquí, y las características técnicas y operativas de su red de distribución de agua potable. Hay que mencionar, además, que esto implicará la recolección de información mediante fuentes oficiales y encuestas o revisión de la percepción de los usuarios y gestores locales sobre el servicio de agua potable.

### **6.3 MÉTODO**

La investigación se llevará a cabo empleando un método mixto, lo que significa que combinará tanto enfoques cuantitativos como cualitativos de la siguiente manera.

Por un lado, el enfoque cualitativo incluirá la recopilación de datos no numéricos referentes a la evaluación hidráulica y diagnóstico de la red de distribución a través de documentos que permitan construir una base sólida sobre la cual desarrollar el proyecto.

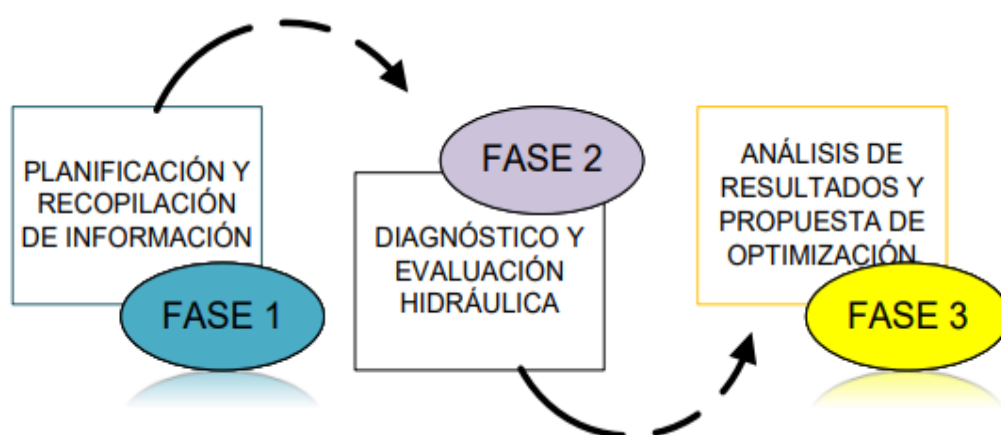
Por otro lado, el enfoque cuantitativo consistirá en la obtención y análisis de datos numéricos medibles y verificables, que permitan dar un diagnóstico de las condiciones actuales operativas que presenta el sistema de distribución. Se analizará la demanda presente y futura, en la que se analizará el comportamiento diario del consumo de agua potable, considerando tanto los días comunes como los fines de semana. Además, se realizará una modelación hidráulica de

la red de distribución en el software EPANET, donde se evaluará el escenario actual para el caudal estimado por dotaciones, a partir de lo cual se regirá la modelación optimizada de la red de distribución de agua potable que garantice satisfacer las necesidades actuales del municipio de Guataquí.

## 6.4 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología se compone de tres fases, como se muestran en la ilustración 2. Estas fases facilitan un desarrollo ordenado y sistemático de la investigación, asegurando el logro de los objetivos planteados.

**Figura 2. Fases de la metodología**



Fuente: Autores, tomado de Visio

### 6.4.1 Fase 1: planificación y recopilación de información.

En esta primera fase, se establecerán las bases metodológicas del proyecto y se realizarán las gestiones iniciales necesarias para su desarrollo:

- ❖ Se realizará una revisión de la documentación disponible sobre la red de distribución de agua potable, que incluirá planos, estudios previos, así como reportes de operación y mantenimiento.

### 6.4.2 Fase 2: diagnóstico y evaluación hidráulica.

Durante esta fase, se llevará a cabo la evaluación hidráulica de la red mediante la recolección de datos y su análisis:

- ❖ Con base a la información recolectada se determinará los indicadores de desempeño hidráulico que serán evaluados durante el estudio.

- ❖ Se establecen los parámetros de modelación
- ❖ Con los datos obtenidos, se modelará la red de distribución utilizando el software EPANET, con el fin de simular el comportamiento del sistema bajo las condiciones actuales.
- ❖ A partir del modelo hidráulico se evaluará la eficiencia actual del sistema, identificando problemas como bajas presiones, sobrepresiones, áreas con suministro insuficiente de agua o sectores críticos.

#### **6.4.3 Fase 3: propuesta de optimización y análisis de resultados.**

A partir de los datos obtenidos en la fase anterior, se procederá a modelar la red que optimice el sistema:

- ❖ Se llevará a cabo una modelación final optimizada de la red de distribución de agua potable, diseñada para satisfacer las necesidades que presenta el municipio de Guataquí, en función del servicio.

## 7. RECURSOS

### 7.1 HUMANO

Para la ejecución del proyecto, se contará con un equipo interdisciplinario de profesionales y técnicos especializados. El asesor académico, Jesús Flaminio Ospitia Prada, quien posee una Especialización en Gerencia Integral de Obras y un Magíster en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos, desempeña un papel fundamental en la orientación técnica y académica del proyecto. Por su parte, el equipo técnico de apoyo, integrado por el Departamento de Servicios Públicos de Guataquí, proporciona información crucial para la fase inicial, como el catastro de redes, levantamientos topográficos y especificaciones técnicas requeridas para la planificación y desarrollo del proyecto.

### 7.2 MATERIAL

Para el análisis y propuesta de optimización se utilizará ciertos equipos electrónicos juntos con softwares que permitan la modelación de la red de distribución y analizar los comportamientos de las redes en cuanto velocidades y presiones como se indica en la tabla 3.

**Tabla 3. Recurso material**

| Herramienta | Nombre          | Descripción                                                                                                                                                              |
|-------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Computador  | DESKTOP-F4PTSCO | Procesador: Intel® Core™ i5-10210U CPU @ 1.60GHz, 2.11 GHz.<br>Memoria RAM instalada: 4.00 GB (3.85 GB usable).<br>Sistema Operativo: 64 bits, procesador basado en x64. |
|             | LAPTOP-C73G9QQ1 | Procesador: AMD Ryzen 3 3250U with Radeon Graphics 2.60 GHz.<br>Memoria RAM instalada: 4.00 GB (3.45 GB usable). Sistema Operativo: 64 bits, procesador basado en x64.   |
| Software    | EPANET 2.0 vE   | software de dominio público                                                                                                                                              |

Fuente: Autores

## **8. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **8.1 PRIMERA FASE, PLANIFICACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

El análisis de redes de distribución generalmente se centra en la optimización o expansión de la infraestructura ya existente. Para ello, es fundamental llevar a cabo estudios previos que permitan obtener un conocimiento detallado de las características físicas y operativas del sistema. Este proceso tiene como objetivo realizar un diagnóstico preciso del estado actual de la red. La información esencial para el análisis de una red existente se presenta en los siguientes apartados (Guía RAS - 003, 2003).

#### **8.1.1 Descripción del sistema de acueducto actual.**

De acuerdo con la dependencia de servicios públicos, la red de acueducto del municipio de Guataquí fue construida en el año 1990 a la fecha tiene 35 años de antigüedad. La Empresa de servicios públicos, ofrece un servicio de captación, almacenamiento, tratamiento, distribución y comercialización del recurso hídrico con una cobertura del 100%. Brindando así un abastecimiento de agua de manera continua las 24 horas, y con suspensión una vez al mes por mantenimiento a la PTAP por un periodo de 7 horas.

#### **8.1.2 Bocatoma.**

El acueducto que abastece de agua a la población cuenta con una zona de captación que incluye una bocatoma lateral en relación con el flujo del río. Esta estructura está compuesta por un muelle flotante de tipo metálico, sostenido por barriles de plástico, lo que permite un sistema de succión directa mediante una bomba sumergible. La ubicación de esta infraestructura se encuentra aproximadamente a 65 metros al sur de la entrada del municipio, sobre la ruta nacional 45-08, que conecta Girardot con Cambao (Ver ilustración 3).

**Figura 3. Bocatoma.**



Fuente: Autores

Adicionalmente, se ha identificado evidencia de una fuga de agua en la unión entre dos tramos de tubería, la cual podría atribuirse a un acople defectuoso o daños en la rosca de conexión. Asimismo, se observa que tanto la tubería como los acoples presentan indicios de corrosión, lo que sugiere un posible desgaste asociado al tiempo de servicio o a la exposición a condiciones ambientales adversas, como se puede observar en la ilustración 4.

**Figura 4. Fuga en la línea primera línea de aducción**

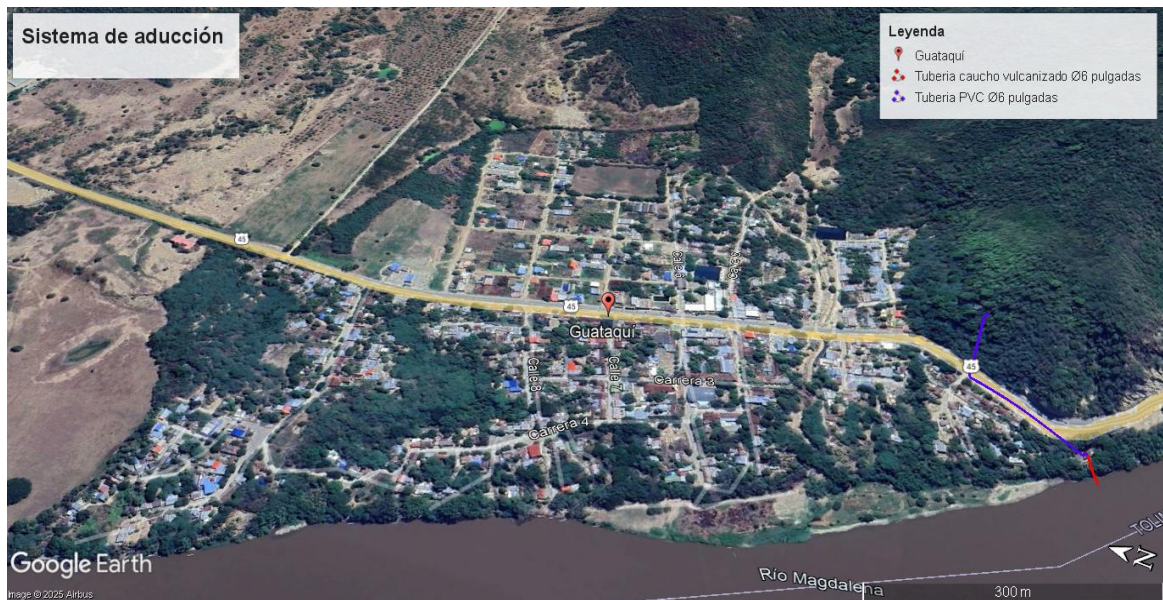


Fuente: Autores

### **8.1.3 Sistema de aducción.**

El sistema de aducción en operación está conformado por una primera línea de conducción de 30 metros de longitud, fabricada en caucho vulcanizado de 6 pulgadas de diámetro ( $\varnothing 6''$ ). Esta línea se origina en el río Magdalena mediante una bocatoma lateral, la cual opera en conjunto con un sistema de bombeo que trabaja con una bomba sumergible. Posteriormente, en tierra firme, el flujo es conducido través de una segunda línea de 270 metros de longitud, de tubería de PVC de 6 pulgadas de diámetro ( $\varnothing 6''$ ), después de haber sido sometido a un proceso de pretratamiento mediante un desarenador que trabaja en conjunto con una estación de bombeo compuesta por dos bombas. La línea de aducción suma un total de 300 metros de conducción hasta la PTAP compacta como se indica en la ilustración 5.

**Figura 5. Línea de aducción.**



Fuente: Google Earth

#### **8.1.4 Almacenamiento.**

El acueducto cuenta con un tanque de almacenamiento de agua, construido en concreto armado y revestido internamente con una pintura epóxica de clase superficial, diseñada para garantizar la protección y durabilidad de la estructura frente a la corrosión y la acción de agentes químicos. Este tanque posee una capacidad volumétrica de 114 metros cúbicos ( $m^3$ ) y está equipado con una tapa de acceso fabricada en hierro, que permite el mantenimiento y la inspección periódica del mismo. En cuanto a sus dimensiones, el tanque presenta una geometría rectangular como se indica en la tabla 4 (Rodríguez & Ríos, 2016).

**Tabla 4. Capacidad tanque de almacenamiento**

| Capacidad Real ( $M^3$ ) | Medidas (M) |       |        |
|--------------------------|-------------|-------|--------|
|                          | Largo       | Ancho | Altura |
| 114                      | 10          | 4.87  | 2.34   |

Fuente: Autores, información tomada de (Rios & Rodriguez, 2016).

#### **8.1.5 Sistema de distribución.**

El análisis de redes de distribución generalmente se centra en la optimización o expansión de la infraestructura ya existente. Para ello, es fundamental llevar a cabo estudios previos que permitan obtener un conocimiento detallado de las características físicas y operativas del sistema. Este proceso tiene como objetivo realizar un diagnóstico preciso del estado actual de la red. La información esencial para el análisis de una red existente se presenta en el siguiente apartado.

La red de distribución de agua potable en el municipio de Guataquí es de tipo mixto , combinando una configuración en mallada en el centro de la población y un sistema ramificado en los barrios periféricos, la conducción del agua potable es por medio de la gravedad gracias al tanque de almacenamiento elevado. Ver ilustración 6.

**Figura 6. Red de acueducto**



Fuente: Departamento de Servicios Públicos de Guataquí, información tomada de Consorcio consultoría Cundinamarca. (2012). Guataquí catastro redes de acueducto planta general (Plano N.º 5 de 11). 1: 2000

De acuerdo con el catastro de redes del plan maestro de acueducto, suministrado por la dependencia de servicios públicos, el municipio de Guataquí cuenta con un sistema de distribución de agua potable con una longitud de aproximadamente 10.07 km de tubería de policloruro de vinilo (PVC) distribuido en diferentes diámetros como se ve en la tabla 5.

**Tabla 5. Tubería existente en le red de distribución.**

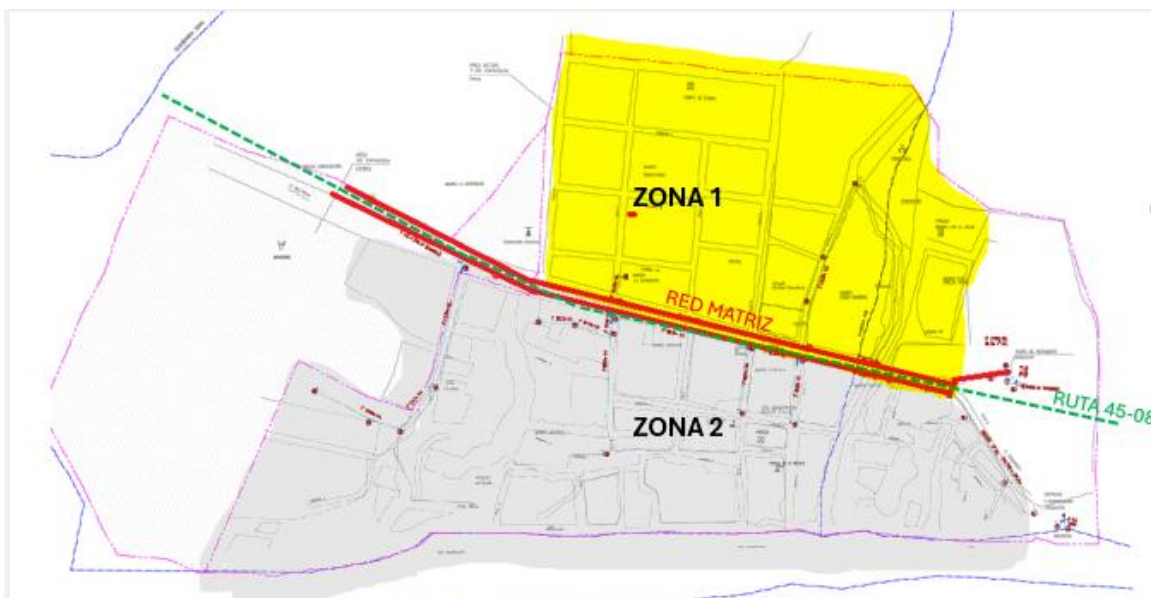
| Diametro (in) | PVC (m) |
|---------------|---------|
| 2             | 5648.9  |
| 3             | 2473.5  |
| 4             | 1872.89 |
| 6             | 73.01   |
| Total         | 10068.3 |

Fuente: Autores, información suministrada por la dependencia de servicios públicos del municipio.

