RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Jesus Danilo Arenas Ascanio y Jesus David Mora Prado
FACULTAD	Ingenierías
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería civil
DIRECTOR	Ing. Dibrey Paola Quintero Criado
TÍTULO DE LA TESIS	Propuesta de sectorización de la red de distribución de agua potable a través de un gemelo digital calibrado para la empresa ADAMIUAIN, en el municipio de Ocaña, Norte de Santander.
TITULO EN INGLES	Proposal for sectorization of the drinking water distribution network through a calibrated digital twin for the company ADAMIUAIN, in the municipality of Ocaña, Norte de Santander.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo modelar la red de distribución de agua potable de la empresa ADAMIUAIN, utilizando el software EPANET. Se emplearán datos de caudales reales, patrones de consumo y presiones registradas en campo, considerando la normativa vigente. Esto permitirá una visión precisa y dinámica del comportamiento de la red, facilitando el análisis, la toma de decisiones a largo plazo y un mayor control operativo del sistema de distribución de agua.

RESUMEN EN INGLES

The objective of this research work is to model the drinking water distribution network of the ADAMIUAIN company, using the EPANET software. Data on real flows, consumption patterns and pressures recorded in the field will be used, considering current regulations. This will allow an accurate and dynamic view of the network's behavior, facilitating analysis, long-term decision making and greater operational control of the water distribution system.

PALABRAS CLAVES	EPANET, Excel, Red de distribución, Gemelo digital, Calibrar, Micromediciones, Macromediciones, Caudal, Presión, Patrón de consumo
PALABRAS CLAVES EN INGLES	EPANET, Excel, Distribution network, Digital twin, Calibrate, Micromeasurements, Macromeasurements, Flow, Pressure, Consumption pattern

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 157	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 48	CD-ROM: 1

Propuesta de sectorización de la red de distribución de agua potable a través de un gemelo digital calibrado para la empresa ADAMIUAIN, en el municipio de Ocaña, Norte de Santander

Jesús David Mora Prado

Jesús Danilo Arenas Ascanio

Facultad de ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería civil

Ing. Dibrey Paola Quintero Criado

20 de septiembre de 2024

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a nuestras madres, cuyo amor, apoyo incondicional y motivación constante han sido fundamentales para que este proyecto llegue a buen término. Gracias por estar siempre presente, brindándonos la fortaleza necesaria para superar cada desafío.

A la empresa ADAMIUAIN, le extendemos nuestra sincera gratitud por su valiosa colaboración. Su disposición, servicio y acceso a los datos necesarios fueron clave para el desarrollo de esta investigación, contribuyendo de manera decisiva a nuestros resultados.

Finalmente, queremos hacer un agradecimiento especial a nuestra directora de tesis, Dibrey Paola, por su incansable dedicación, compromiso y guía a lo largo de este proceso. Su acompañamiento cercano, su disposición para brindarnos su tiempo, y su valiosa colaboración han sido fundamentales para superar cada reto y enriquecer nuestro trabajo. Su enfoque crítico, su empeño en cada detalle y su apoyo constante nos han inspirado a alcanzar un nivel académico que no habríamos logrado sin su dirección. Estamos profundamente agradecidos por su paciencia, su motivación y por haber creído en nosotros desde el inicio.

Jesus Danilo Arenas Ascanio

Jesus David Mora Prado

Índice

Capítulo 1: Propuesta de sectorización de la red de distribución de agua potable a través de un gemelo digital calibrado para la empresa ADAMIUAIN, en el municipio de Ocaña, Norte de Santander..... 12

1.1 Planteamiento del problema..... 12

1.2 Formulación del problema..... 15

1.3 Objetivos..... 16

1.3.1 Objetivo general..... 16

1.3.2 Objetivos específicos:..... 16

1.4 Justificación..... 17

1.5 Delimitaciones..... 18

1.5.1 Delimitación geográfica..... 18

1.5.2 Delimitaciones conceptuales:..... 20

1.5.3 Delimitaciones operativas:..... 21

1.5.4 Delimitaciones temporales..... 22

Capítulo 2: Marco Referencial..... 23

2.1 Marco Histórico..... 23

2.1.1 Antecedentes A Nivel Mundial..... 23

2.1.2 Antecedentes A Nivel Nacional..... 26

2.1.3 Antecedentes A Nivel Regional..... 28

2.2 Marco contextual..... 29

2.2.1 Contexto Geográfico y Demográfico..... 29

2.2.2 Problemática Actual 30
2.3 Marco conceptual 31
2.3.1 Escasez de Agua 32
2.3.2 Agua No Contabilizada 32
2.3.3 Calibrar: 32
2.3.4 Optimizar: 33
2.3.5 Presión: 34
2.3.6 Consumo: 35
2.3.7 Catastro de Red: 35
2.3.8 Micromediciones: 36
2.3.9 Macromedición 37
2.4 Marco Teórico 37
2.4.1 Sectorización En Redes De Acueducto 37
2.4.2 Gemelo Digital 38
2.4.3 Dotación Neta 39
2.4.4 Patrón De Consumo 39
2.4.5 EPANET 40
2.5 Marco legal 45
2.5.1 Legislación Nacional 45
2.5.2 Normas Técnicas 46
2.5.3 Regulaciones Locales 50
2.6 Estudio bibliométrico 51
Capítulo 3: Marco metodológico 60

3.1 Tipo de investigación 60

3.2 Población y muestra 61

3.2.1 Población 61

3.2.2 Muestra 61

3.3 Recolección de información 62

3.4 Análisis de información 63

Capítulo 4: Resultados 64

4.1 Compilar las micro mediciones por suscriptor y catastro existente de la empresa ADAMIUAIN, mediante la base de datos de esta, para calcular los caudales reales de la malla del sistema de acueducto 64

4.1.1 Compilación de micro mediciones por suscriptor 64

4.1.2 Cálculo de caudales reales de la malla de acueducto 74

4.1.3 Comparación de los consumos de los usuarios de Galán alto y Población total con la norma 80

4.1.4 Cálculo de la dotación bruta 81

4.2 Estimar el patrón de consumo basados en los récords de información de macro medición de los últimos 6 años registrados por la empresa, con el fin de realizar una simulación 24 horas de la red 84

4.2.1 Consulta, recolección y almacenamiento de información de macro medicones de los últimos seis años 84

4.2.2 Análisis y procesamiento de información recopilada 91

4.2.3 Patrón de consumo 93

4.2.4 Otros patrones de consumo 97

4. 3 Modelar la red de distribución de agua potable existente de la empresa, a través del software EPANET 2.0 y calibrarlo por presiones instantáneas tomadas en campo, para la optimización de la toma de decisiones por parte de la empresa 104

4.3.1 Modelación de la red de distribución del sector de Galán parte alta en EPANET 104

4.3.2 Asignación de demandas para cada uno de los nodos de la red 105

4.3.3 Toma de presiones en campo 106

4.3.4 Modelación de la red de distribución de la zona de estudio a 24 horas 119

4.3.5 Modelación de la red de distribución en EPANET 136

4.3.6 Modelación del catastro completo en un periodo de 24 horas 137

4.3.7 Caudales demandados 139

4.3.8 Propuesta de sectorización para el sector de Galán parte alta 140

5 Conclusiones 143

6 Recomendaciones 145

7 Referencias 148

Apéndices 155

Lista de Tablas

Tabla 1 Registro digital de micromediciones en función del consumo mensual..... 66

Tabla 2 Compilación y organización de la información del consumo mensual por suscriptor 69

Tabla 3 Consumo promedio diario por suscriptores de la empresa en l/s..... 71

Tabla 4 Consumo promedio de los suscriptores del tramo entre los nodos 85 y 86 en l/s 75

Tabla 5 Tabla de consumo de cada uno de los tramos del catastro 77

Tabla 6 Demanda base de los distintos nodos del catastro en l/s 79

Tabla 7 Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida (tomado de la resolución 0330, 2017, articulo 43)..... 80

Tabla 8 Consumo por suscriptores..... 83

Tabla 9 Fragmento macromediciones ADAMIUAIN..... 89

Tabla 10 Fragmento macromediciones ADAMIUAIN..... 90

Tabla 11 Consumo promedio en 24 horas por macromedidor. 92

Tabla 12 Estrato socioeconómico por usuario..... 99

Tabla 13 Nodos y Usuarios seleccionados para la toma de presiones..... 112

Tabla 14 Recopilación lecturas de presiones..... 115

Tabla 15 Resumen de presiones en campo y conversión a (M.C.A) 117

Tabla 16 Coeficiente de Hazen-Williams para diferentes materiales..... 124

Tabla 17 Coeficientes de rugosidad para diferentes materiales 126

Tabla 18 Datos de presiones reales y con los distintos modelos matemáticos..... 129

Tabla 19 Datos de presiones reales y cálculo de error para cada uno de los modelos matemáticos 131

Tabla 20 porcentaje promedio de error para cada configuración 135

Tabla 21 Demandas de caudal por tubería de distribución 139

Lista de figuras

Figura 1 Registro del caudal tratado por la empresa 13

Figura 2 Quebrada la brava, fuente de abastecimiento del acueducto ADAMIUAIN 14

Figura 3 Ubicación del municipio de Ocaña y su división política por comunas. 19

Figura 4 Catastro de la red de acueducto de la empresa ADAMIUAIN 20

Figura 5 Sector de operación de la empresa “ADAMIAUIN”, con la zona de estudio demarcada 30

Figura 6 Componentes físicos de un sistema de distribución de agua 42

Figura 7 Producción anual de artículos 52

Figura 8 Universidades con más artículos publicados 53

Figura 9 Autores con más publicaciones 54

Figura 10 Países con más publicaciones y colaboraciones 55

Figura 11 País con más artículos publicados 56

Figura 12 Palabras clave más utilizadas 57

Figura 13 Correlación entre palabras clave más utilizadas 58

Figura 14 Naciones con una mayor producción de artículos sobre modelaciones hidráulicas en EPANET 59

Figura 15 Visita a la empresa ADAMIUIN 65

Figura 16 registro digital de micromedicion en función de usuario 67

Figura 17 Catastro de red existente 68

Figura 18 Consumo promedio mensual en l/s por la totalidad de suscriptores de la empresa 72

Figura 19 Consumo promedio en l/s de cada barrio del que abastece la empresa 65

Figura 20 Consumo promedio en l/s de cada suscriptor… 66

Figura 21 Zoom del catastro de red de ADAMIUAIN con sus usuarios 75

Figura 22 Macromedidores caja A 85

Figura 23 Visita guiada en la empresa ADAMIUAIN 85

Figura 24 Formato control de Macromedidores en PTAP.....87

Figura 25 Gráfico Patrón de consumo 94

Figura 26 Consumo promedio diario en m^3 97

Figura 27 Recorrido por la zona de influencia de la empresa ADAMIUAI.....99

Figura 28 Gráfico estrato social 100

Figura 29 Patrón promedio 102

Figura 30 Modelación de la red.....105

Figura 31 Asignación de caudales por nodo.....106

Figura 32 Permiso para trabajo en campo 107

Figura 33 Manómetro de mano 108

Figura 34 Visitas a los usuarios con funcionarios de la empresa 109

Figura 35 Sistema de abastecimiento de agua indirecto con tanque de agua 109

Figura 36 Sistema de abastecimiento de agua directo.....110

Figura 37 Vista satelital de los nodos en el sitio de análisis 111

Figura 38 Toma de presiones en campo.....113

Figura 39 Evidencia 1, toma de presión con manómetro 114

Figura 40 Evidencia 2, toma de presión con manómetro 114

Figura 41 Digitalización de cada uno de los patrones calculados al modelo 120

Figura 42 Patrón de consumo elegido para la modelación 121

Figura 43 Resultados de la modelación del patrón de consumo en galán parte alta 122

Figura 44 Unidades de medida en los que se debe agregar el coeficiente de rugosidad de las tuberías al modelo. 126

Figura 45 Dibujo de la red de distribución en el software EPANET..... 137

Figura 46 Modelación de la red por Hazen-Williams 138

Figura 47 Cálculo de caudales mediante Simulación de red en EPANET..... 139

Figura 48 Sectorización propuesta para el sector de Galán parte alta..... 126

Capítulo 1: Propuesta de sectorización de la red de distribución de agua potable a través de un gemelo digital calibrado para la empresa ADAMIUAIN, en el municipio de Ocaña, Norte de Santander

1.1 Planteamiento del problema

Existen dos empresas encargadas de suministrar el **servicio** de acueducto, alcantarillado y aseo en el municipio de Ocaña, ubicado en el departamento de Norte de Santander; ESPO S.A el cual se abastece del rio algodonal, y ADAMIUAIN la cual se alimenta del caudal de la quebrada la Brava, “Según Miranda C.H (2006) señala que la empresa prestadora del servicio de acueducto nació [como respuesta a una problemática local en el municipio ya que durante la década de los ochenta la comunidad del sector norte de la ciudad enfrentó una grave escasez de agua potable, y las empresas estatales encargadas de proveer el servicio no lograron encontrar una solución satisfactoria]”

La empresa de servicios públicos ADAMIUAIN, encargada de proveer los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo en la ciudadela norte del municipio de Ocaña, atiende a un total de 1366 usuarios y trata un caudal de 6,545 l/s. En la figura #1 se registra la lectura del caudal que la planta maneja.

Figura 1

Registro del caudal tratado por la empresa.