Si bien la zona centro cuenta con una tubería de diámetro considerable para su distribución como red matriz (Ø6", Ø4" y Ø3" PVC), fue necesario identificar el trayecto que permite abastecer el casco urbano. Para ello, se analizó el funcionamiento actual de la red de

distribución, identificando las tuberías que desempeñan un papel principal de la cual se desprende la red secundaria de distribución. De esta manera se identificó que la red matriz es de tipo abierta que abastece dos zonas divididas físicamente por la ruta nacional 45-08. Ver ilustración 7.

**Figura 7. Red matriz existente**



Fuente: Autores, información tomada de Consorcio consultoría Cundinamarca. (2012). Guataquí catastro redes de acueducto planta general (Plano N.º 6 de 11). 1: 2000

La sectorización está delimitada geográficamente por barrios, el estado de las válvulas es regular, presentando deficiencias en el sellado de las mismas a la hora de cerrarlas. Estas válvulas de compuerta tienen en su mayoría, más de 30 años de uso y sectorizan solo 6 de los 9 barrios del municipio, barrio las Quintas, Galán y una válvula que sectoriza en conjunto al barrio la Plazuela, Centro, Américas I y II. A continuación, se presenta la sectorización actual de la red en la ilustración 8.

**Figura 8. Sectorización actual**



Fuente: Autores, información tomada de EOT del municipio

La red de distribución enfrenta diversas problemáticas que afectan su eficiencia y calidad del servicio. En primer lugar, se han identificado fugas en la red debido a la presencia de conexiones irregulares, mala instalación de tuberías en asentamientos subnormales ubicados en los barrios La Esperanza II y Las Américas.

Además, se ha identificado un desperdicio de agua en los sistemas de almacenamiento individuales. Este problema se debe a defectos estructurales en los tanques de almacenamiento y conexiones deficientes que generan pérdidas continuas del recurso, reduciendo la eficiencia del suministro.

Otro problema crítico es la inadecuada profundidad de instalación de las tuberías en ciertos sectores de la red, incumpliendo los requisitos establecidos en el reglamento técnico para el sector de Agua potable y Saneamiento Básico. La falta de profundidad expone la red a daños provocados por factores externos, como el tráfico vehicular y las condiciones del pavimento. En el caso de las zonas con pavimento hecho en piedra, la transferencia de cargas y vibraciones hacia las capas inferiores del suelo genera fisuras y desplazamientos en las tuberías, lo que ha ocasionado fugas, aumentando la pérdida de presión y posible contaminación del agua potable. Sumando a lo anterior, el deterioro generado por la antigüedad de las instalaciones y el bajo mantenimiento que estas reciben.

Por otra parte, en los puntos terminales de la tubería se han identificado fugas significativas debido al mal estado y la deficiente instalación de los tapones, lo que contribuye aún más a la pérdida del recurso que afecta la estabilidad del sistema de distribución.

## **8.2 SEGUNDA FASE, DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN HIDRÁULICA**

### **8.2.1 Indicadores de desempeño hidráulico**

Tras describir los componentes del sistema de acueducto e identificar las principales problemáticas que afectan su eficiencia y calidad, es fundamental evaluar los indicadores hidráulicos que permiten diagnosticar el desempeño del sistema. A continuación, se describen los indicadores hidráulicos del sistema.

- ❖ Continuidad del servicio
- ❖ Sectorización y control de válvulas.
- ❖ Presión en la red
- ❖ Velocidades en la red
- ❖ Profundidad de instalación de la tubería

### **8.2.2 Condiciones operativas del sistema de distribución según las Resoluciones 0799 de 2021 y 0330 de 2017.**

- ❖ Velocidad mínima del flujo: La circulación del agua dentro de la red de distribución debe alcanzar una velocidad mínima de 0.5 m/s para garantizar un transporte eficiente.
- ❖ Velocidad máxima permitida: La velocidad del agua en las tuberías no debe exceder el valor máximo recomendado según las especificaciones técnicas del material utilizado en la red.
- ❖ Para tuberías con diámetros menores o iguales a 12", se debe mantener una distancia mínima de 0.5 m respecto a los elementos estructurales circundantes.
- ❖ Para tuberías con diámetros mayores, se debe garantizar una separación mínima de 1,0 m respecto a otras estructuras.
- ❖ Cuando se trate de redes de diferentes servicios, la distancia mínima de separación entre tuberías será de 1.0 m en sentido horizontal y 0.3 m en sentido vertical.
- ❖ La red de distribución debe instalarse a una profundidad máxima de 1.5 m para facilitar su mantenimiento y operación. En cuanto a la profundidad mínima, se establece en 1.0 m para vías urbanas y 0.6 m en zonas peatonales, áreas verdes o agrícolas.
- ❖ Profundidad mínima en zonas rurales: En áreas rurales, las tuberías deben instalarse a una profundidad no menor de 1.0 m para garantizar su protección y correcto funcionamiento.
- ❖ La red de distribución debe mantener una presión dinámica mínima de 15 m.c.a para poblaciones con menos de 12,500 habitantes, mientras que el límite máximo permitido es de 50 m.c.a.

❖ En lo que respecta a los diámetros internos mínimos en la red de distribución, estos no deben ser inferiores a 75 mm en sectores urbanos.

### **8.2.3 Parámetros de modelación.**

#### **8.2.3.1 Población actual casco urbano.**

Para el presente estudio, se estableció la población actual, mediante el aplicativo terridata, creado por el Departamento Nacional de Planeación DNP para difundir y facilitar la visualización de estadísticas e indicadores territoriales, que toma como fuente las proyecciones realizadas por el Departamento Nacional de Estadística (DANE) con base en el Censo 2018.

Se logró determinar la población proyectada para la cabecera del municipio de Guataquí para el año 2025, tomando como base el censo del año 2020, que registró una población de 1.404 habitantes. Como resultado de la proyección, se estimó una población de 1.848 habitantes para dicho año.

#### **8.2.3.2 Nivel de complejidad.**

De acuerdo con el numeral A.3.1 del Título A del reglamento técnico para el sector de Agua potable y Saneamiento Básico, el nivel de complejidad se determina con base a el número de habitantes de la zona urbana y la capacidad económica de los usuarios tal como se indica en la tabla 6.

**Tabla 6. Nivel de complejidad del sistema.**

| Nivel de complejidad | Población en la zona urbana (Habitantes) | Capacidad económica de los usuarios |
|----------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| Bajo                 | < 2500                                   | Baja                                |
| Medio                | 2501 a 12500                             | Baja                                |
| Medio Alto           | 12501 a 60000                            | Media                               |
| Alto                 | > 60000                                  | Alta                                |

Fuente: Resolución No. 1096 del 17 de noviembre de 2000

La población actual en la cabecera del municipal de Guataquí es de 1848 habitantes, en su mayoría de estratos 1 y 2. Dado que esta cifra es inferior a 2500 habitantes y la capacidad económica de los usuarios es baja, el proyecto de acueducto se clasifica dentro del nivel de complejidad bajo

#### **8.2.3.3 Dotación neta.**

De acuerdo con la Resolución 0330 de 2017 que deroga la resolución 2320 de 2009, los usuarios del sistema de acueducto deben contar con una dotación neta de 140 L/hab/día. Esta

asignación se establece en función de la altura sobre el nivel del mar del municipio de Guataquí la cual es aproximadamente de 210 metros sobre el nivel del mar. Ver tabla 7.

**Tabla 7. Dotación máxima.**

| Altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida | Dotación neta máxima (L/hab/día) |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| >2000 m.s.n.m                                              | 120                              |
| 1000 – 2000 m.s.n.m                                        | 130                              |
| <1000 m.s.n.m                                              | 140                              |

Fuente: Resolución No. 0330 del 08 de Junio de 2017

El porcentaje máximo de pérdidas técnicas admisibles es del 25%, según lo establecido en la normativa vigente. (Resolución 0330, 2017).

#### **8.2.3.4 Dotación bruta.**

Para determinar la Dotación Bruta Actual se determina dividiendo la Dotación Neta Actual entre la diferencia de uno menos el porcentaje de pérdidas técnicas permisibles.

#### **Ecuación 2 Dotación bruta**

$$D_{bruta} = \frac{D_{neta}}{1 - 25\%}$$

Por tanto:

$$D_{bruta} = \frac{140 \frac{L}{hab - dia}}{1 - 25\%} = 186.67 \frac{L}{hab - dia}$$

#### **8.2.3.5 Proyección de demandas de agua.**

El consumo de agua es un factor clave en el diseño de los distintos componentes de un sistema de abastecimiento y distribución de agua potable. Para lograr una planificación y dimensionamiento adecuado de elementos como las redes de distribución, es esencial conocer la distribución espacial de la demanda de agua en la zona a abastecer (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2003).

Para simular el sistema de abastecimiento de agua potable, es fundamental determinar distintos caudales de demanda en función de la población atendida y su dotación. A continuación, se describen las ecuaciones utilizadas para estos cálculos:

❖ Caudal medio diario (Qmd): Considerando la Dotación Bruta obtenida anteriormente y lo establecido en el RAS 2000, el Caudal Medio Diario se define como el promedio de los consumos diarios en un período de un año. Este valor se proyecta con base en la dotación bruta asignada y puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

### Ecuación 3 Caudal medio diario.

$$D_{md} = \frac{Poblacion * Dotacion\ bruta}{86400}$$

Fuente: RAS 2010 Título B

❖ Caudal máximo diario (QMD): Corresponde al valor más elevado de consumo de agua observado durante un lapso continuo de 24 horas en el transcurso de un año. Para estimarlo, se aplica un factor denominado coeficiente de consumo máximo diario ( $K_1$ ) al caudal medio diario. La fórmula empleada para calcular el Caudal Máximo Diario (QMD) es la siguiente:

### Ecuación 4 Caudal máximo horario

$$QMD = Q_{md} * K_1$$

Fuente: RAS 2010 Título B

De acuerdo con la resolución 0330 del 2017, el coeficiente de consumo máximo diario  $k_1$  para poblaciones menores o iguales de 12500 habitantes no debe ser superior a 1.3, para el presente proyecto se toma un valor de 1.2.

❖ Caudal Máximo Horario (QMH): Representa el consumo más alto registrado en una hora dentro de un período de un año, sin considerar el caudal destinado a incendios. Su cálculo se realiza multiplicando el Caudal Máximo Diario por el coeficiente de consumo máximo horario ( $K_2$ ).

### Ecuación 5 Caudal máximo horario

$$QMH = QMD * K_2$$

Fuente: RAS 2010 Título B

Donde  $k_2$  de acuerdo con la resolución 0330 del 2017, corresponde a un valor comprendido entre 1.3 y 1.6 en relación con las características locales. Para el presente proyecto se toma un valor  $k_2$  de 1.60.

Dado que el consumo de agua varía a lo largo del día, las redes de distribución deben ser diseñadas para soportar las fluctuaciones en la demanda y garantizar un servicio eficiente. Para ello, se deben considerar parámetros que aseguren la continuidad del suministro, la presión adecuada en las tuberías y la calidad del agua entregada a los usuarios. En este sentido, de acuerdo con el numeral A.11.1.15 del Título A del reglamento técnico para el sector de Agua potable y Saneamiento Básico (RAS), el caudal de diseño se establece en función del

nivel de confiabilidad del sistema, conforme a los criterios de dimensionamiento hidráulico. Específicamente, para sistemas clasificados con un nivel de complejidad bajo, el caudal de diseño corresponderá al Caudal Máximo Horario (QMH), el cual permite atender los picos de demanda con condiciones óptimas de operación.

Los parámetros de modelado utilizados para la simulación de la red actual se muestran en la Tabla 8 y con la información suministrada por la dependencia de servicios públicos de la alcaldía, se obtienen los datos de demandas en cada uno de los 115 nodos. Los resultados de éste se encuentran en la Tabla 9.

**Tabla 8. Resumen parámetros de simulación.**

| Datos                                           |              |
|-------------------------------------------------|--------------|
| Número de habitantes                            | 1848         |
| Nivel de complejidad del sistema por habitantes | Bajo         |
| Capacidad económica de los usuarios             | Bajo         |
| Altura de la zona                               | 210          |
| Clima de la zona                                | Clima cálido |

Fuente: Autores

**Tabla 9. Resumen del cálculo de demandas.**

| ID Nudo      | Densidad Poblacional<br>(Hab/Ha) | Area Aferente (Ha) | Poblacion (Hab) | Dotacion Neta<br>(L/Hab/Dia) | Dotacion Bruta | Caudal Medio Diario<br>(Lps) | Caudal Maximo Diario<br>(Lps) | Caudal Maximo Horario<br>(Lps) |
|--------------|----------------------------------|--------------------|-----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Conexión n1  | 27.690                           | 0                  | 0               | 0                            | 0.00           | 0.000                        | 0.000                         | 0.000                          |
| Conexión n2  | 27.690                           | 0                  | 0               | 0                            | 0.00           | 0.000                        | 0.000                         | 0.000                          |
| Conexión n3  | 27.690                           | 0.21               | 6               | 140                          | 186.67         | 0.013                        | 0.015                         | 0.024                          |
| Conexión n4  | 27.690                           | 0.21               | 6               | 140                          | 186.67         | 0.013                        | 0.015                         | 0.024                          |
| Conexión n5  | 27.690                           | 0.06               | 2               | 140                          | 186.67         | 0.004                        | 0.004                         | 0.007                          |
| Conexión n6  | 27.690                           | 0.84               | 23              | 140                          | 186.67         | 0.050                        | 0.060                         | 0.096                          |
| Conexión n7  | 27.690                           | 0.14               | 4               | 140                          | 186.67         | 0.008                        | 0.010                         | 0.016                          |
| Conexión n8  | 27.690                           | 0.2                | 6               | 140                          | 186.67         | 0.012                        | 0.014                         | 0.023                          |
| Conexión n9  | 27.690                           | 0.43               | 12              | 140                          | 186.67         | 0.026                        | 0.031                         | 0.049                          |
| Conexión n10 | 27.690                           | 0.19               | 5               | 140                          | 186.67         | 0.011                        | 0.014                         | 0.022                          |
| Conexión n11 | 27.690                           | 0.28               | 8               | 140                          | 186.67         | 0.017                        | 0.020                         | 0.032                          |
| Conexión n12 | 27.690                           | 0.56               | 16              | 140                          | 186.67         | 0.034                        | 0.040                         | 0.064                          |
| Conexión n13 | 27.690                           | 0.1                | 3               | 140                          | 186.67         | 0.006                        | 0.007                         | 0.011                          |