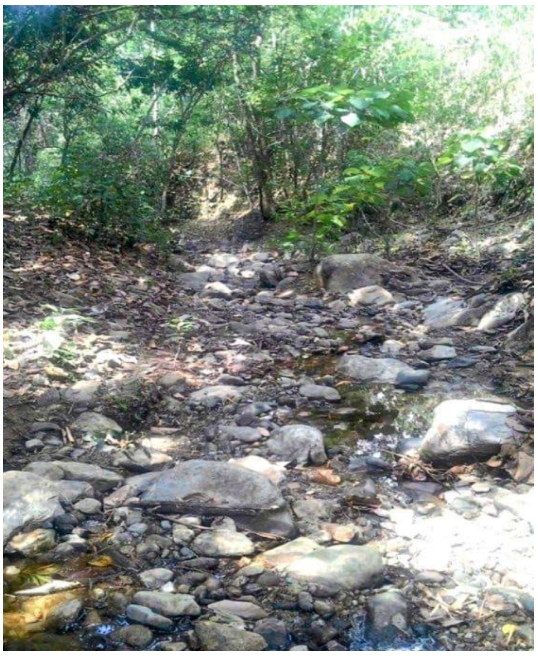


Nota: El caudal registrado no es uniforme y presenta variaciones que dependen del nivel del afluente. (*Autores, 2024)*

ADAMIUAIN se enfrenta a una problemática crítica que afecta negativamente la calidad de vida de la comunidad, especialmente durante las épocas de sequía; la principal fuente de abastecimiento de agua, la quebrada La Brava, experimenta una reducción significativa en su caudal durante estos periodos, lo que resulta en una disminución de la presión dentro de la red de distribución de agua potable. A pesar de que la problemática relacionada con el caudal no es nueva, ya que “Miranda C.H (2006) señala que un intenso verano en los primeros meses de 1991, mermó el caudal de la quebrada Brava en forma considerable” hasta el momento no se han tomado medidas efectivas para abordarla.

Figura 2

Quebrada la brava, fuente de abastecimiento del acueducto ADAMIUAIN



Nota. Según una imagen publicada en la página de Facebook *'Ocaña Hoy'*, se observa claramente como la quebrada la brava de la cual se abastece el acueducto ADAMIUAIN presenta un caudal extremadamente bajo. *(Ocaña hoy, 2022)*

La reducción en la presión del sistema de acueducto impacta directamente en la disponibilidad y continuidad del servicio de agua potable en la zona donde opera la empresa, siendo el sector Galán parte alta el más afectado debido a sus condiciones topográficas, “según el diario la opinión (2024) luego de los torrenciales aguaceros que a finales del año 2023 ocasionaron una avalancha que afectó el proceso de captación del recurso hídrico ocasionando la suspensión del servicio durante varios días mientras se mitigaba la emergencia invernal”, esto resalta la necesidad de que la empresa cuente con alternativas que faciliten la operación de la red, garantizando así la continuidad del suministro de agua potable durante cualquier época del año."

La red de acueducto no está sectorizada, lo que dificulta la capacidad para identificar problemas específicos en la red, como fugas, obstrucciones o daños en las tuberías, sin esta diferenciación de zonas en función de la situación y el riesgo existente, la empresa presenta dificultades para priorizar las áreas que requieren atención, complicando las labores de mantenimiento a la misma. Además, ante la falta de sectorización la empresa presenta inconvenientes para monitorear y mantener la calidad del agua en toda su extensión, lo que puede comprometer la salud de sus usuarios.

La empresa no cuenta con elementos de control en la red para operar y/o mantener el sistema, en época de verano, se abre la válvula de corte y control y el agua se va hacia los puntos más bajos, dejando los sectores altos sin agua, generando un problema que no ha sido solucionado por el personal técnico de la empresa

1.2 Formulación del problema

¿Cómo podría el conocimiento del funcionamiento hidráulico contrastado con la realidad de las redes de distribución a cargo de la empresa ADAMIUAIN facilitar la toma de decisiones?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Proponer la sectorización de las redes de distribución de agua potable a través de la calibración de un gemelo digital de la empresa ADAMIAUIN, en el municipio de Ocaña, que facilite la operación y mantenimiento del sistema en el sector de Galán parte alta

1.3.2 Objetivos específicos:

Compilar las micro mediciones por suscriptor y catastro existente de la empresa ADAMIUAIN, mediante la base de datos de esta, calculando los caudales reales de la malla del sistema de acueducto.

Estimar el patrón de consumo basados en los récords de información de macro medición de los últimos 6 años registrados por la empresa, realizando una simulación de 24 horas de la red.

Modelar la red de distribución de agua potable existente de la empresa, a través del software EPANET 2.0 y calibrándola por presiones instantáneas tomadas en campo, optimizando la toma de decisiones por parte de la empresa.

1.4 Justificación

Es necesario abordar esta problemática de manera efectiva, identificando soluciones técnicas y estratégicas que permitan mitigar los efectos de la escasez de agua durante las épocas de sequía y garantizar un suministro continuo y confiable para todos los usuarios del servicio de acueducto en Ciudadela norte de Ocaña, en particular en el sector Galán parte alta, para ello es crucial adoptar estrategias innovadoras que maximicen los beneficios de las tecnologías digitales. En este sentido, "según Wang (2020) una de las tecnologías más prometedoras y auténticas en la Industria 4.0 es el gemelo digital. Tiene como objetivo la minimización de riesgos y costos en la vida real (Wang 2020)", esta combina tanto aspectos técnicos como estratégicos para garantizar un suministro de agua continuo y confiable para todos los usuarios.

La introducción de un gemelo digital para la red de acueducto de agua potable permitirá la creación de una representación digital precisa y dinámica de la infraestructura de distribución de agua en tiempo real, "según Campbell Gonzales (2017) los grandes beneficios de su implementación, se destaca el aumento de la facilidad con que se detecta cualquier anormalidad dentro de la red". Luego esta representación virtual no solo proporcionará la identificación de posibles puntos de falla o pérdida en la red, sino que también posibilitará la evaluación de múltiples escenarios y alternativas para mejorar la eficiencia y la calidad del servicio.

Además, el gemelo digital viabilizara la integración de tecnologías avanzadas, como sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real, que permitirán una gestión más eficiente y proactiva del sistema de acueducto, asimismo la capacidad de realizar análisis predictivos y

simular diferentes condiciones operativas contribuirá significativamente a la anticipación y mitigación de situaciones de crisis, como las épocas de sequía, asegurando así un suministro de agua estable y continuo para todos los usuarios.

En resumen, La adopción de un gemelo digital para la de distribución de agua potable en la empresa ADAMIUAIN, representa una estrategia innovadora y efectiva para abordar los desafíos asociados a la escasez de agua. Al combinar la precisión de la tecnología con la capacidad de anticipación y adaptación a las condiciones cambiantes del entorno, el gemelo digital se posiciona como una herramienta, para garantizar un suministro de agua confiable y de calidad para todos los habitantes beneficiarios del servicio.

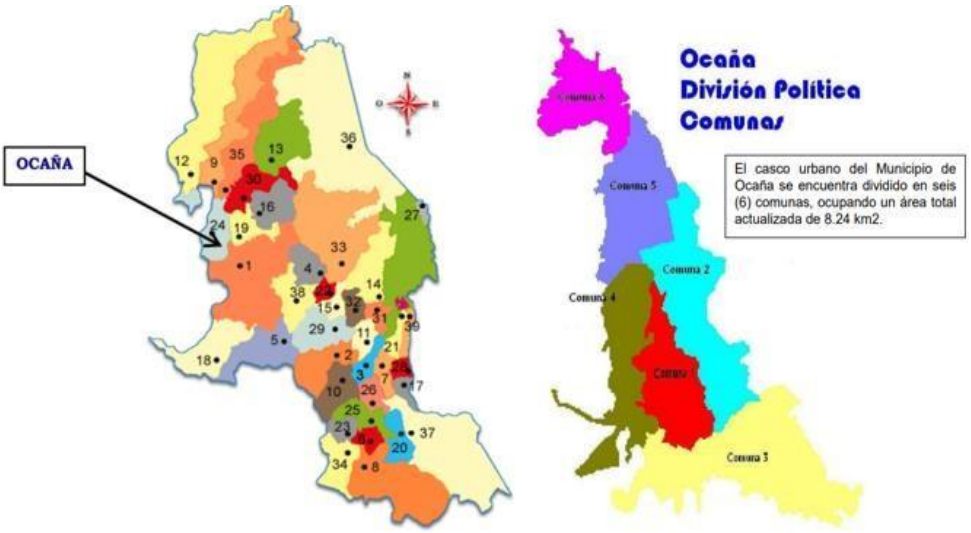
1.5 Delimitaciones

1.5.1 Delimitación geográfica:

El presente proyecto se localiza en el municipio de Ocaña, Norte de Santander, con un impacto directo en la empresa de servicios públicos ADAMIAUIN y en la comuna 6 de Ocaña. En la *Figura 3*, se presenta la ubicación geográfica del área de estudio, obtenida de la alcaldía de Ocaña, a través de la Secretaría de Planeación. A continuación, en la *Figura 4*, se muestra el catastro de la red de acueducto perteneciente a la empresa ADAMIAUIN, el cual fue elaborado en un proyecto de grado previo en el año 2020. Finalmente, se delimita la zona específica de intervención, ubicada en el sector de Galán parte alta.

Figura 3

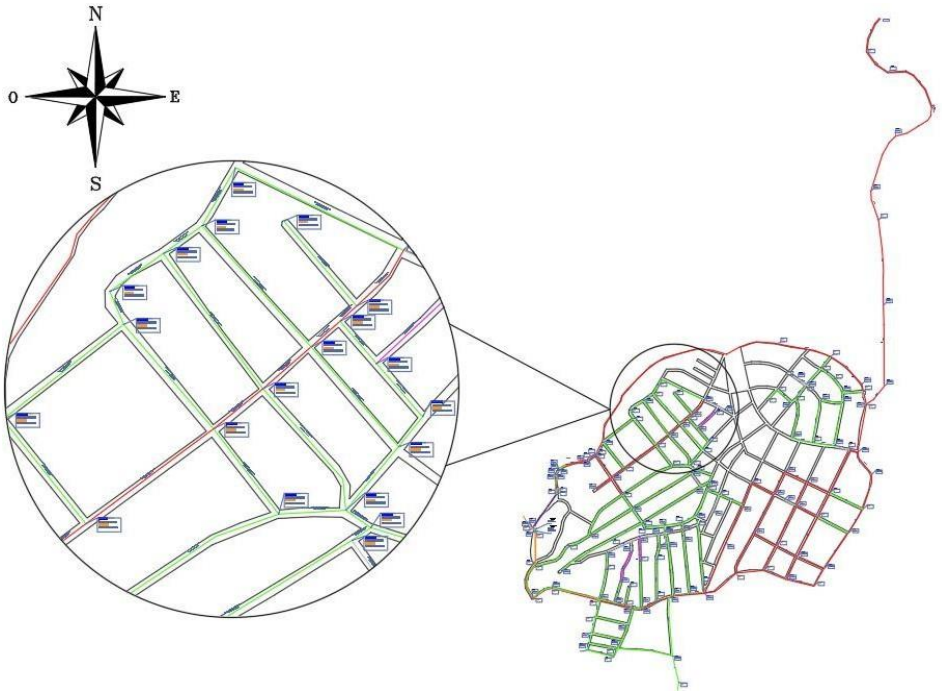
Ubicación del municipio de Ocaña y su división política por comunas.



Nota: En la figura se presenta la ubicación del municipio de Ocaña a nivel departamental, y a la derecha se destaca la localización de la comuna 6 dentro del mismo, área donde este proyecto tendrá influencia. La información ha sido tomada de la Alcaldía de Ocaña (*Secretaría de Planeación, 2020*).

Figura 4

Catastro de la red de acueducto de la empresa ADAMIUAIN



Nota: En la figura se presenta el catastro de la red de distribución, destacándose mediante una lupa la sección ampliada correspondiente al sector Galán Parte Alta, que constituye nuestro sitio de análisis. Información tomada del catastro de red (*ADAMIUAIN, 2020*).

1.5.2 Delimitaciones conceptuales:

El objetivo principal será calibrar el gemelo digital para reflejar con precisión el comportamiento real del sistema de distribución de agua potable de ADAMIUAIN en el municipio de Ocaña. Se excluyen otras actividades relacionadas con la gestión de datos, análisis de rendimiento, etc., que no estén directamente relacionadas con la calibración del modelo además se tomarán variables relevantes para la calibración del gemelo digital, como la presión

del agua, el flujo, la demanda de agua, la capacidad de las tuberías, entre otros aspectos específicos del sistema de distribución de agua potable de ADAMIUAIN en Ocaña.

1.5.3 Delimitaciones operativas:

1.5.3.1 Recolección de Datos. Información disponible por la empresa prestadora de servicio, correspondiente a mediciones de caudales entrada y salida de la planta, catastros de redes de distribución de agua potable existentes, cuya última actualización es del año 2020, información de macro medición registrada por la empresa durante los últimos 6 años, registros de micro medición por suscriptor.

1.5.3.2 Selección de Software o Herramientas. El software de modelado y simulación más adecuado para la creación del gemelo digital de la red de distribución de agua es EPANET, que es un software especializado en sistemas de distribución de agua, libre y de fácil uso, para apoyo al personal técnico de la empresa prestadora de servicio además se utilizara como herramienta el manómetro que tiene el fin de recolectar presiones reales en campo.

1.5.3.3 Calibración del Modelo. Ajustar los parámetros del modelo digital utilizando los datos recopilados para garantizar que el comportamiento simulado del sistema coincida con el comportamiento real observado. Esto puede implicar la calibración de coeficientes de fricción, demandas de agua, características de las tuberías, entre otros.

1.5.3.4 Documentación y Presentación de Resultados. Se debe elaborar un informe detallado que documente el proceso de calibración del gemelo digital, incluyendo los datos utilizados, los ajustes realizados, los resultados obtenidos y las conclusiones.

1.5.4 Delimitaciones temporales

El proyecto plantea ejecutarse en el primer semestre del año 2024, en un lapso de cuatro meses.