| ID Nudo      | Densidad Poblacional<br>(Hab/Ha) | Area Aferente (Ha) | Poblacion (Hab) | Dotacion Neta<br>(L/Hab/Dia) | Dotacion Bruta | Caudal Medio Diario<br>(Lps) | Caudal Maximo Diario<br>(Lps) | Caudal Maximo Horario<br>(Lps) |
|--------------|----------------------------------|--------------------|-----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Conexión n14 | 27.690                           | 0.23               | 6               | 140                          | 186.67         | 0.014                        | 0.017                         | 0.026                          |
| Conexión n15 | 27.690                           | 0.27               | 7               | 140                          | 186.67         | 0.016                        | 0.019                         | 0.031                          |
| Conexión n16 | 27.690                           | 0.28               | 8               | 140                          | 186.67         | 0.017                        | 0.020                         | 0.032                          |
| Conexión n17 | 27.690                           | 0.17               | 5               | 140                          | 186.67         | 0.010                        | 0.012                         | 0.020                          |
| Conexión n18 | 27.690                           | 0.24               | 7               | 140                          | 186.67         | 0.014                        | 0.017                         | 0.028                          |
| Conexión n19 | 27.690                           | 0.19               | 5               | 140                          | 186.67         | 0.011                        | 0.014                         | 0.022                          |
| Conexión n20 | 27.690                           | 0.33               | 9               | 140                          | 186.67         | 0.020                        | 0.024                         | 0.038                          |
| Conexión n21 | 27.690                           | 0.34               | 9               | 140                          | 186.67         | 0.020                        | 0.024                         | 0.039                          |
| Conexión n22 | 27.690                           | 0.22               | 6               | 140                          | 186.67         | 0.013                        | 0.016                         | 0.025                          |
| Conexión n23 | 27.690                           | 0.23               | 6               | 140                          | 186.67         | 0.014                        | 0.017                         | 0.026                          |
| Conexión n24 | 27.690                           | 0.35               | 10              | 140                          | 186.67         | 0.021                        | 0.025                         | 0.040                          |
| Conexión n25 | 27.690                           | 0.34               | 9               | 140                          | 186.67         | 0.020                        | 0.024                         | 0.039                          |
| Conexión n26 | 27.690                           | 0.37               | 10              | 140                          | 186.67         | 0.022                        | 0.027                         | 0.042                          |
| Conexión n27 | 27.690                           | 0.37               | 10              | 140                          | 186.67         | 0.022                        | 0.027                         | 0.042                          |
| Conexión n28 | 27.690                           | 0.14               | 4               | 140                          | 186.67         | 0.008                        | 0.010                         | 0.016                          |
| Conexión n29 | 27.690                           | 0.44               | 12              | 140                          | 186.67         | 0.026                        | 0.032                         | 0.051                          |
| Conexión n30 | 27.690                           | 0.6                | 17              | 140                          | 186.67         | 0.036                        | 0.043                         | 0.069                          |
| Conexión n31 | 27.690                           | 0.21               | 6               | 140                          | 186.67         | 0.013                        | 0.015                         | 0.024                          |
| Conexión n32 | 27.690                           | 0.59               | 16              | 140                          | 186.67         | 0.035                        | 0.042                         | 0.068                          |
| Conexión n33 | 27.690                           | 0.86               | 24              | 140                          | 186.67         | 0.051                        | 0.062                         | 0.099                          |
| Conexión n34 | 27.690                           | 0.32               | 9               | 140                          | 186.67         | 0.019                        | 0.023                         | 0.037                          |
| Conexión n35 | 27.690                           | 0.34               | 9               | 140                          | 186.67         | 0.020                        | 0.024                         | 0.039                          |
| Conexión n36 | 27.690                           | 0.39               | 11              | 140                          | 186.67         | 0.023                        | 0.028                         | 0.045                          |
| Conexión n37 | 27.690                           | 0.54               | 15              | 140                          | 186.67         | 0.032                        | 0.039                         | 0.062                          |
| Conexión n38 | 27.690                           | 0.68               | 19              | 140                          | 186.67         | 0.041                        | 0.049                         | 0.078                          |
| Conexión n39 | 27.690                           | 0.39               | 11              | 140                          | 186.67         | 0.023                        | 0.028                         | 0.045                          |
| Conexión n40 | 27.690                           | 0.59               | 16              | 140                          | 186.67         | 0.035                        | 0.042                         | 0.068                          |
| Conexión n41 | 27.690                           | 0.29               | 8               | 140                          | 186.67         | 0.017                        | 0.021                         | 0.033                          |
| Conexión n42 | 27.690                           | 0.87               | 24              | 140                          | 186.67         | 0.052                        | 0.062                         | 0.100                          |
| Conexión n43 | 27.690                           | 0.36               | 10              | 140                          | 186.67         | 0.022                        | 0.026                         | 0.041                          |
| Conexión n44 | 27.690                           | 0.29               | 8               | 140                          | 186.67         | 0.017                        | 0.021                         | 0.033                          |
| Conexión n45 | 27.690                           | 0.31               | 9               | 140                          | 186.67         | 0.019                        | 0.022                         | 0.036                          |
| Conexión n46 | 27.690                           | 0.68               | 19              | 140                          | 186.67         | 0.041                        | 0.049                         | 0.078                          |
| Conexión n47 | 27.690                           | 0.7                | 19              | 140                          | 186.67         | 0.042                        | 0.050                         | 0.080                          |
| Conexión n48 | 27.690                           | 0.58               | 16              | 140                          | 186.67         | 0.035                        | 0.042                         | 0.067                          |
| Conexión n49 | 27.690                           | 0.21               | 6               | 140                          | 186.67         | 0.013                        | 0.015                         | 0.024                          |
| Conexión n50 | 27.690                           | 0.3                | 8               | 140                          | 186.67         | 0.018                        | 0.022                         | 0.034                          |

| ID Nudo      | Densidad Poblacional<br>(Hab/Ha) | Area Aferente (Ha) | Poblacion (Hab) | Dotacion Neta<br>(L/Hab/Dia) | Dotacion Bruta | Caudal Medio Diario<br>(Lps) | Caudal Maximo Diario<br>(Lps) | Caudal Maximo Horario<br>(Lps) |
|--------------|----------------------------------|--------------------|-----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Conexión n51 | 27.690                           | 0.3                | 8               | 140                          | 186.67         | 0.018                        | 0.022                         | 0.034                          |
| Conexión n52 | 27.690                           | 0.17               | 5               | 140                          | 186.67         | 0.010                        | 0.012                         | 0.020                          |
| Conexión n53 | 27.690                           | 0.22               | 6               | 140                          | 186.67         | 0.013                        | 0.016                         | 0.025                          |
| Conexión n54 | 27.690                           | 0.5                | 14              | 140                          | 186.67         | 0.030                        | 0.036                         | 0.057                          |
| Conexión n55 | 27.690                           | 0.49               | 14              | 140                          | 186.67         | 0.029                        | 0.035                         | 0.056                          |
| Conexión n56 | 27.690                           | 0.45               | 12              | 140                          | 186.67         | 0.027                        | 0.032                         | 0.052                          |
| Conexión n57 | 27.690                           | 0.52               | 14              | 140                          | 186.67         | 0.031                        | 0.037                         | 0.060                          |
| Conexión n58 | 27.690                           | 0.23               | 6               | 140                          | 186.67         | 0.014                        | 0.017                         | 0.026                          |
| Conexión n59 | 27.690                           | 1.04               | 29              | 140                          | 186.67         | 0.062                        | 0.075                         | 0.119                          |
| Conexión n60 | 27.690                           | 0.47               | 13              | 140                          | 186.67         | 0.028                        | 0.034                         | 0.054                          |
| Conexión n61 | 27.690                           | 0.18               | 5               | 140                          | 186.67         | 0.011                        | 0.013                         | 0.021                          |
| Conexión n62 | 27.690                           | 0.68               | 19              | 140                          | 186.67         | 0.041                        | 0.049                         | 0.078                          |
| Conexión n63 | 27.690                           | 2.75               | 76              | 140                          | 186.67         | 0.165                        | 0.197                         | 0.316                          |
| Conexión n64 | 27.690                           | 1.66               | 46              | 140                          | 186.67         | 0.099                        | 0.119                         | 0.191                          |
| Conexión n65 | 27.690                           | 3                  | 83              | 140                          | 186.67         | 0.179                        | 0.215                         | 0.345                          |
| Conexión n66 | 27.690                           | 1.12               | 31              | 140                          | 186.67         | 0.067                        | 0.080                         | 0.129                          |
| Conexión n67 | 27.690                           | 1.39               | 38              | 140                          | 186.67         | 0.083                        | 0.100                         | 0.160                          |
| Conexión n68 | 27.690                           | 0.61               | 17              | 140                          | 186.67         | 0.036                        | 0.044                         | 0.070                          |
| Conexión n69 | 27.690                           | 0.52               | 14              | 140                          | 186.67         | 0.031                        | 0.037                         | 0.060                          |
| Conexión n70 | 27.690                           | 2.63               | 73              | 140                          | 186.67         | 0.157                        | 0.189                         | 0.302                          |
| Conexión n71 | 27.690                           | 0.61               | 17              | 140                          | 186.67         | 0.036                        | 0.044                         | 0.070                          |
| Conexión n72 | 27.690                           | 2.75               | 76              | 140                          | 186.67         | 0.165                        | 0.197                         | 0.316                          |
| Conexión n73 | 27.690                           | 1.63               | 45              | 140                          | 186.67         | 0.098                        | 0.117                         | 0.187                          |
| Conexión n74 | 27.690                           | 0.66               | 18              | 140                          | 186.67         | 0.039                        | 0.047                         | 0.076                          |
| Conexión n75 | 27.690                           | 0.52               | 14              | 140                          | 186.67         | 0.031                        | 0.037                         | 0.060                          |
| Conexión n76 | 27.690                           | 1.72               | 48              | 140                          | 186.67         | 0.103                        | 0.123                         | 0.198                          |
| Conexión n77 | 27.690                           | 1.22               | 34              | 140                          | 186.67         | 0.073                        | 0.088                         | 0.140                          |
| Conexión n78 | 27.690                           | 1.68               | 47              | 140                          | 186.67         | 0.101                        | 0.121                         | 0.193                          |
| Conexión n79 | 27.690                           | 0.5                | 14              | 140                          | 186.67         | 0.030                        | 0.036                         | 0.057                          |
| Conexión n80 | 27.690                           | 0.52               | 14              | 140                          | 186.67         | 0.031                        | 0.037                         | 0.060                          |
| Conexión n81 | 27.690                           | 0.27               | 7               | 140                          | 186.67         | 0.016                        | 0.019                         | 0.031                          |
| Conexión n82 | 27.690                           | 0.34               | 9               | 140                          | 186.67         | 0.020                        | 0.024                         | 0.039                          |
| Conexión n83 | 27.690                           | 0.62               | 17              | 140                          | 186.67         | 0.037                        | 0.045                         | 0.071                          |
| Conexión n84 | 27.690                           | 1.15               | 32              | 140                          | 186.67         | 0.069                        | 0.083                         | 0.132                          |
| Conexión n85 | 27.690                           | 0.88               | 24              | 140                          | 186.67         | 0.053                        | 0.063                         | 0.101                          |
| Conexión n86 | 27.690                           | 0.88               | 24              | 140                          | 186.67         | 0.053                        | 0.063                         | 0.101                          |
| Conexión n87 | 27.690                           | 0.71               | 20              | 140                          | 186.67         | 0.042                        | 0.051                         | 0.082                          |

| ID Nudo       | Densidad Poblacional<br>(Hab/Ha) | Area Aferente (Ha) | Poblacion (Hab) | Dotacion Neta<br>(L/Hab/Dia) | Dotacion Bruta | Caudal Medio Diario<br>(Lps) | Caudal Maximo Diario<br>(Lps) | Caudal Maximo Horario<br>(Lps) |
|---------------|----------------------------------|--------------------|-----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Conexión n88  | 27.690                           | 0.56               | 16              | 140                          | 186.67         | 0.034                        | 0.040                         | 0.064                          |
| Conexión n89  | 27.690                           | 0.7                | 19              | 140                          | 186.67         | 0.042                        | 0.050                         | 0.080                          |
| Conexión n90  | 27.690                           | 1.01               | 28              | 140                          | 186.67         | 0.060                        | 0.073                         | 0.116                          |
| Conexión n91  | 27.690                           | 0.17               | 5               | 140                          | 186.67         | 0.010                        | 0.012                         | 0.020                          |
| Conexión n92  | 27.690                           | 0.64               | 18              | 140                          | 186.67         | 0.038                        | 0.046                         | 0.074                          |
| Conexión n93  | 27.690                           | 0.27               | 7               | 140                          | 186.67         | 0.016                        | 0.019                         | 0.031                          |
| Conexión n94  | 27.690                           | 0.27               | 7               | 140                          | 186.67         | 0.016                        | 0.019                         | 0.031                          |
| Conexión n95  | 27.690                           | 0.49               | 14              | 140                          | 186.67         | 0.029                        | 0.035                         | 0.056                          |
| Conexión n96  | 27.690                           | 0.27               | 7               | 140                          | 186.67         | 0.016                        | 0.019                         | 0.031                          |
| Conexión n97  | 27.690                           | 0.43               | 12              | 140                          | 186.67         | 0.026                        | 0.031                         | 0.049                          |
| Conexión n98  | 27.690                           | 0.51               | 14              | 140                          | 186.67         | 0.031                        | 0.037                         | 0.059                          |
| Conexión n99  | 27.690                           | 0.59               | 16              | 140                          | 186.67         | 0.035                        | 0.042                         | 0.068                          |
| Conexión n100 | 27.690                           | 0.46               | 13              | 140                          | 186.67         | 0.028                        | 0.033                         | 0.053                          |
| Conexión n101 | 27.690                           | 0.35               | 10              | 140                          | 186.67         | 0.021                        | 0.025                         | 0.040                          |
| Conexión n102 | 27.690                           | 0.37               | 10              | 140                          | 186.67         | 0.022                        | 0.027                         | 0.042                          |
| Conexión n103 | 27.690                           | 0.6                | 17              | 140                          | 186.67         | 0.036                        | 0.043                         | 0.069                          |
| Conexión n104 | 27.690                           | 1.38               | 38              | 140                          | 186.67         | 0.083                        | 0.099                         | 0.159                          |
| Conexión n105 | 27.690                           | 0.6                | 17              | 140                          | 186.67         | 0.036                        | 0.043                         | 0.069                          |
| Conexión n106 | 27.690                           | 0.38               | 11              | 140                          | 186.67         | 0.023                        | 0.027                         | 0.044                          |
| Conexión n107 | 27.690                           | 0.21               | 6               | 140                          | 186.67         | 0.013                        | 0.015                         | 0.024                          |
| Conexión n108 | 27.690                           | 0.37               | 10              | 140                          | 186.67         | 0.022                        | 0.027                         | 0.042                          |
| Conexión n109 | 27.690                           | 0.37               | 10              | 140                          | 186.67         | 0.022                        | 0.027                         | 0.042                          |
| Conexión n110 | 27.690                           | 0.4                | 11              | 140                          | 186.67         | 0.024                        | 0.029                         | 0.046                          |
| Conexión n111 | 27.690                           | 0.22               | 6               | 140                          | 186.67         | 0.013                        | 0.016                         | 0.025                          |
| Conexión n112 | 27.690                           | 0.28               | 8               | 140                          | 186.67         | 0.017                        | 0.020                         | 0.032                          |
| Conexión n113 | 27.690                           | 0.4                | 11              | 140                          | 186.67         | 0.024                        | 0.029                         | 0.046                          |
| Conexión n114 | 27.690                           | 0.37               | 10              | 140                          | 186.67         | 0.022                        | 0.027                         | 0.042                          |
| Conexión n115 | 27.690                           | 0.65               | 18              | 140                          | 186.67         | 0.039                        | 0.047                         | 0.075                          |
| <b>SUMA</b>   | <b>66.74</b>                     | <b>1848</b>        |                 |                              |                | <b>3.993</b>                 | <b>4.791</b>                  | <b>7.666</b>                   |

Fuente: Autores

## 8.2.4 Modelado en EPANET.

La Alcaldía del municipio de Guataquí suministró un archivo en formato AutoCAD que contiene información detallada sobre la red de distribución de agua potable en el casco urbano. Dicho archivo incluye las curvas de nivel del terreno, así como la representación de la red hidráulica con sus respectivos diámetros y accesorios, tal como se muestra en la Ilustración 6.