Capítulo 2: Marco Referencial

2.1 Marco Histórico

La escasez de agua es un desafío significativo en muchas regiones, es por esto que surge la necesidad de generar alternativas que permitan la optimización de este recurso vital, como las modelaciones de las redes de acueducto en distintos softwares. Este gemelo digital de la red permite la optimización y control de las redes de distribución de agua, lo que resulta en una gestión más eficiente y efectiva de este recurso tan preciado. La capacidad de monitorear y ajustar en tiempo real el flujo y la presión del agua a través de estas modulaciones digitales es fundamental para enfrentar la escasez hídrica de manera innovadora.

2.1.1 Antecedentes A Nivel Mundial

De acuerdo con Campbell (2017), de la universidad politécnica de Valencia, ubicada en España propone en su tesis “Sectorización de redes de abastecimiento de agua potable basada en detección de comunidades en redes sociales y optimización heurística” una nueva forma de organizar las redes de abastecimiento de agua potable, dividiéndolas en áreas más pequeñas para una mejor gestión. Se utiliza un enfoque basado en algoritmos de detección de comunidades en redes sociales para definir estas áreas y luego se optimizan las válvulas y entradas de cada una utilizando técnicas heurísticas. Además, se consideran los beneficios de esta sectorización en términos de reducción de fugas. Se aplica este enfoque a una sección de la red de agua potable en Managua, Nicaragua, y se reporta un beneficio económico significativo como resultado.

Del mismo modo Fragoso, Ruiz, Flores, y Toxky (2016), en su artículo “La sectorización en redes de agua potable para mejorar su eficiencia hidráulica” describen el proyecto realizado en el sector MH0 – 31 de la delegación Miguel Hidalgo de la ciudad de México, donde se sectorizó la red de agua potable del sector mencionado, para mejorar la entrega y control de caudales, se instalaron válvulas de seccionamiento y reguladoras de presión, se utilizó el software EPANET para el análisis hidráulico, calibrando el modelo con datos medidos y el coeficiente del emisor, se modelaron diferentes escenarios, y al reducir las fugas de agua, se recuperó un volumen diario significativo (14262 unidades).

Por otra parte, Gámez (2015), de la universidad politécnica de Valencia, ubicada en España aborda en su tesis “Análisis, estudio y mejoramiento de la red de abastecimiento de agua potable de la comunidad de Tegucigalpita” el análisis y mejora de la red de distribución de agua potable en Tegucigalpita, Honduras, se estudió la red existente y se planificaron soluciones para mejorar su funcionamiento hidráulico, considerando aspectos como consumo de agua, características de tuberías y expansión urbana, además, se utilizó el software EPANET para modelar la red y proponer soluciones que mejoren la calidad de vida de los habitantes.

Así mismo, (León y Santiago), en su tesis; “Sectorización de redes de distribución de agua potable en el acueducto de Coraasan utilizando la herramienta EPANET caso de estudio: municipio Tamboril, Republica Dominicana: parte alta”, de la Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (PUCMM), utilizaron la herramienta EPANET, y evaluaron las características de las redes del municipio, además se creó un modelo calibrado de los sectores hidrométricos. Se identificó que el municipio cuenta con 18,216 usuarios y 160.6 km de tubería, de los cuales

8,377 usuarios y 58.45 km de tubería pertenecen a la parte alta. El análisis reveló que el 27.45% de la red no recibe caudal de agua, el 27.68% presenta una velocidad de flujo mayor a 1.5 m/s y el 13.11% muestra pérdida de carga superior al 1%, indicando condiciones desfavorables y fuera de los estándares de diseño establecidos. Además, se encontró que la dotación de agua por habitante en los puntos con suministro era de 725.76 litros/día, considerablemente superior a los estándares locales y de la ONU. Este estudio proporcionó información valiosa para mejorar la distribución de agua en las comunidades mediante la implementación de estrategias adecuadas.

Aparte, (Yasumura, Braga, Silva, dos Reis, Freitas, Valério, 2020), en su artículo titulado: "Propuesta de estrategia óptima de operación aplicada a la distribución de agua red con enfoque estadístico", abordaron la ineficiencia por parte de las empresas al momento de suministrar el agua, por lo que se resaltó la necesidad de mejorar la eficiencia hídrica y energética para asegurar el futuro abastecimiento. Se propone un modelo de optimización de redes de distribución de agua con algoritmos genéticos, enfatizando en un análisis exhaustivo de resultados, estadísticas y herramientas experimentales. Utilizando EPANET, se realizaron simulaciones preliminares para identificar las deficiencias. Los parámetros se ajustaron con técnicas experimentales, logrando una ecuación optimizada. Los algoritmos mejoraron las pérdidas en un 26.61%, estableciendo una estrategia operativa eficiente. Esta combinación de enfoques muestra promesa para mejorar las redes de distribución de agua.

Por último, (Morelos y Ramírez), en su investigación denominada "La sectorización de la distribución de agua potable en San Luis Río Colorado, Sonora, como una alternativa de mejora en el uso del agua", de la Universidad Autónoma de Baja California, propusieron la división en

sectores y subsectores de la red de distribución de agua potable en San Luis Río Colorado para optimizar el uso del agua en un contexto de escasez y competencia por el recurso hídrico. Emplearon información de la red primaria y secundaria, junto con levantamientos catastrales hidráulicos y la topología de la red. Aplicaron el modelo de simulación hidráulica en el software EPANET para analizar la viabilidad de la sectorización y sus beneficios, Y concluyeron que esta estrategia permitirá un mejor control de los caudales, una distribución más equitativa de los volúmenes y una reducción de fugas al regular la presión interna de la tubería mediante la implementación de válvulas de seccionamiento, reguladoras de presión y reforzamiento de tuberías, entre otras medidas. Es por esto que el control de los sectores hidráulicos conlleva una significativa mejora en la reducción de pérdidas de agua debido a la alta presión.

2.1.2 Antecedentes A Nivel Nacional

En primer lugar, se tiene el trabajo de grado desarrollado por Rivera y Suárez (2018), en la universidad católica de Colombia, seccional Bogotá, titulado “Propuesta para la optimización del sistema de acueducto del municipio de Tena, Cundinamarca”, donde se abordaron los problemas de acceso al agua en el municipio, enfocándose en la evaluación y diagnóstico del sistema de acueducto existente, la caracterización de la población y el diseño de una propuesta óptima para mejorar el abastecimiento de agua. Finalmente se realizó una simulación en el programa Epanet de la red de acueducto para respaldar la viabilidad del diseño propuesto. Este enfoque integró el gemelo digital como una herramienta innovadora para garantizar un acceso sostenible al agua potable.

Al mismo tiempo Florián (2017), de la universidad católica de Colombia con seccional en Bogotá, en su trabajo de grado titulado “Propuesta de optimización del servicio de distribución de Agua Potable del municipio de Madrid, Cundinamarca” identificó problemas de presión en la red de distribución de agua potable del municipio de Madrid, Cundinamarca, debido a la antigüedad de la infraestructura y al crecimiento poblacional, por lo que propuso una optimización del sistema de acueducto utilizando un modelo de simulación calibrado con datos de campo en el software EPANET, sugiriendo cambios y refuerzos en las tuberías para mejorar el servicio, con el fin de que esta propuesta facilite la toma de decisiones de la empresa prestadora del servicio contribuyendo a la mejora del servicio de agua potable en el municipio.