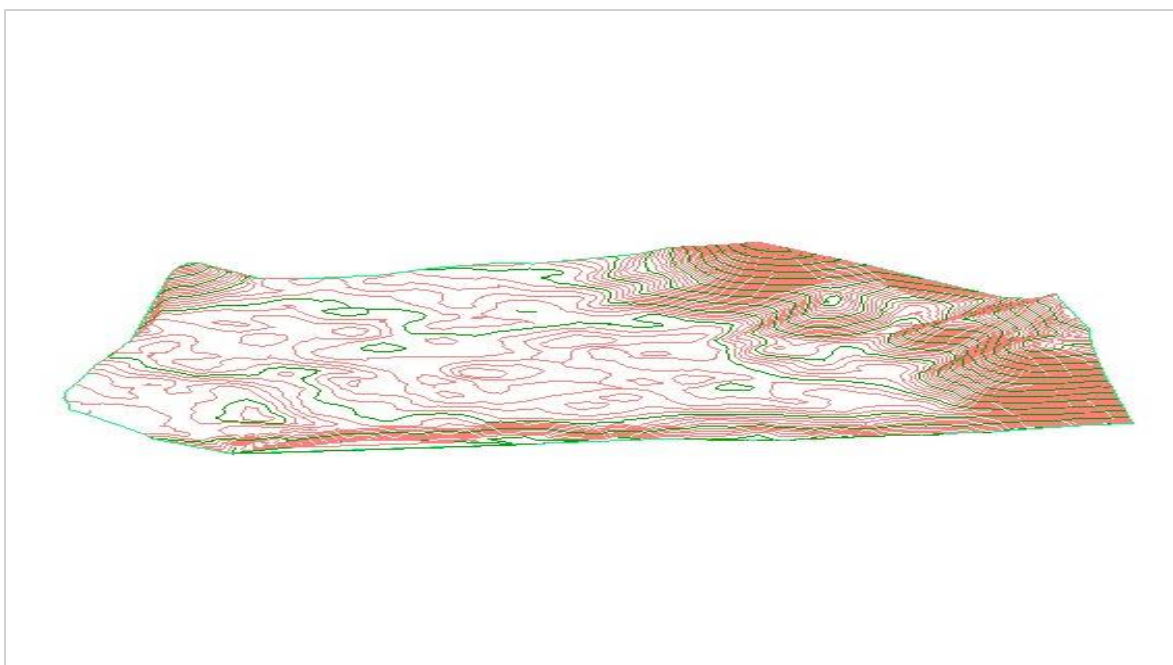
Para el análisis de la red de distribución, la creación manual de la misma representa un proceso altamente demandante en términos de tiempo y recursos. Con el fin de optimizar esta tarea, se emplea la herramienta EpaCAD, que permite la conversión de archivos de AutoCAD a EPANET. Esta herramienta es capaz de procesar archivos en formato DXF, identificando líneas y polilíneas, además de reconocer características geométricas como longitud y coordenadas X,Y. Sin embargo, no realiza la extracción automática de la coordenada Z a partir de las curvas de nivel, por lo que su asignación debe efectuarse manualmente.

Dado que la red a modelar posee una gran extensión, la asignación manual de las elevaciones a cada tubería resultaría un proceso sumamente laborioso. Para superar esta limitación, se emplea Civil 3D, el cual permite extraer de manera automática las elevaciones a partir de las curvas de nivel y asignarlas a las polilíneas correspondientes. Posteriormente, EpaCAD convierte estas polilíneas con sus respectivas elevaciones en un archivo compatible con EPANET, optimizando así el proceso de modelado hidráulico de la red.

#### **8.2.4.1 Cotas de curvas de nivel.**

En primera instancia, se procede a separar las curvas de nivel y la red de tuberías. Posteriormente, se copian tanto las curvas de nivel principales como las secundarias y se insertan en Civil 3D manteniendo sus coordenadas originales tal como se muestra en la ilustración 9.

**Figura 9. Curvas de nivel**

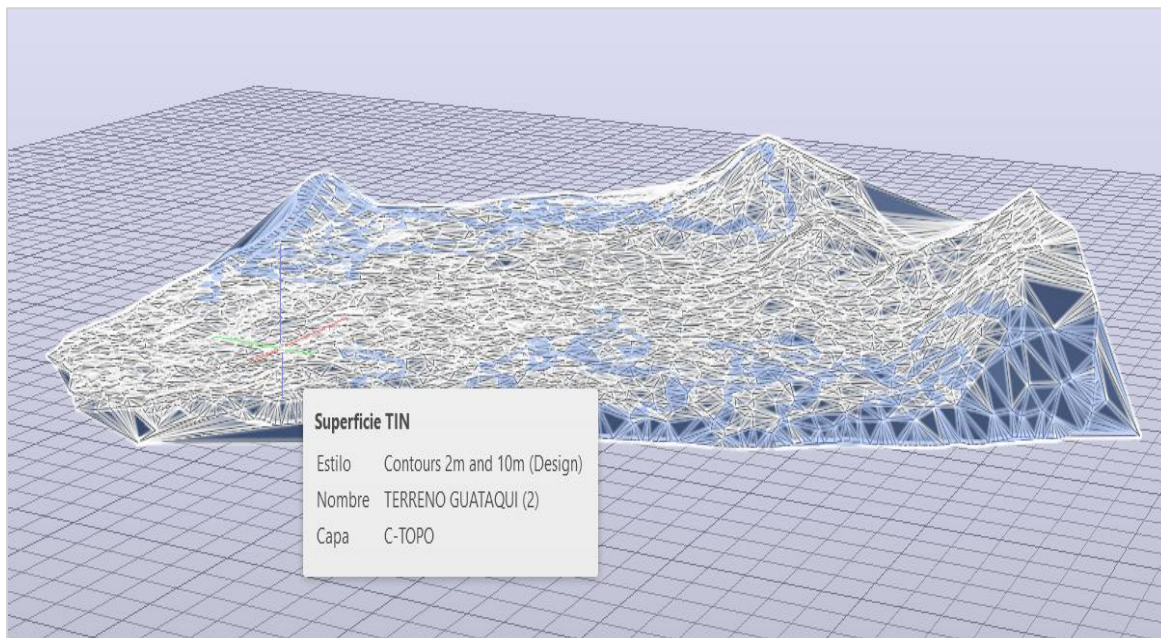


Fuente: Autores, información tomada de Civil 3D

Posteriormente, se procede a la creación de una superficie topográfica mediante la incorporación de las curvas de nivel previamente importadas, lo que permite una

representación detallada del relieve del terreno en 3D para su análisis y modelado como se indica en la ilustración 10.

**Figura 10. Superficie con curvas de nivel.**



Fuente: Autores, información tomada de Civil 3D

Una vez generada la superficie a partir de las curvas de nivel, se procede a importar la red de tuberías desde AutoCAD, manteniendo las coordenadas originales. A continuación, se selecciona la totalidad de la red y se genera una línea característica. Posteriormente, dicha línea característica es nuevamente seleccionada para proceder a la edición de elevaciones. En este proceso, se utiliza la opción de asignación de elevaciones desde la superficie, asegurando que toda la red sea seleccionada, sin incluir la inserción de puntos de discontinuidad de pendiente intermedia. Como resultado, se asignaron automáticamente las cotas a un total de 115 objetos encontrados. Finalmente, la red se descompone, transformando la línea característica en una polilínea 3D y se exporta a AutoCAD tal como se muestra en la ilustración 11.

**Figura 11. Red con cotas asignadas.**



Fuente: Autores, información tomada de AutoCAD

#### **8.2.4.2 Importación y exportación en EpaCAD.**

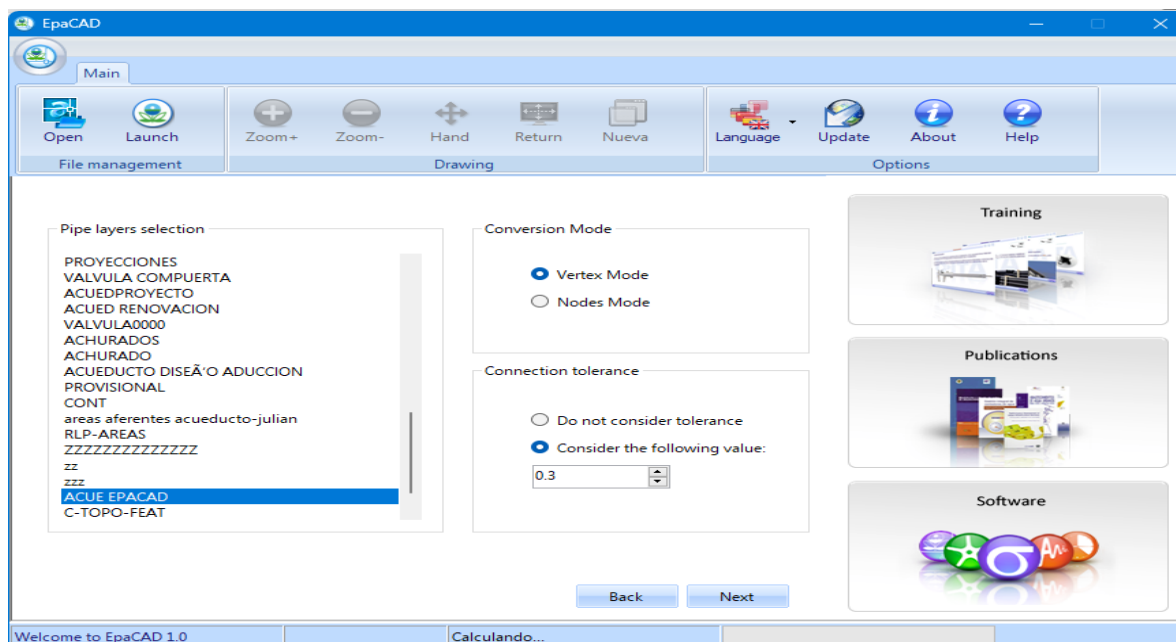
Una vez guardado el archivo desde AutoCAD en formato (DXF se emplea la herramienta EpaCAD para su importación y procesamiento. Durante este proceso, se presentan diversas opciones, incluidas todas las capas de trabajo previamente exportadas desde AutoCAD. Es fundamental seleccionar la capa específica asignada a las tuberías que serán modeladas en EPANET.

Dado que las tuberías están representadas mediante polilíneas, el software las interpreta como una única conducción continua, donde cada punto de unión entre polilíneas se transforma en un nodo. Esto implica que, por cada tubería, se generan dos nodos correspondientes a los puntos inicial y final de la conducción. Para garantizar la correcta extracción de las tuberías, se emplea el modo "vértice", el cual simplifica el modelo hidráulico al representar únicamente los nodos extremos y la tubería asociada (Instituto Tecnológico de Andalucía, 2009).

Asimismo, se establece un criterio de tolerancia para la conectividad de las tuberías, definiendo un umbral de 0,3 metros. Este parámetro permite al software determinar si dos tuberías están correctamente conectadas o, en su defecto, si existe una discontinuidad en la red (Instituto Tecnológico de Andalucía, 2009).

Finalmente, se realiza la previsualización de la configuración final de la red, lo que permite verificar gráficamente la correcta disposición de los elementos modelados. Una vez validado el esquema, el modelo es guardado en formato INP, compatible con el software EPANET, para su posterior análisis hidráulico y evaluación de escenarios. Esta etapa se ilustra en la Ilustración 12, donde se muestra la representación estructurada del sistema tras completar el proceso de modelación.

**Figura 12. Importación de red del municipio en EpaCAD**



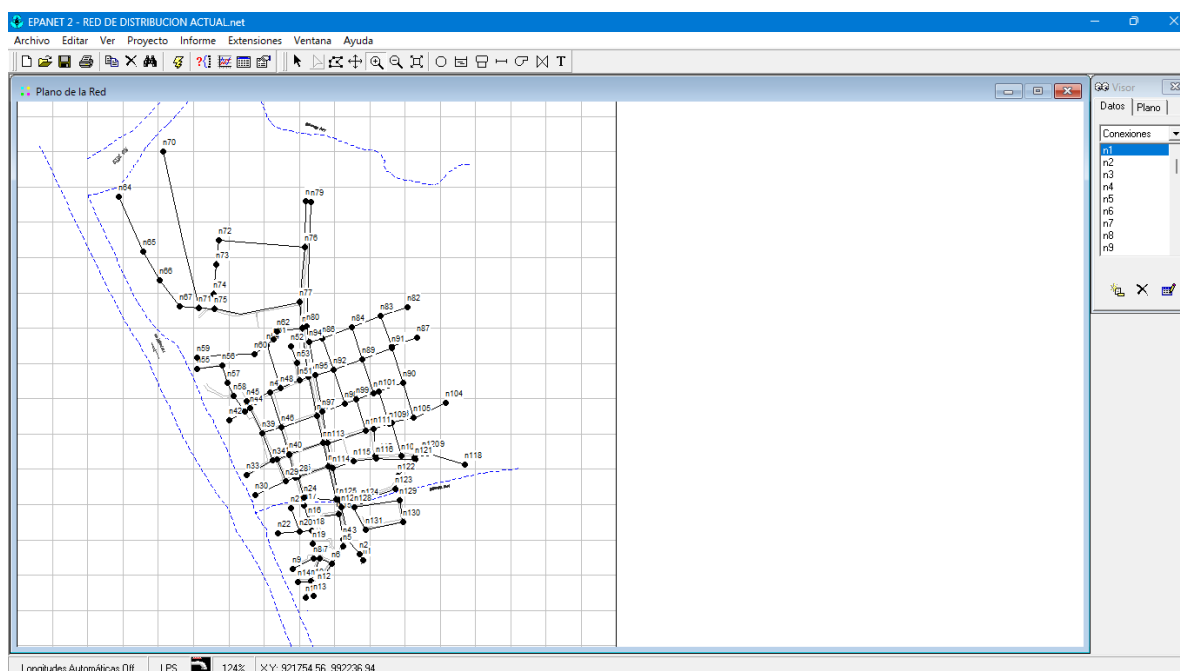
Fuente: Autores, información tomada de EpaCAD

#### **8.2.4.3 Importación en EPANET.**

Durante el proceso de importación de la red en EPANET, se selecciona el archivo en formato INP , el cual constituye el formato de exportación predeterminado en EpaCAD. Una vez completada la importación, se procede a la verificación de la correcta asignación de nodos y tuberías, contrastando la red importada con la representación original en AutoCAD.

Por último, se incorpora un mapa de fondo en EPANET, asegurando que este mantiene las dimensiones reales del área de estudio. Para ello, se parte del plano original en AutoCAD, el cual contiene las coordenadas y escala. Este plano se exporta en un formato de imagen compatible y posteriormente se ajusta dentro del entorno de EPANET. Este procedimiento permite que la visualización y modelado de la red de distribución de agua potable se realice con una referencia espacial, facilitando así la interpretación y análisis de la infraestructura hidráulica. Ver ilustración 13.

**Figura 13. Red importada con sus respectivas cotas y mapa de referencia.**



Fuente: Autores, información tomada de EPANET.

Una vez definida la configuración de la red, incluyendo la ubicación de los nudos, sus respectivas cotas altimétricas y las longitudes de las tuberías, se procede a la asignación de los diámetros correspondientes para cada tramo de tubería. Esta asignación se realiza tomando como base el catastro de redes proporcionado por el municipio, el cual contiene información técnica sobreactu, así como el análisis detallado del estado actual de la red de distribución. Este proceso resulta fundamental para garantizar que el modelo hidráulico refleje fielmente las condiciones reales del sistema y permita una evaluación precisa de su comportamiento bajo distintas condiciones de operación.

En la red de distribución se identifican cuatro diámetros nominales definidos por la prestadora de servicios públicos del municipio de Guataquí, todos en material PVC. Para garantizar la precisión en la simulación hidráulica, se realizó una consulta en el catálogo técnico del fabricante Pavco, a partir del cual se determinaron los diámetros internos reales de las tuberías. Posteriormente, estos valores fueron incorporados al modelo en EPANET de forma manual, asegurando una representación más precisa de las condiciones hidráulicas del sistema. Ver tabla 10.

Además, se modelan las válvulas existentes como válvulas de control tipo mariposa (TCV), y se asignan manualmente las demandas base en cada nodo, con base en la información contenida en la Tabla 9, lo que permite una representación más precisa del comportamiento hidráulico del sistema.