Por otra parte, Mabardy (2022), de la universidad de la Salle de Bogotá, en su trabajo de grado “Formulación de alternativas para la optimización del sistema de abastecimiento de agua potable del municipio de Condoto, departamento de Chocó”, buscó mejorar el acceso al agua potable del municipio, donde se enfrentó a desafíos debido al crecimiento demográfico y deficiencias en la red de distribución, se realizó una evaluación exhaustiva del sistema, incluyendo sus condiciones actuales, proyecciones futuras, capacidad de cada componente y finalmente se hizo la modelación en EPANET para identificar fallas. Esto permitió proponer soluciones de optimización y mejoras para el sistema de acueducto, garantizando el suministro adecuado de agua potable a la población.

2.1.3 Antecedentes A Nivel Regional

Dávila y Ortega (2014), en su trabajo de grado titulado “Diseño hidráulico sistema de acueducto rural vereda San Francisco municipio Labateca departamento Norte de Santander” utilizando el software EPANET, llevaron a cabo una simulación hidráulica detallada para evaluar el diseño de la red de acueducto en la Vereda San Francisco. Esta simulación permitió analizar variables clave como caudales, velocidades y presiones del agua, asegurando un diseño eficiente y confiable que cumpla con las necesidades de la comunidad y las normativas establecidas. La simulación con EPANET fue fundamental para tomar decisiones informadas y optimizar el proyecto de ingeniería.

Por último, Flórez, Bonilla y Celeita de la universidad de Pamplona en su artículo “Análisis de sectorización hidráulica en redes de distribución de agua implementando Epanet e iDistritos”, propusieron mejorar y optimizar las redes de distribución de agua en Los Patios, Colombia, utilizando modelación en Epanet, analizando problemas como el crecimiento poblacional y la falta de planificación en la construcción de tuberías, se proponen alternativas de sectorización hidráulica basadas en la teoría de grafos. El resultado es una optimización del funcionamiento hidráulico, aumentando la continuidad del servicio. Estos análisis son herramientas útiles para la planificación de mejoras en la infraestructura de la ciudad.

2.2 Marco contextual

2.2.1 Contexto Geográfico y Demográfico

Ocaña es un municipio ubicado en el departamento de Norte de Santander, al noreste de Colombia, con coordenadas geográficas aproximadas de 8°14′N 73°21′W. La ciudad se encuentra a una altitud de 1,202 metros sobre el nivel del mar, lo que contribuye a su clima templado, con temperaturas promedio que oscilan entre los 18°C y 24°C (POT Ocaña,2023). Ocaña tiene una población estimada de aproximadamente 139,308 habitantes (DANE, 2020).

La zona de influencia específica para esta investigación es la Ciudadela Norte o comuna 6 de Ocaña como se observa en la figura 5, un área residencial que ha experimentado un crecimiento demográfico considerable en los últimos años. Este crecimiento ha incrementado la demanda de servicios públicos, especialmente el suministro de agua potable, lo que plantea la necesidad de optimizar la infraestructura existente para asegurar una distribución eficiente y equitativa del recurso hídrico.

Figura 5

Sector de operación de la empresa "ADAMIAUIN", con la zona de estudio demarcada



Nota: Se presenta la zona de operación de la empresa, así como su ubicación dentro de la misma, además se encuentra demarcada la zona de estudio del proyecto Galán parte alta, imagen satelital tomada de *(google earth, 2024)*

2.2.2 Problemática Actual

La red de distribución de agua potable en Ocaña enfrenta varios problemas críticos:

2.2.2.1 pérdidas de agua. La Ciudadela Norte experimenta una alta tasa de agua no contabilizada debido a fugas, conexiones ilegales y deficiencias en la infraestructura.

2.2.2.2 ineficiencia operativa. La falta de monitoreo y control en tiempo real dificulta la gestión eficiente del flujo de agua.

2.2.2.3 Variabilidad en la Calidad del Servicio. Los usuarios de la Ciudadela Norte experimentan fluctuaciones en la presión y calidad del agua, afectando su confianza en el sistema de suministro.

2.2.2.4 Deficiencia en la Gestión de Datos. La ausencia de integración de datos precisos y actualizados limita la capacidad para tomar decisiones informadas y oportunas.

2.2.2.5 Objetivo de la Investigación. El objetivo principal de esta investigación es mejorar la sectorización de la red de distribución de agua potable de ADAMIUAIN mediante la implementación de un gemelo digital calibrado. Este enfoque permitirá optimizar la eficiencia operativa, reducir las pérdidas de agua y asegurar una distribución más equitativa y de alta calidad del recurso hídrico en la Ciudadela Norte de Ocaña.

2.3 Marco conceptual

Para el desarrollo de la sectorización de la red de distribución de agua potable a través de un gemelo digital calibrado para la empresa ADAMIUAIN, en el municipio de Ocaña, Norte de Santander se tuvieron en cuenta los siguientes conceptos.

2.3.1 Escasez de Agua:

La escasez de agua es un problema común en muchas regiones, incluido el municipio de Ocaña. El cambio climático altera el ciclo hidrológico, provocando sequías más frecuentes y severas, así como la reducción de muchas fuentes de agua dulce (IPCC, 2021).

En las zonas urbanas, esta escasez puede conducir a restricciones en el suministro de agua, afectando negativamente la higiene y la salud pública (UNICEF, 2020).

2.3.2 Agua No Contabilizada:

El agua no contabilizada (ANC) de una Empresa Prestadora del servicio de Agua Potable produce y no comercializa (o no pone a disposición de los Usuarios). Ésta se manifiesta a lo largo de toda la cadena de producción y de distribución de la red de agua. El ANC se compone de “Pérdidas Comerciales o Aparentes” y “Pérdidas Reales o Físicas”, esta distinción se realiza según el área de la empresa involucrada. (Pérez de la Torre, 2018).

2.3.3 Calibrar:

Calibrar, en el contexto de un gemelo digital, consiste en la modificación de parámetros del modelo matemático de la red. Esta modificación se realiza con el fin de mejorar la semejanza entre el modelo hidráulico y la red existente en campo. La calibración proporciona las variables

optimas de tal forma que mejoren el modelo tanto como sea posible. (Castro, Hernández, Moreno, 2021).

La calibración es esencial para mantener la fidelidad del gemelo digital, asegurando que las simulaciones y predicciones basadas en el modelo sean precisas y útiles para la toma de decisiones. Esto incluye la corrección de discrepancias entre el gemelo digital y el sistema físico, que pueden surgir debido a cambios en las condiciones operativas, el desgaste de los componentes físicos, o la incorporación de nuevos datos (Rosen, 2021).

En resumen, calibrar un gemelo digital implica un proceso iterativo de comparación y ajuste entre el modelo digital y el sistema real, garantizando que el gemelo digital funcione como una réplica precisa y confiable para aplicaciones de monitorización, predicción y optimización.