**Tabla 10. Catálogo de tuberías RDE 21 PAVCO PVC.**

| Diámetro nominal | Peso Aprox. | Diámetro exterior promedio |      | Espesores de paredes mínimo |      | Diámetro interior promedio |
|------------------|-------------|----------------------------|------|-----------------------------|------|----------------------------|
| in               | Kg/m        | mm                         | in   | mm                          | in   | mm                         |
| 2                | 0.81        | 60.32                      | 2.37 | 2.87                        | 0.11 | 54.58                      |
| 3                | 1.76        | 88.90                      | 3.50 | 4.24                        | 0.17 | 80.42                      |
| 4                | 2.90        | 114.30                     | 4.50 | 5.44                        | 0.21 | 103.42                     |
| 6                | 6.31        | 168.28                     | 6.62 | 8.03                        | 0.32 | 152.22                     |

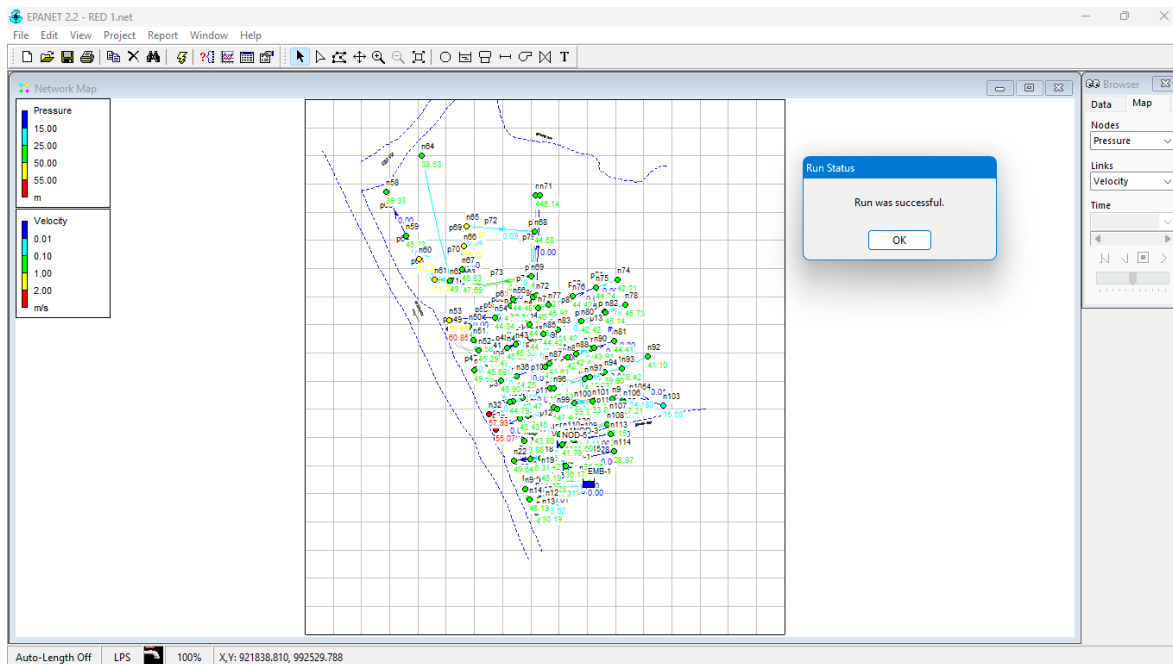
Fuente: Autores, información tomada de PAVCO

### 8.2.5 Simulación y análisis de la red actual.

Para la simulación hidráulica de la red de distribución, se seleccionó la modelación de un embalse en lugar de un reservorio convencional. Esta elección técnica permitió representar el comportamiento tanto estático como dinámico del sistema durante un período extendido de 24 horas, evitando la necesidad de integrar la modelación detallada de la red de aducción y las estaciones de bombeo. A través de este enfoque, se logró analizar la variabilidad de los caudales en función del tiempo, considerando los coeficientes de consumo previamente establecidos en el editor de patrones de consumo.

Es importante resaltar que la modelación hidráulica de la red fue desarrollada mediante la aplicación del método de Darcy-Weisbach, lo que permitió una estimación precisa de las pérdidas de carga considerando las características del flujo y las propiedades físicas de las tuberías. Una vez integrados los datos en el software de simulación, el sistema realizó un análisis detallado de la red de distribución, identificando la direccionalidad del flujo en cada tramo y calculando las presiones hidráulicas en los nodos, así como las velocidades del flujo en las tuberías. Este proceso permitió evaluar de manera integral el comportamiento hidráulico del sistema bajo las condiciones operacionales establecidas. Como resultado del análisis, el modelo hidráulico generó un mensaje de ejecución exitosa de la red de distribución. Como se muestra en la ilustración 14.

**Figura 14. Simulación red de distribución actual.**



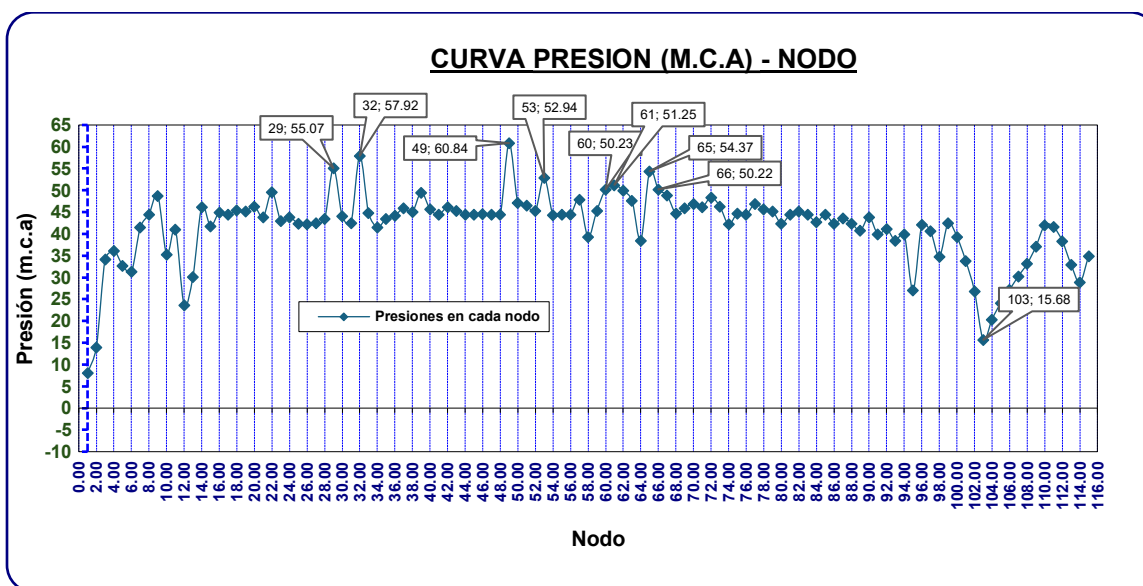
Fuente: Autores, información tomada de EPANET.

#### **8.2.5.1 Análisis estático red existente.**

En el análisis del comportamiento estático del sistema, correspondiente a las 00:00 horas, se identificaron sobrepresiones en los nodos 29, 32, 49, 53, 60, 61, 65 y 66, cuyos valores superan el límite máximo permitido de 50 m.c.a., conforme a los lineamientos técnicos establecidos en la Resolución 0799 de 2021 y la Resolución 0330 de 2017. Asimismo, se determinó que ciertos nodos presentan una presión inferior al mínimo reglamentario de 15 m.c.a.

No obstante, es importante señalar que los nodos 1 y 2 registran presiones por debajo del umbral mínimo; sin embargo, no se consideran relevantes en el análisis, ya que no cuentan con un área aferente ni abastecen a la población. Estos nodos fueron incorporados en la simulación exclusivamente para establecer las condiciones de elevación desde el tanque de almacenamiento (modelado como embalse) hasta el punto de conexión con la red de distribución. Ver grafica 1.

**Gráfica 1. Análisis estático – Presiones a las 00:00 horas.**



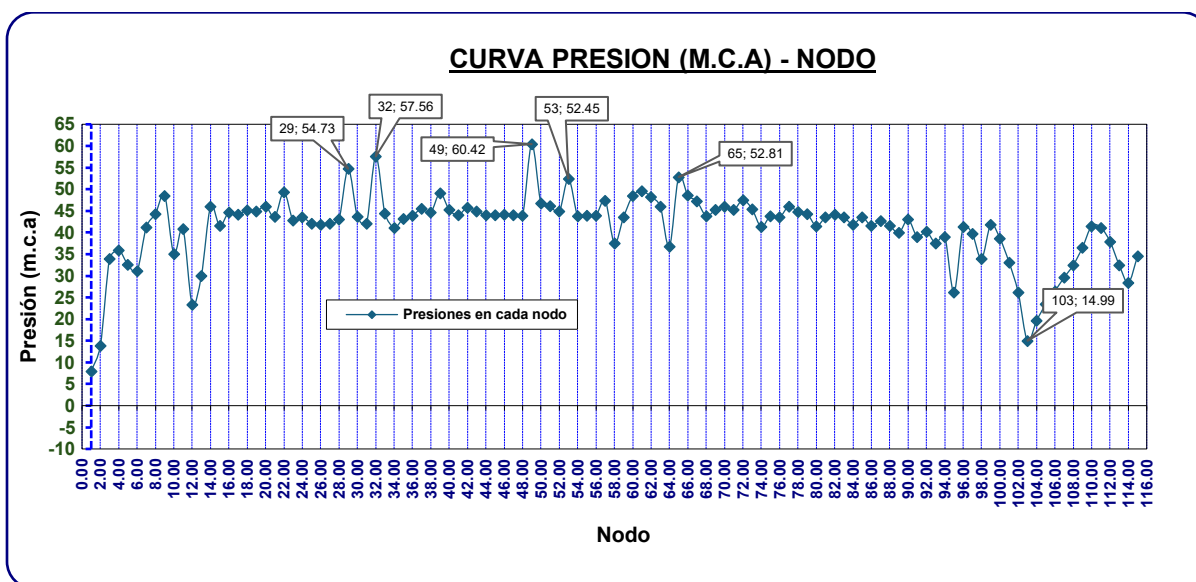
Fuente: Autores

### 8.2.5.2 Análisis dinámico.

En el marco del análisis del comportamiento dinámico del sistema, la representación gráfica de la curva de presión en función de los diferentes nodos constituye una herramienta fundamental para la evaluación del desempeño hidráulico de la red de distribución. Esta gráfica permite visualizar de manera clara y precisa las variaciones de presión a lo largo de todo el sistema, identificando tanto los puntos críticos con sobrepresiones como aquellos con deficiencias en el suministro. Asimismo, facilita la comprensión del comportamiento transitorio del flujo en condiciones reales de operación, lo cual resulta esencial para la toma de decisiones relacionadas con la optimización del diseño, la regulación de válvulas, la calibración de equipos y la priorización de intervenciones correctivas. A través de este análisis, es posible diagnosticar el estado actual de la red, prever posibles fallas y proponer soluciones técnicas que garanticen un funcionamiento eficiente, seguro y sostenible del sistema hidráulico.

A las 08:00 a.m., se observan condiciones críticas en ciertos nodos, evidenciando la presencia de sobrepresiones con valores que superan el límite máximo de 50 m.c.a., específicamente en los nodos 29 (54.73 m.c.a.), 32 (57.56 m.c.a.), 49 (60.40 m.c.a.), 53 (52.45 m.c.a.) y 65 (52.81 m.c.a.). Por otro lado, se identifica una presión en el nodo 103, con un valor de 14.99 m.c.a. ligeramente inferior al mínimo, como se indica en la gráfica 2.

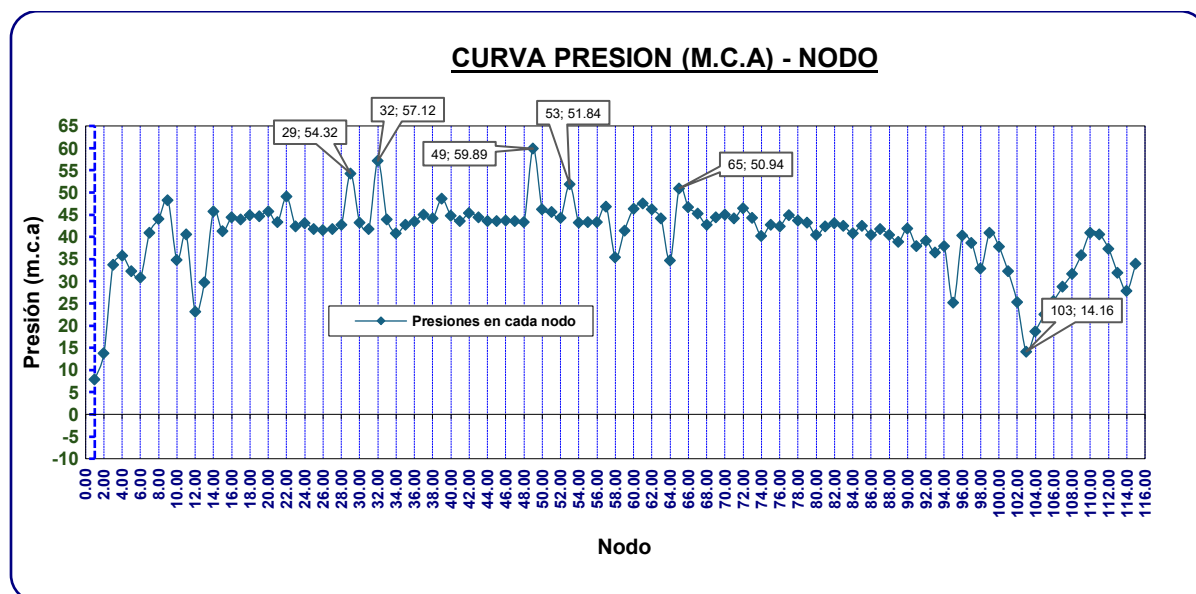
**Gráfica 2. Análisis dinámico – Presiones a las 8:00:00 A.M.**



Fuente: Autores

A las 10:00 a.m. se mantiene la tendencia de sobrepresiones en los nodos 29 (54.32 m.c.a.), 32 (57.12 m.c.a.), 49 (59.89 m.c.a.), 53 (51.84 m.c.a.) y 65 (50.94 m.c.a.), con una presión en el nodo 103 de 14.16 m.c.a como se indica en la gráfica 3.

**Gráfica 3. Análisis dinámico – Presiones a las 10:00:00 A.M.**

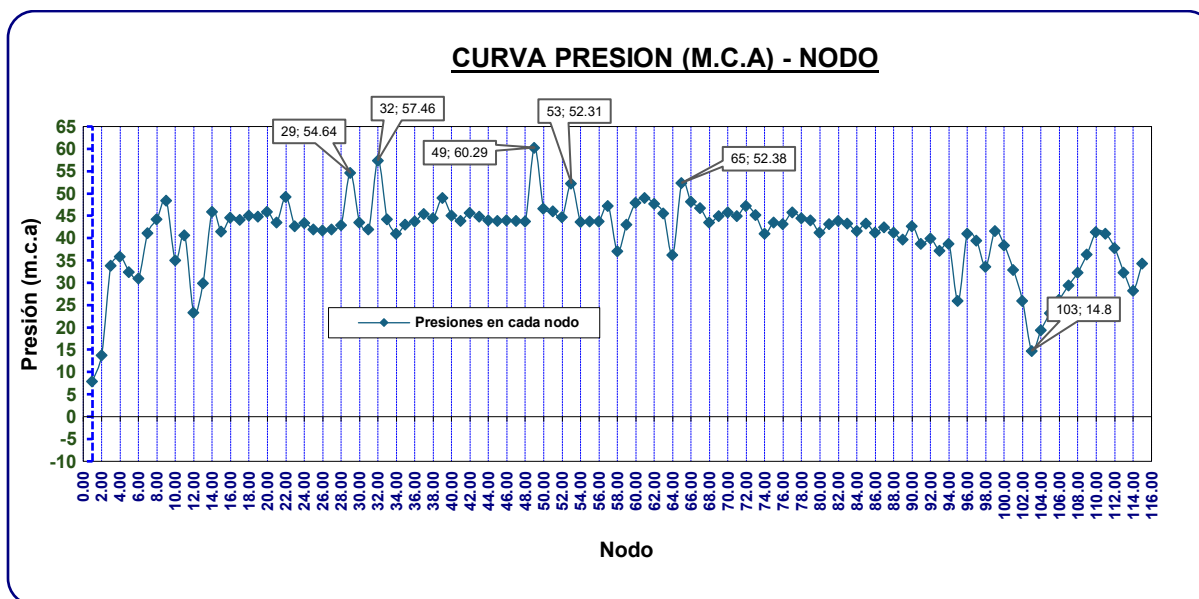


Fuente: Autores

A las 11:00 a.m., se evidencia una ligera disminución en los valores de sobrepresión registrados en la red de distribución. Sin embargo, a pesar de esta reducción, las presiones continúan superando el límite máximo recomendado en varios puntos críticos del sistema.

Específicamente, en los nodos 29 (54.64 m.c.a.), 32 (57.46 m.c.a.), 49 (60.29 m.c.a.), 53 (52.31 m.c.a.) y 65 (52.38 m.c.a.). En el nodo 103, la presión aumenta levemente a 14.80 m.c.a. Ver grafica 4.

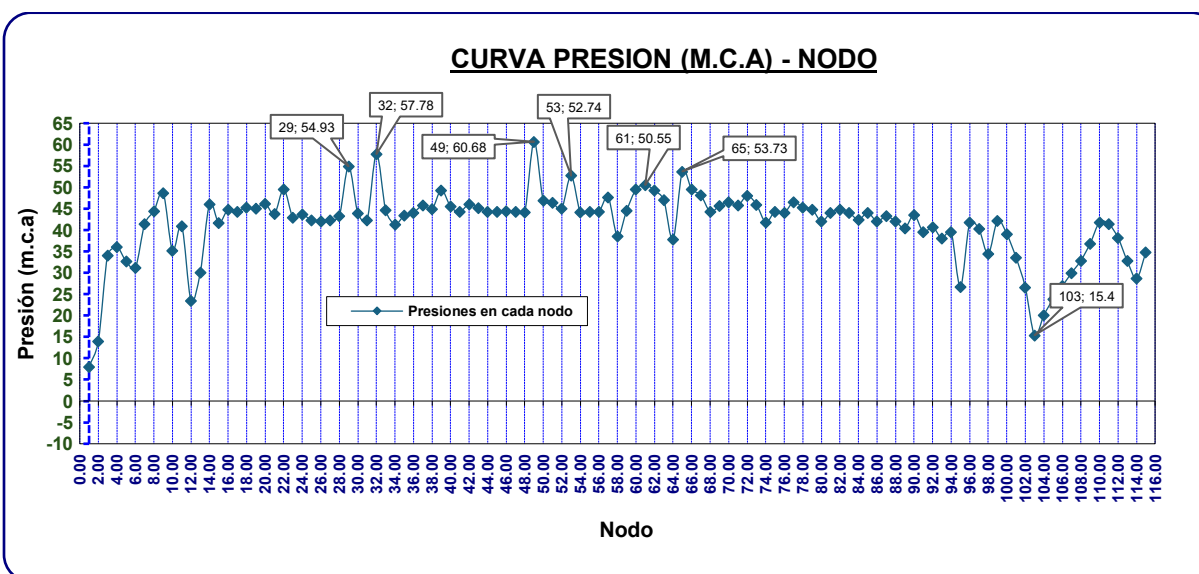
**Gráfica 4. Análisis dinámico – Presiones a las 11:00:00 A.M.**



Fuente: Autores

A las 12:00 p.m. los valores de sobrepresión se mantienen en los nodos 29 (54.93 m.c.a.), 32 (57.78 m.c.a.), 49 (60.68 m.c.a.), 53 (52.74 m.c.a.), 61 (50.55 m.c.a.) y 65 (53.73 m.c.a.), mientras que en el nodo 103 la presión es de 14.40 m.c.a., mostrando una ligera recuperación respecto a las horas anteriores debido a una disminución del consumo. Ver grafica 5.

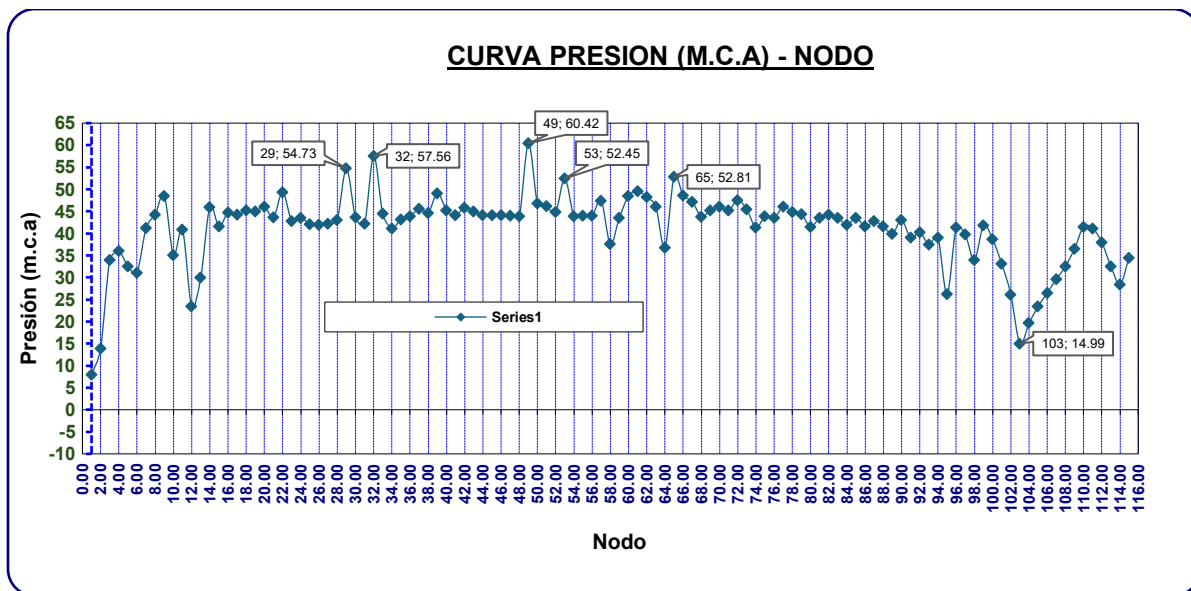
**Gráfica 5. Análisis dinámico – Presiones a las 12:00:00 P.M.**



Fuente: Autores

El comportamiento de la presión a la 01:00 p.m. presenta sobrepresiones en los nodos 29 (54.73 m.c.a.), 32 (57.56 m.c.a.), 49 (60.42 m.c.a.), 53 (52.45 m.c.a.) y 65 (52.81 m.c.a.). Se vuelve a registrar una leve pérdida de presión en el nodo 103 de 14.99 m.c.a. ver grafica 6.

**Gráfica 6. Análisis dinámico – Presiones a las 01:00:00 P.M.**



Fuente: Autores

### 8.2.6 Diagnóstico de la red existente.

El análisis de presión en la red de distribución de agua potable, tanto en condiciones estáticas como dinámicas, evidencia una tendencia reiterativa de sobrepresiones en los nodos 29, 32, 49, 53, 61, 65 y 66, lo cual sugiere un patrón hidráulico desfavorable asociado a la configuración actual de la red. Este fenómeno puede ocasionar esfuerzos excesivos en las tuberías, incrementando la probabilidad de fallas mecánicas y reduciendo la vida útil de las tuberías y accesorios. De acuerdo con (Montoya & Montoya, 2012) La identificación de estas sobrepresiones resalta la necesidad de implementar mecanismos de control adecuados, como válvulas reductoras de presión, para mitigar impactos negativos en el sistema.

Asimismo, se registran presiones por debajo del mínimo reglamentario en el nodo n103, condición que de acuerdo con (Redondo, 2017) puede atribuirse a un consumo elevado en algunos nodos o tramos, lo que provoca una pérdida de carga muy alta y por tanto una caída de presión.

El comportamiento de la presión a lo largo del día sigue un patrón predecible, caracterizado por valores máximos durante la madrugada, cuando la demanda es reducida, y descensos progresivos en las horas de mayor consumo. No obstante, la persistencia de sobrepresiones en determinados nodos sugiere deficiencias en la sectorización y regulación del sistema, lo

que subraya la necesidad de optimizar su operación para mejorar la eficiencia hidráulica y reducir riesgos operativos.

### **8.3 TERCERA FASE, PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Teniendo el modelo digital de la red de distribución de agua potable, se procede al desarrollo de la propuesta de optimización hidráulica, esta etapa tiene como finalidad mejorar el desempeño operativo del sistema, garantizando su funcionamiento eficiente, confiable y sostenible. La optimización se orienta a corregir deficiencias identificadas durante la simulación y análisis hidráulico, tales como sobrepresiones o desequilibrio de carga.

La propuesta se fundamenta en criterios técnicos establecidos por el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS), con el objetivo de cumplir los parámetros normativos relacionados con niveles de presión, continuidad del servicio, eficiencia de distribución y control de pérdidas. La aplicación de medidas correctivas se plantea bajo un enfoque sistemático, integrado en redimensionamiento de tuberías, la sectorización hidráulica, la incorporación de válvulas de control y regulación.

#### **8.3.1 Propuesta de optimización basado en el modelo digital.**

En el proceso de optimización de la red de distribución de agua potable (RDAP) del municipio de Guataquí, Cundinamarca, se implementaron ajustes que incluyeron cierre y modificación de tramos específicos de tubería, así como la sectorización del sistema mediante la conformación de una red matriz cerrada, este enfoque permite una mejor distribución de presiones, contribuyendo a la estabilidad operativa.

Como parte de estas acciones, se procedió al cierre de la red matriz en los nodos n70 y n71, mediante la apertura de la tubería p136, con un diámetro de 80.42 mm (3") y la inclusión de una válvula de rotura de carga (PBV), con una reducción de presión requerida de 10 m.c.a, esta configuración permitió la circulación por múltiples rutas, mantener presiones más uniformes en todos los puntos de conexión de las redes secundarias. Al estar interconectada, la red cerrada permite que en caso de una falla, mantenimiento o rotura en una tubería el flujo pueda dirigirse por otro tramo.

Además, como parte del proceso de optimización hidráulica, se implementó una modificación en el diámetro de los siguientes tramos presentados en la tabla 11.

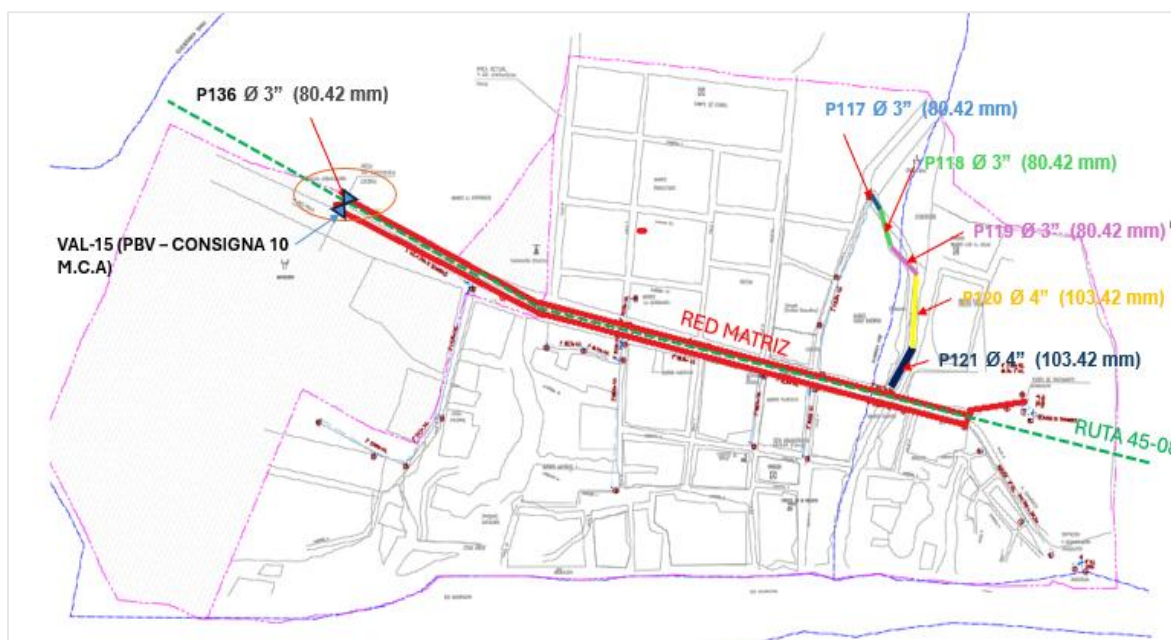
**Tabla 11. Tuberías a optimizar.**

| Tubería | Longitud (M) | Diámetro Existente (Mm) | Diámetro Proyectado (Mm) | Material Proyectado |
|---------|--------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|
| p121    | 59.54        | 54.58                   | 103.42                   | PVC                 |
| p120    | 101.3        | 54.58                   | 103.42                   | PVC                 |
| P119    | 36.38        | 54.58                   | 80.42                    | PVC                 |
| P118    | 67.18        | 54.58                   | 80.42                    | PVC                 |
| P117    | 6.64         | 54.58                   | 80.42                    | PVC                 |

Fuente: Autores

Las modificaciones en los tramos de tubería se efectuaron exclusivamente en cuanto al diámetro, conservando el tipo de material original, PVC, con el propósito de mantener la homogeneidad en las características hidráulicas de la red de distribución. Esta decisión técnica responde a la necesidad de preservar un coeficiente de rugosidad hidráulica bajo, propio del PVC, lo cual contribuye a minimizar las pérdidas de carga por fricción y a garantizar una mayor eficiencia en el transporte del caudal dentro del sistema. En la Ilustración 15 se presentan de forma detallada los cambios implementados en la Red de Distribución de Agua Potable (RDAP).

**Figura 15. Cambios realizados a la RDAP**



Fuente: Autores

Continuando con el proceso de optimización de la red de distribución de agua potable del municipio de Guataquí, se consideró inicialmente la posibilidad de reducir las sobrepresiones presentes en varios nodos mediante el reemplazo de las tuberías existentes por conducciones

de menor diámetro. Esta estrategia tenía como objetivo incrementar las pérdidas por fricción y, con ello, reducir los niveles de presión en los sectores afectados.

Sin embargo, tras un análisis técnico más detallado, esta alternativa fue descartada por diversas razones hidráulicas y operativas. En primer lugar, la disminución del diámetro de las tuberías incrementa significativamente las pérdidas de carga en todo el sistema, lo que podría comprometer la presión mínima requerida (15 m.c.a.) en zonas críticas, especialmente aquellas ubicadas a mayor altitud o alejadas del punto de alimentación. Esta condición afectaría directamente la continuidad y calidad del servicio, generando riesgos operacionales en algunos tramos de la red. Adicionalmente, reducir los diámetros comprometería la capacidad del sistema para satisfacer futuras demandas asociadas al crecimiento poblacional y a la expansión urbana.

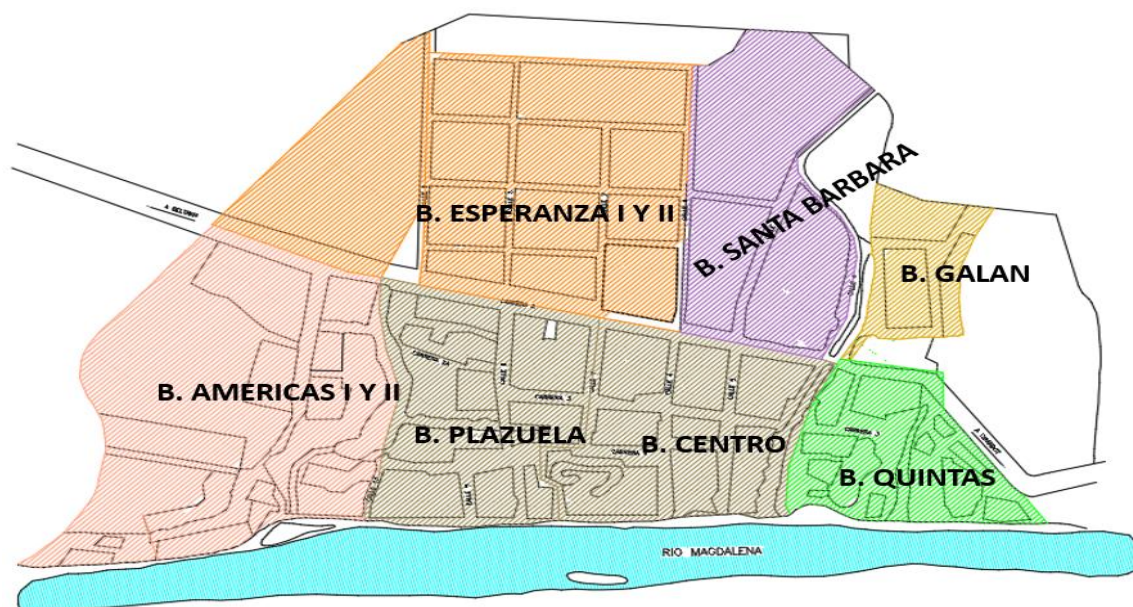
Por estas razones, se optó por conservar los diámetros existentes y, en su lugar, implementar medidas más sostenibles y técnicas. En este sentido, se adoptaron medidas como la sectorización hidráulica y la incorporación de válvulas tipo PBV (Pressure Breaker Valve), las cuales permiten mitigar las sobrepresiones persistentes en tramos específicos de la red sin requerir mecanismos de regulación dinámica continua. A diferencia de las válvulas reguladoras de presión convencionales (PRV), las PBV generan una pérdida de carga fija y localizada, permitiendo reducir la presión en puntos estratégicos del sistema y contribuyendo a la estabilidad operativa de la red sin comprometer su eficiencia hidráulica.