2.3.4 Optimizar:

Optimizar, desde la premisa de un gemelo digital, se refiere al conjunto de acciones enfocadas a mejorar la capacidad, eficiencia y eficacia del sistema de acueducto, alcantarillado mediante la intervención parcial o total. (Castro, Hernández, Moreno 2021).

De la misma manera el objetivo de la optimización es maximizar la eficacia del sistema físico, ya sea aumentando su productividad, reduciendo los costes operativos, minimizando el consumo de recursos, o mejorando la calidad del producto o servicio. A través del gemelo digital, es posible realizar ajustes y modificaciones en un entorno virtual seguro antes de

implementarlos en el sistema real, lo que reduce riesgos y costos asociados con pruebas y errores en el mundo físico (Uhlemann, 2017).

2.3.5 Presión:

La presión, en relación con un gemelo digital, se refiere a la fuerza ejercida por un fluido (líquido o gas) sobre las superficies internas de un sistema, medido en unidades de fuerza por unidad de área (como pascales, Pa). En un gemelo digital, la presión es un parámetro crítico que se monitorea y simula para garantizar que el sistema físico opere dentro de los límites seguros y eficientes (Tao, 2018).

La presión en un gemelo digital se utiliza para replicar y analizar el comportamiento del sistema físico en condiciones operativas variadas. Esto incluye la simulación de diferentes escenarios de carga y condiciones ambientales para prever cómo el sistema responderá a cambios en la presión. Por ejemplo, en una red de distribución de agua, el gemelo digital puede simular cómo las variaciones en la presión afectan el flujo y la integridad de las tuberías (Negri, 2020).

En resumen, la presión en el marco de un gemelo digital es una variable fundamental que se simula y analiza para asegurar el funcionamiento óptimo y seguro del sistema físico correspondiente.

2.3.6 Consumo:

Cantidad de agua que utilizan para satisfacer las necesidades diarias de aseo, limpieza, riego y alimentación (Lozada, 2022).

Cantidad de agua utilizada por un usuario en un periodo determinado, destacando que presenta ciertos patrones específicos. En el contexto de una red de distribución, estos patrones de consumo son conjuntos de factores multiplicadores que representan la variación horaria de la demanda. Una característica notable de estos patrones es que son unitarios, es decir, el promedio de los factores es igual a 1. (Castro, Hernández y Moreno 2021)

2.3.7 Catastro de Red:

Un catastro de red es un sistema de registro y archivo que contiene información relacionada con todos los detalles de ubicación y especificaciones técnicas de los elementos de una red y se utiliza como un instrumento para el análisis, evaluación, formulación y desarrollo de programas para la toma de decisiones. (Muñoz y Rueda, 2017)

Instrumento esencial para la eficaz operación y el correcto mantenimiento de redes, con el propósito de mejorar el buen funcionamiento y optimizar los recursos de empresas prestadoras del servicio. (Ortiz y Sánchez, 2021).

2.3.8 Micromediciones:

La micro medición en un sistema de acueducto se refiere a la medición precisa del volumen de agua consumida por cada usuario en un período determinado. Este proceso implica el uso de medidores que registran el consumo individual de agua, permitiendo a los operadores del sistema conocer con exactitud la cantidad de agua utilizada por cada suscriptor (Rodríguez, 2009).

Estos medidores se instalan en la acometida, el punto de conexión entre la red de suministro de agua y la instalación del usuario. Los medidores registran continuamente el volumen de agua consumida, proporcionando datos esenciales para la facturación y la gestión eficiente del recurso hídrico (Benítez, 2021).

En el contexto de un gemelo digital, la micro medición es una herramienta clave para la monitorización detallada y precisa de un sistema físico. Al capturar y analizar datos específicos y en tiempo real, la micro medición permite optimizar el rendimiento del sistema, mejorar la eficiencia operativa y contribuir a la sostenibilidad. Los datos granulares obtenidos permiten identificar ineficiencias, prever demandas futuras y realizar ajustes operativos para minimizar el desperdicio de recursos.

2.3.9 Macromedición

Es un proceso que sirve para controlar o registrar los valores hidráulicos para la buena operación del sistema de acueducto o distribución de agua potable las mediciones que se llevan a cabo son de caudal, volumen, presión y variación de niveles. Esta macro medición puede ser fija o móvil, permite la realización de controles mensuales esto para controlar posibles pérdidas en el sistema. (Benítez, 2021)

2.4 Marco Teórico

2.4.1 Sectorización En Redes De Acueducto

Es una estrategia de gestión que consiste en dividir las redes de agua potable en grupos uniformes más pequeños. Esta división busca facilitar la gestión más efectiva de la red, en aspectos como fugas, reparaciones y calidad del agua en cada sub-área (sector), a través de la supervisión continua de los caudales que fluyen hacia cada sector. (Campbell, 2017)

El proceso de sectorización es una técnica empleada para administrar la eficiencia hidráulica de la red, además contribuye a la detección de fugas, al control de la presión, el manejo de los caudales, y otros aspectos técnicos que afectan el funcionamiento adecuado de la red. En la actualidad, existen metodologías para abordar este problema; no obstante, no todas son aplicables a las necesidades específicas de cada sistema abastecimiento de agua potable. (Flórez, Bonilla, Celeita, 2023)

2.4.2 Gemelo Digital

Los gemelos digitales son una tecnología de software que busca crear una réplica digital de algo físico, ya sea un producto, proceso o sistema. Esta réplica se apoya en recursos tecnológicos la inteligencia artificial, algunos softwares, entre otros. El objetivo es proporcionar herramientas para la toma de decisiones, además de capacidades de simulación y predicción. (Varas, García, Bustamante, 2020)

Los gemelos digitales aportan valor significativo a la planificación y operaciones del sistema de agua al proporcionar comprensión en tiempo real. Esto permite tomar decisiones precisas y oportunas. Un gemelo digital preciso y detallado, vinculado a sistemas de control como SCADA, permite considerar todo el sistema de suministro de agua al planificar actualizaciones, evaluar mejoras y responder a situaciones inusuales. Además, capacita al personal para trabajar de manera efectiva mediante pruebas y soluciones en el modelo antes de implementarlas. Esto aumenta la confianza en la herramienta y optimiza programas de bombeo y uso de materiales y energía, reduciendo costos y la huella de carbono de la empresa de servicios públicos. (Johansson, 2021).