#### **8.3.1.1 Sectorización de la red de distribución e incorporación de válvulas.**

La sectorización consiste en la identificación y delimitación de áreas homogéneas dentro de la red de acueducto, con el objetivo de facilitar el monitoreo y control del sistema. Esta estrategia permite gestionar de manera más eficiente las pérdidas y fugas de agua, así como facilitar las labores de mantenimiento preventivo y las reparaciones, sin afectar la continuidad del servicio, lo cual es fundamental para la optimización del mismo.

Con base en las condiciones comerciales, físicas e hidráulicas del municipio, se plantea una propuesta de sectorización del sistema de acueducto, la cual se estructura en 6 sectores operativos, representados en la ilustración 16.

**Figura 16. Sectorización.**



Fuente: Autores, información tomada de EOT del municipio

A continuación, se detallan los datos de entrada empleados para la modelación de la sectorización del sistema:

❖ **Válvulas de mariposa:** Se incorporaron válvulas tipo TCV de mariposa, con diámetros que oscilan entre 2" y 6", ubicadas estratégicamente en los puntos de alimentación de los distintos sectores, incluyendo la red matriz. Para cada sector se dispusieron válvulas en dos puntos específicos. En la ilustración 17 se observa la localización de las válvulas TCV.

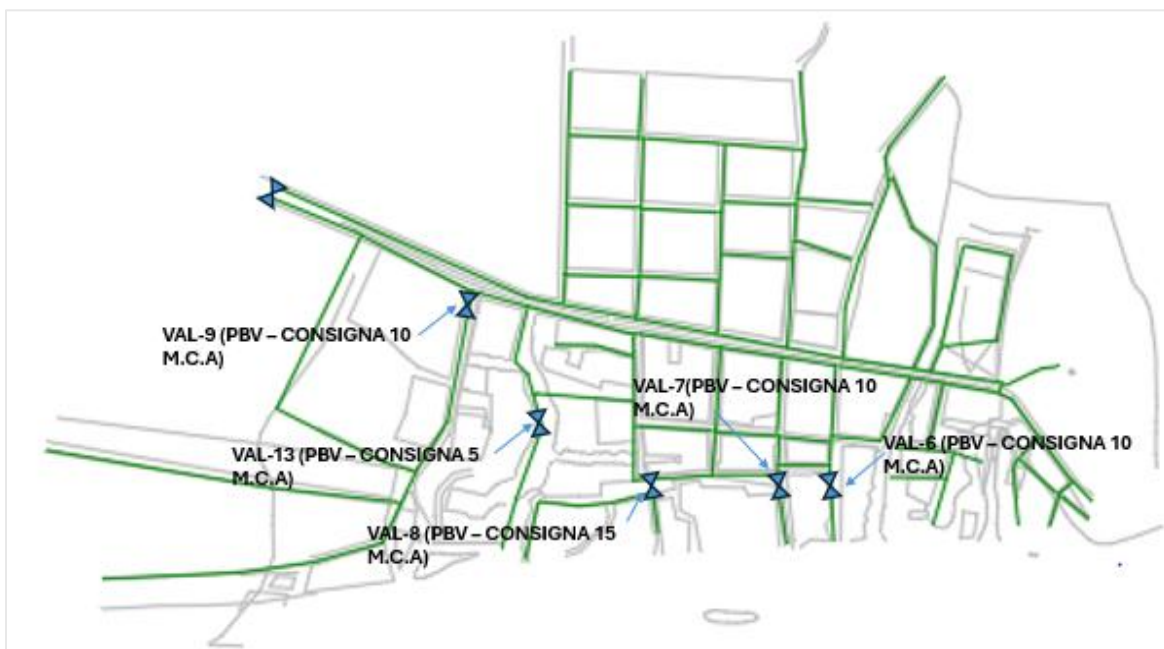
**Figura 17. Esquema localización válvulas TCV.**



Fuente: Autores, información tomada de AutoCAD

❖ **Válvulas de rotura de carga:** Para mantener controlada las presiones en los nodos 29, 32, 49, 53, 61, 65 y 66, se modelaron válvulas PBV con una reducción de presión requerida entre 5 m.c.a y 15 m.c.a, esta configuración permitió mantener presiones dinámicas más uniformes dentro de la red. En la ilustración 18 se observa la localización de las válvulas PBV.

**Figura 18. Esquema localización válvulas PBV**



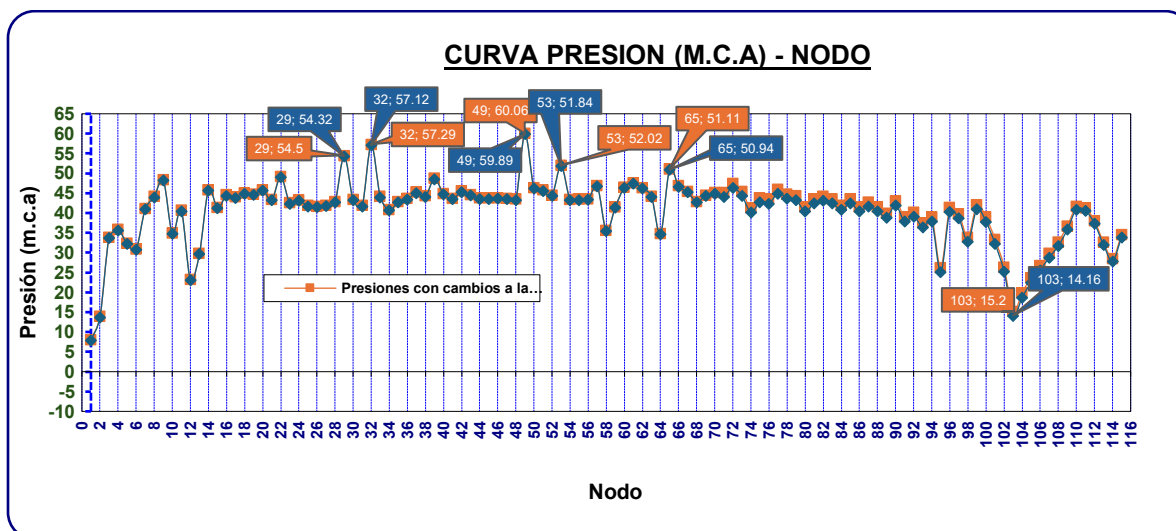
Fuente: Autores, información tomada de AutoCAD

### **8.3.2 Análisis de resultados.**

Una vez implementada la propuesta de optimización hidráulica, modelada digitalmente a través del software EPANET, se evidenció una mejora significativa en el desempeño operativo de la red de distribución de agua potable del municipio de Guataquí.

En primer lugar, se procedió a ejecutar el análisis hidráulico correspondiente a las horas de máxima demanda, identificándose las 10:00:00 a.m. como el periodo crítico según los resultados del análisis dinámico. La conformación de una red matriz cerrada permitió que cada sector pueda abastecerse por múltiples trayectorias, contribuyendo a una distribución más uniforme de presiones en los distintos nodos. Además, aumentar el diámetro de la tubería mejora el flujo del agua a través del sistema, pues con un diámetro más grande, hay menos resistencia al flujo, lo que significa que se requiere menos energía para transportar el mismo volumen de fluido. En esta condición, las presiones registradas en los nodos del sistema se encuentran por encima del mínimo establecidos por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). En la gráfica 7 se presenta una comparación entre los valores de presión antes de la intervención, identificados como “Presiones en RDA existente”, y los resultados posteriores al aumento de diámetro de tubería y conformación de la red matriz cerrada, denominados “Presiones con cambios a la RDAP”, evidenciando una mejora en la distribución de presiones en el sistema.

**Gráfica 7. Comparación red existente y red con modificaciones – Presiones a las 10:00:00 A.M.**



Fuente: Autores

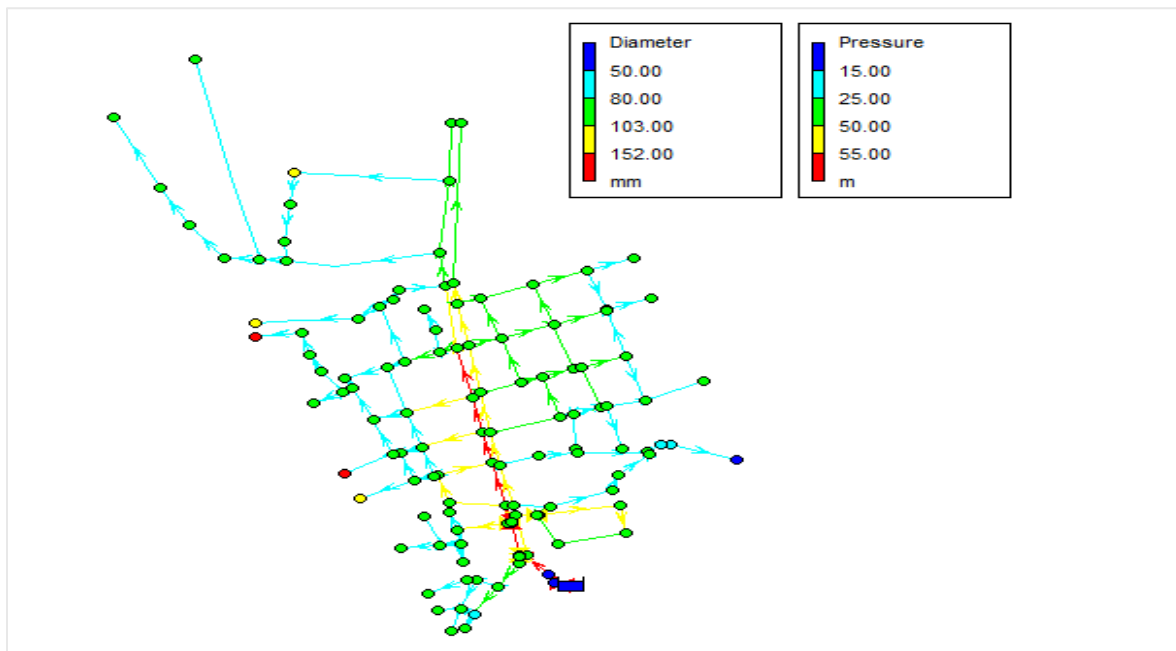
En segundo lugar, se llevó a cabo la sectorización hidráulica de la red, fundamentada en criterios físicos, topográficos y operacionales. Esta consistió en la división del sistema en seis sectores hidráulicamente independientes, delimitados mediante válvulas TCV, con el objetivo de facilitar el monitoreo del comportamiento del sistema y optimizar su operación. Dicha estrategia permite que si se presenta algún daño en la red de los sectores no interfiera en el servicio de la red principal. Complementariamente, se incorporaron válvulas de rotura de carga tipo PBV en tramos donde se presentaban sobrepresiones persistentes, estas válvulas introducen una pérdida de carga localizada, sin requerir regulación continua aguas abajo como las válvulas reguladoras convencionales (PRV), proporcionando un mecanismo eficiente para el control de presiones elevadas sin afectar negativamente el funcionamiento general del sistema.

En tercer lugar, se verificó que los 115 nodos analizados en periodo extendido de 24 horas se encuentran dentro del rango de presiones estipulado por las Resoluciones 0799 de 2021 y 0330 de 2017, las cuales establecen un valor máximo admisible de 50 metros de columna de agua (m.c.a). En este sentido, la presión más alta registrada a las 10:00:00 A.M en el sistema de distribución fue precisamente de 49.13 m.c.a. Por otra parte, considerando que la normativa fija un valor mínimo de 15 m.c.a, se constató que la presión más baja registrada en la modelación fue de 15.11 m.c.a, garantizando así el cumplimiento de los parámetros regulatorios establecidos para el adecuado funcionamiento del sistema de acueducto.

En la Ilustración 15 se expone de manera detallada la configuración actual de la red de distribución de agua potable del municipio, la cual evidencia las condiciones operativas existentes antes de cualquier tipo de intervención. Por otro lado, en la Ilustración 16 se presenta la propuesta de red optimizada, la cual fue desarrollada a partir de un proceso de análisis hidráulico exhaustivo y constituye el resultado directo de las intervenciones planteadas con el fin de mejorar la eficiencia, cobertura y desempeño general del sistema. Esta nueva

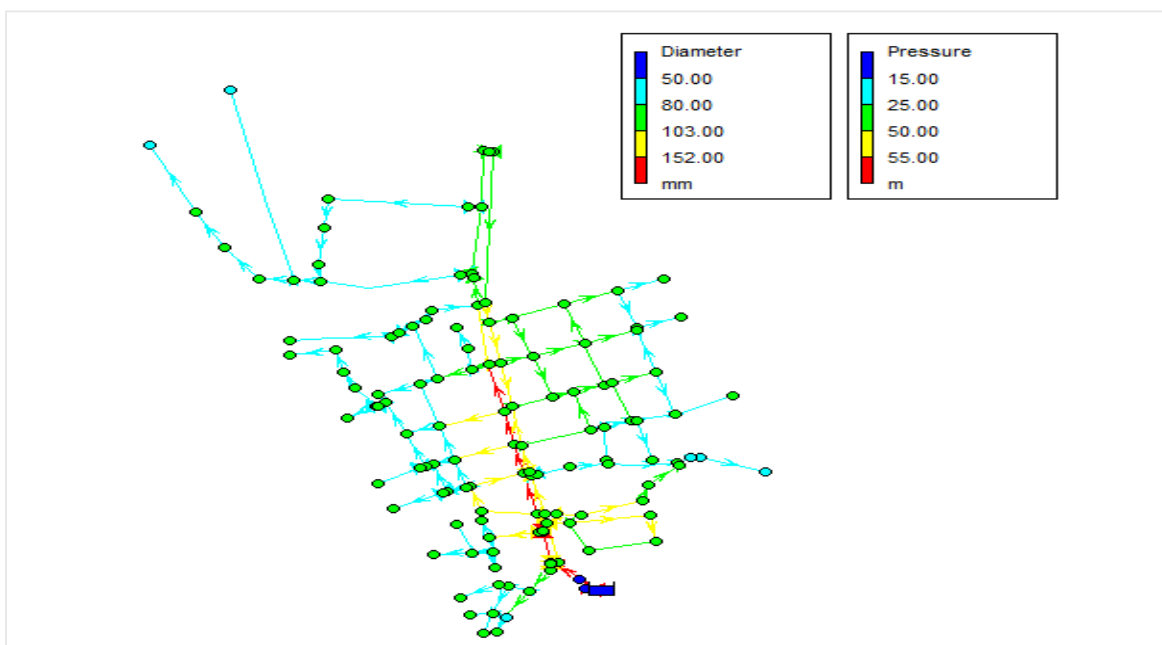
configuración busca corregir las deficiencias identificadas, garantizar una distribución más equitativa del recurso hídrico y asegurar un funcionamiento sostenible a largo plazo.

**Figura 15. Red de distribución actual.**



Fuente: Autores, información tomada de EPANET.

**Figura 16. Red de distribución optimizada**



Fuente: Autores, información tomada de EPANET.

## 9. CONCLUSIONES

El análisis integral de la red de distribución de agua potable del municipio de Guataquí, Cundinamarca, se desarrolló a partir de la información recolectada en campo y de los datos suministrados por la empresa prestadora del servicio. Esta etapa fue esencial para llevar a cabo el diagnóstico del estado actual del sistema, permitiendo identificar deficiencias operativas. Con base en este diagnóstico, se procedió a la construcción, calibración y validación del modelo hidráulico digital, el cual sirvió como herramienta técnica para simular el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones y proponer el escenarios de optimización.

La evaluación detallada de la demanda actual del sistema permitió establecer las necesidades reales del servicio, basándose en los lineamientos establecidos por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), así como en la información demográfica suministrada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Este análisis fue esencial para garantizar que la propuesta de optimización respondiera a las condiciones actuales. Como resultado de este análisis, se determinó un caudal requerido de 7.66 litros por segundo para atender una población urbana de 1848 personas.

En el desarrollo del modelo de simulación digital de la red existente se tuvieron que tomar decisiones técnicas ante la falta de información actualizada, lo cual representó una limitación en el proceso de calibración. Para lograr una mayor precisión en el modelo hidráulico, resulta fundamental disponer de información detallada y actualizada sobre las condiciones reales de la red, lo cual permitirá mejorar su representación y acercarla de manera más fiel al comportamiento operativo real del sistema en campo.

Finalmente, mediante la construcción del modelo hidráulico en EPANET, se logró simular el comportamiento del sistema bajo un escenario de optimización. Esto permitió validar la efectividad de las estrategias propuestas, como la conformación de una red matriz cerrada, el aumento de diámetros en tramos críticos y la sectorización hidráulica e incorporación de válvulas de control. La propuesta optimizada demostró mejoras sustanciales en la distribución de presiones, reducción de pérdidas de carga y mayor estabilidad del sistema, consolidándose como una solución técnica integral y sostenible para mejorar la eficiencia y confiabilidad del servicio de agua potable en el municipio.

## 10. RECOMENDACIONES

- ❖ Es fundamental realizar una actualización catastral de la red de acueducto, considerando que con el paso del tiempo pueden haberse efectuado modificaciones o ampliaciones que no se encuentran registradas en el presente trabajo.
- ❖ Se sugiere incorporar en los análisis de demanda la influencia de la población flotante, como los turistas que visitan el municipio durante los festivos o festividades especiales, ya que su presencia puede generar picos significativos en el consumo y afectar la eficiencia del sistema si no se prevé adecuadamente.
- ❖ Se recomienda evaluar detalladamente los materiales existentes en la infraestructura de la red, con el fin de identificar oportunidades de mejora que incrementen el rendimiento hidráulico y la vida útil del sistema.
- ❖ Se plantea la necesidad de modernizar y mantener actualizados los sistemas de información de la entidad prestadora del servicio público, lo cual permitirá un control más preciso sobre el volumen de agua distribuida y mejorará la eficiencia operativa del sistema.
- ❖ Se recomienda que en futuros trabajos de grado se incluya la modelación del comportamiento operativo de la estación de bombeo, con el fin de programar y optimizar su funcionamiento en función de las demandas del sistema. Asimismo, se sugiere realizar un análisis presupuestal de las distintas modificaciones e incorporaciones de elementos hidráulicos a la red de distribución de agua potable (RDAP), con el objetivo de identificar alternativas más eficientes en términos técnicos y económicos, lo que contribuiría a una mejor planificación de inversiones y a la sostenibilidad financiera del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

*Epacad.com*. (2009). Recuperado el 21 de marzo de 2025, de <https://epacad.com/readfile.php?help=1>

Higuera Romero, J. (s.f). *Repositorio Institucional Universidad Santo Tomas*. Recuperado el 09 de Septiembre de 2024, de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/37786/2021jeimmyhiguera7.pdf>

Aguares residuales. (2024). Tendencias del agua en las redes de agua potable para 2024: Eficiencia y Sostenibilidad. *Aguaresresiduales.info*. Recuperado el 23 de abril de 2025, de <https://www.aguaresresiduales.info/revista/noticias/tendencias-del-agua-en-las-redes-de-agua-potable-p-lryMp>

Albuja, C., Pinos, C., & Samaniego, J. (s.f.). *Uso de desarenadores en abastecimiento de agua potable*. Recuperado el 18 de septiembre de 2024, de galileo: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30010/1/172-631-1-PB.pdf>

American water works association. (01 de enero de 2023). *American water works association*. Obtenido de <https://www.awwa.org/>

Arellano, M. A. (2022). Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable. Editorial Abya-Yala. Recuperado el 18 de septiembre de 2024, de <https://books.scielo.org/id/m8d8m/pdf/araque-9789978108208-05.pdf>

Barrachina, A. B. (2019). *Proyecto de rediseño de la red de suministro de agua de la Comarca del Alto Palancia*. (U. P. València, Ed.) Recuperado el 18 de septiembre de 2024, de [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/160058/35604703\\_TFG-M\\_15991237987867688204825786914929.pdf;jsessionid=C526C83E355F95DEEBD07152932EC455?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/160058/35604703_TFG-M_15991237987867688204825786914929.pdf;jsessionid=C526C83E355F95DEEBD07152932EC455?sequence=1)

Beltrán, N. A., & Abril, G. J. (2014). *Repositorio Institucional Universidad Catolica de Colombia*. Recuperado el 09 de Septiembre de 2024, de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/f1ab9835-5a93-4014-9207-1d5bc6efdf22/content>

Bonilla, C. A., & Sanchez Tapiero, D. I. (2024). Confección de modelos hidráulicos y análisis de calidad del agua en redes de distribución con QGIS. *XXV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA*. Bogota: Sociedad colombiana de Ingenieros. Recuperado el 23 de abril de 2025, de [https://www.researchgate.net/publication/381610377\\_Confeccion\\_de\\_modelos\\_hidraulicos\\_y\\_analisis\\_de\\_calidad\\_del\\_agua\\_en\\_redes\\_de\\_distribucion\\_con\\_QGIS](https://www.researchgate.net/publication/381610377_Confeccion_de_modelos_hidraulicos_y_analisis_de_calidad_del_agua_en_redes_de_distribucion_con_QGIS)

*Constitucion politica de colombia* . (1991). Recuperado el 01 de 09 de 2024, de Artículo 365: <https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/cpcapitulo5publicos.pdf>

Crane. (1989). *Flujo de fluidos en valvulas, accesorios y tuberias*. McGraw-Hill. Recuperado el 09 de septiembre de 2024, de PDF DRIVE: [https://www.academia.edu/7436924/1\\_Flujo\\_de\\_Fluidos\\_en\\_valvulas\\_Accesorios\\_y\\_Tuberias\\_Crane\\_Mc\\_Graw\\_Hill](https://www.academia.edu/7436924/1_Flujo_de_Fluidos_en_valvulas_Accesorios_y_Tuberias_Crane_Mc_Graw_Hill)

DANE. (s.f.). *Dirección Nacional de Estadística*. Recuperado el 01 de Septiembre de 2024, de <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/CNPV-2018-NBI.xlsx>

DANE. (s.f.). *Dirección Nacional de Estadística* . Recuperado el 01 de Septiembre de 2024, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

Díaz Castañeda, R. E. (24 de enero de 2023). *Método experimental para validar la confianza en la información obtenida en campo, necesaria para calibrar los modelos hídricos e hidráulicos, logrando resultados más ajustados a la realidad*. Recuperado el 23 de abril de 2025, de Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/server/api/core/bitstreams/d4337a3a-15fb-4007-a5d6-c0978066cb8f/content>

*Gestor Normativo de la CRA - Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*. (s.f.). Recuperado el 30 de septiembre de 2024, de Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico CRA: [https://normas.cra.gov.co/gestor/alca\\_cto\\_reglamento\\_tecnico\\_sector\\_agua\\_potable\\_saneamiento\\_basico\\_ras.html](https://normas.cra.gov.co/gestor/alca_cto_reglamento_tecnico_sector_agua_potable_saneamiento_basico_ras.html)

Gil, J. P. (14 de marzo de 2025). Expertos hacen llamado a avanzar en gestión hídrica frente a la crisis de agua en Bogotá. *La FM*. Recuperado el 23 de abril de 2025, de <https://www.lafm.com.co/bogota/expertos-hacen-llamado-a-avanzar-en-gestion-hidrica-frente-a-la-crisis-de-agua-en-bogota>

Gobierno de colombia. (s.f.). *Funcion Publica*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=342>

*Gobierno Municipal del cantón Manta*. (2017). Recuperado el 09 de Septiembre de 2024, de <https://manta.gob.ec/db/ARCHIVOS-Procesos%20de%20Licitaci%C3%B3n%20Internacional%20con%20Financiamiento%20del%20Banco%20Europeo%20de%20Inversiones%20%28BEI%29%20para%20tareass%20de%20Reconstrucci%C3%B3n/2022/nb-01/04-NORMAS%20Y%20PROCEDIMIENTO%20DE%20DISE%20>

Gómez Zambrano, H. J., López Ríos, V. I., & Toro Botero, F. M. (2017). Nueva metodología para la calibración de modelos hidrodinámicos en el flujo a superficie libre en canales curvos.

*Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 82-91. Recuperado el 23 de abril de 2025, de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/323282>

*Guataqui.gov.com*. (09 de agosto de 2018). Recuperado el 01 de 09 de 2024, de <http://www.guataqui-cundinamarca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>

Idrica. (2024). Desafíos y soluciones en la gestión de recursos hídricos en 2024. *Aguasresiduales.info*. Recuperado el 23 de abril de 2025, de <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/desafios-y-soluciones-en-la-gestion-de-recursos-hi-kSLlr>

La Secretaría del CBD. (2010). *la Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica (SCDB)*. Recuperado el 01 de Septiembre de 2024, de <https://www.cbd.int/development/doc/cbd-good-practice-guide-water-booklet-web-es.pdf>

*Las Naciones Unidas*. (2022). Recuperado el 15 de Septiembre de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2009). *Funcion publica*. Recuperado el 19 de marzo de 2025, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=38487>

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2003). *minvivienda.gov.co*. Recuperado el 25 de marzo de 2025, de [https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/guia-ras\\_003.pdf](https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/guia-ras_003.pdf)

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Ministerio de vivienda de Colombia*. Recuperado el 09 de Septiembre de 2024, de <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/0330-2017.pdf>

Minvivienda. (2025). *Ruta ComuniAgua*. Obtenido de Ministerio de vivienda, ciudad y territorio : <https://www.minvivienda.gov.co/ruta-comuniagua>

Monsalve, J. p., Reyes, G. p., & Ruiz, C. A. (2017). *Diagnostico del estado actual de redes y evaluacion tecnicoeconomica de las alternativas para la optimizacion del sistema de acueducto del municipio de anapoima*. Recuperado el 02 de septiembre de 2024, de <https://core.ac.uk/download/143468558.pdf>

Montoya, L., & Montoya, R. (2012). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. Recuperado el 03 de abril de 2025, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-33242012000100007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242012000100007)

OPS/OMS. (s.f). *Organizacion Panamericana de la salud*. Recuperado el 01 de Septiembre de 2024, de <https://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento>

Organización Internacional de Normalización. (2024). Actividades relacionadas con los servicios de agua potable y aguas residuales — Directrices para la evaluación y la mejora del servicio a los usuarios. *ISO 24510:2024*. Recuperado el 23 de enero de 2024, de <https://www.iso.org/standard/81484.html>

Organizacion mundial de la salud. (15 de febrero de 2024). La OMS publica directrices y herramientas para mejorar los pequeños suministros de agua. *World health organization* . Recuperado el 23 de abril de 2025, de <https://www.who.int/kiribati/news/detail-global/15-02-2024-who-releases-guidelines-and-tools-to-enhance-small-water-supplies>

Ortiz, D. C., & Manzuera, S. B. (febrero de 2014). *PROYECTO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO DEL ACUEDUCTO COMUNITARIO SANTIAGO LONDOÑO, EN EL MUNICIPIO DE DOSQUEBRADAS RISARALDA*. Obtenido de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17134/PROYECTO%20DE%20DIAGN%C3%93STICO%20T%C3%89CNICO%20DEL%20ACUEDUCTO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ostfeld, a. (2014). Water distribution networks. En *Studies in computational intelligence* (págs. 101-124). Recuperado el 18 de septiembre de 2024, de [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-44160-2\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-44160-2_4)

Peralta, J. L., Ruiz, C. D., & hernandez, M. J. (2007). *Diagnostico y evaluacion tecnica del sistema de acueducto urbano del municipio de sampues, sucre*. Recuperado el 02 de septiembre de 2024, de Repositorio universidad de sucre: <https://repositorio.unisucre.edu.co/server/api/core/bitstreams/46fed290-1d36-46d6-886a-485dab384d54/content>

Ramírez, C. A. (2021). *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico*. Universidad de medellin. Recuperado el 30 de septiembre de 2024, de <https://unilibros.co/gpd-calidad-del-agua-evaluacion-y-diagnostico.html>

Redondo, M. (2017). *iAgua*. Recuperado el 03 de abril de 2025, de <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/presiones-negativas-tuberias>

Rincón, L. W., & Córdoba, M. W. (2017). *Repositorio Institucional Universidad Catolica de Colombia*. Recuperado el 09 de Septiembre de 2024, de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/bd50c980-a575-4bb8-8b32-802507e2af41/content>

Rios Avila, A., & Rodriguez Tafur, A. D. (18 de Julio de 2016). *Repositorio Institucional de la Universidad Francisco José de Caldas*. Recuperado el 02 de Septiembre de 2024, de <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/c5d1e905-3163-4eae-9042-fa7d146a9118/content>

Rodríguez, A. D., & Ríos, A. (2016). *Repositorio universidad distrital francisco José de caldas*. Recuperado el 03 de Marzo de 2025, de <http://hdl.handle.net/11349/7146>

Romero, F. H. (2005). *Acueductos: teoría y diseño*. medellin: Universisdadde medellin. Recuperado el 01 de 09 de 2024, de <https://books.google.hn/books?id=194g9lx5vpcC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Sadiq, R., Rajani, B. B., & Kleiner, Y. (2004). *Risk analysis for water quality deterioration in distribution networks*. Obtenido de Canada.ca: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=34b35202-507c-462b-b040-15e28f30648a>

Sampiere, R. h. (2014). *Metodologia de la Investigacion*. McGRAW-HILL. Recuperado el 20 de octubre de 2024, de <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>

Sánchez Tapiero, D. I., Peña Cortés, C. A., & Ramón Valencia, J. D. (2023). Herramienta de apoyo para la calibración de modelos numéricos de sistemas de drenaje en ambientes urbanos empleando procesamiento digital de imágenes. *Respuesta UFPS*. Recuperado el 23 de abril de 2025, de <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/respuestas/article/view/4417/5541>

Tamayo y Tamayo, M. (2001). *El proceso de la investigación científica*. Editorial Limusa. Recuperado el 20 de octubre de 2024, de [https://books.google.com/cu/books/about/El\\_proceso\\_de\\_la\\_investigaci%C3%B3n\\_cient%C3%ADf.html?id=BhymmEqkkJwC&redir\\_esc=y](https://books.google.com/cu/books/about/El_proceso_de_la_investigaci%C3%B3n_cient%C3%ADf.html?id=BhymmEqkkJwC&redir_esc=y)

Telencuestas. (2024). *Telencuestas.com*. Recuperado el 01 de Septiembre de 2024, de <https://telencuestas.com/censos-de-poblacion/colombia/2024/cundinamarca/guataqui>

*Tutoriales al Día - Ingeniería Civil*. (2012). Recuperado el 25 de marzo de 2025, de <https://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/red-de-distribucion-de-agua-potable-abierta-o-cerrada/>

Twyman, J. (28 de abril de 2017). *Análisis del golpe de ariete en un sistema de distribución de agua*. Recuperado el 18 de septiembre de 2024, de Ingeniería del Agua: [https://watermark.silverchair.com/ia20176389.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9kkhW\\_Ercy7Dm3ZL\\_9Cf3qfKAc485ysgAAAwQwggMABgkqhkiG9w0BBwagggLxMIIC7QIBADCCAUYGCSqGSIB3DQEHATAeBgIghkgBZQMEAS4wEQQMekazVM0Z9RRba24\\_AgEQgIIctx7yid3jgqTqrDF-l8c76TTrIEGyfp45ze6LUcxYv6hM](https://watermark.silverchair.com/ia20176389.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9kkhW_Ercy7Dm3ZL_9Cf3qfKAc485ysgAAAwQwggMABgkqhkiG9w0BBwagggLxMIIC7QIBADCCAUYGCSqGSIB3DQEHATAeBgIghkgBZQMEAS4wEQQMekazVM0Z9RRba24_AgEQgIIctx7yid3jgqTqrDF-l8c76TTrIEGyfp45ze6LUcxYv6hM)

*Universidad Piloto de Colombia*. (2019). Recuperado el 2024, de <https://girardot.unipiloto.edu.co/wp-content/uploads/2020/11/guia-para-la-generacin-de-productos-resultado-de-investigacion-upc-vfinal2020-07102019.pdf>

Us Epa, O. (2014). EPANET. Recuperado el 18 de septiembre de 2024, de <https://www.epa.gov/water-research/epanet>

Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico. (2010). *Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2024, de <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulob-030714.pdf>