2.4.3 Dotación Neta

La cantidad máxima de agua necesaria para cubrir las necesidades básicas de una persona, sin tener en cuenta las posibles pérdidas en el sistema de suministro de agua. (Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000)

2.4.4 Patrón De Consumo

Es una herramienta que permite identificar como los usuarios consumen el agua. En el caso particular de la primera, su principal utilidad radica en poder identificar en qué rangos de caudal se produce el mayor volumen de consumo, esto es fundamental para dimensionar adecuadamente los medidores de agua necesarios y calcular con mayor precisión el error de lectura de cada contador en función de la curva de error del mismo, ya que para conocer de una manera más precisa el volumen no contabilizado por un medidor es necesario identificar el volumen circulado en cada rango de caudal, y evaluar la precisión del medidor. Todo esto conlleva a una mejora en la gestión a la hora de brindar el servicio y en la facilidad para la determinación de la tarifa por parte de la empresa proveedora del servicio, permitiendo determinar pérdidas técnicas y comerciales al momento de calcular el Índice de Agua No Contabilizada. (Garzón, 2014)

2.4.5 EPANET

Es un software que realiza simulaciones del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de tuberías presurizadas durante un periodo específico. La red modelada incluye tuberías, nodos, bombas, válvulas y tanques de almacenamiento. Durante la simulación, EPANET realiza un seguimiento del flujo de agua en cada tubería, la presión en cada nodo, el nivel del agua en cada tanque y la concentración de sustancias químicas en toda la red a lo largo de múltiples períodos. (Manual del usuario de EPANET, 2000)

2.4.5.1 Capacidades De Modelación Hidráulica En EPANET. No hay límite en el tamaño de la red que se puede analizar. (Manual del usuario de EPANET, capitulo 1, página 2, 2000)

Calcula la pérdida de carga por fricción utilizando fórmulas como Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Manning. (Manual del usuario de EPANET, capitulo 1, página 2, 2000)

Incluye pérdidas de carga menores debido a codos, accesorios, etc. (Manual del usuario de EPANET, capitulo 1, página 2, 2000)

Permite modelar bombas de velocidad constante o variable. (Manual del usuario de EPANET, capitulo 1, página 2, 2000)

Calcula la energía y el costo asociado al bombeo. (Manual del usuario de EPANET, capitulo 1, página 2, 2000)

Modeliza diferentes tipos de válvulas, incluyendo válvulas de cierre, de retención, de regulación de presión y de control de flujo. (Manual del usuario de EPANET, capitulo 1, página 2, 2000)

Es capaz de modelar tanques de almacenamiento con cualquier forma, con variaciones en diámetros y altura. (Manual del usuario de EPANET, capitulo 1, página 2, 2000)

Considera múltiples categorías de demanda en los nodos, cada una con su propio patrón de variación temporal. (Manual del usuario de EPANET, capitulo 1, página 2, 2000)

Modeliza el flujo que sale de los emisores (cabezales de aspersores) en función de la presión. (Manual del usuario de EPANET, capitulo 1, página 2, 2000)

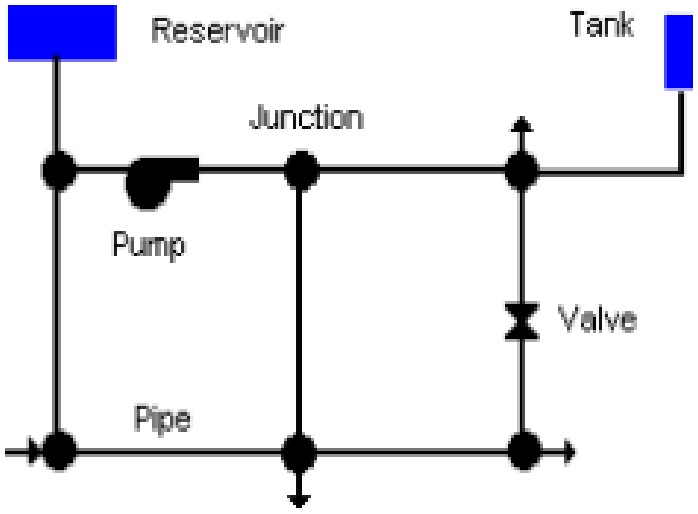
Modeliza la demanda en los nodos en función de la presión. (Manual del usuario de EPANET, capitulo 1, página 2, 2000)

Puede determinar el funcionamiento del sistema según controles simples como nivel del tanque o temporizador, así como controles más complejos basados en reglas. (Manual del usuario de EPANET, capitulo 1, página 2, 2000)

2.4.5.2 Componentes Físicos Del Modelo De Red. EPANET modela un sistema de distribución de agua como una serie de conexiones entre enlaces y nodos. En este contexto, los enlaces simbolizan tuberías, bombas y válvulas de control, mientras que los nodos representan juntas, tanques y depósitos. En la *Figura 6*, se ilustra la forma en que estos elementos pueden interconectarse para crear una red. (Manual del usuario de EPANET, página 16, 2000)

Figura 6

Componentes físicos de un sistema de distribución de agua



Nota: tomado del manual de usuario de (*EPANET, pagina 16, 2000)*

juntas: Las juntas son puntos fundamentales en la red de distribución de agua, ya que es donde se unen las conexiones y también donde el agua ingresa o sale del sistema. (Manual del usuario de EPANET, página 16, 2000)

Depósitos: Los depósitos son nodos que simbolizan una fuente externa infinita o una reserva ilimitada de agua. Se emplean para modelar cuerpos de agua como lagos, ríos, acuíferos

subterráneos y conexiones a otros sistemas. Además, los depósitos también pueden representar una fuente de control de la calidad del agua. (Manual del usuario de EPANET, página 17, 2000)

Tanque: Son nodos que poseen la capacidad de almacenar agua, y su volumen almacenado puede variar a lo largo del tiempo durante una simulación. (Manual del usuario de EPANET, página 17, 2000)

Emisores: Son dispositivos vinculados a las conexiones que simulan la liberación del flujo hacia la atmósfera mediante una tobera u orificio. El caudal que pasa a través del emisor cambia según la presión del nodo. (Manual del usuario de EPANET, página 17, 2000)

Tuberías: Son las conexiones encargadas de transportar agua de un punto de la red a otro. En el caso de EPANET, este asume que todas las tuberías se encuentran llenas en todo momento. Cabe resaltar que la dirección del flujo se extiende desde el punto con mayor carga hidráulica (energía interna debido al peso del agua) hacia el punto con menor carga. (Manual del usuario de EPANET, página 18, 2000)

Perdidas menores: También conocidas como pérdidas locales, son el resultado de la turbulencia adicional que se genera en los codos y accesorios de una red de tuberías. La decisión de considerar estas pérdidas depende del diseño de la red y del nivel de precisión necesario. Una forma de tener en cuenta estas pérdidas es asignando a la tubería un coeficiente de pérdidas menores. (Manual del usuario de EPANET, página 20, 2000)

Bombas: Son componentes que suministran energía a un fluido, lo que resulta en un aumento de su carga hidráulica. Sus parámetros de entrada incluyen los nodos de entrada y salida, así como su curva, que representa la combinación de cargas y flujos que la bomba puede generar. En algunos casos, en lugar de la curva, la bomba se puede representar como un dispositivo de energía constante, que suministra una cantidad fija de energía (en caballos de vapor o kilowatts) al fluido, independientemente de las combinaciones de flujo y carga. (Manual del usuario de EPANET, página 20, 2000)

Válvulas: Son componentes clave en una red de tuberías, ya que controlan y limitan la presión o el flujo en puntos específicos del sistema. (Manual del usuario de EPANET, pagina 21, 2000).

2.4.5.3 Modelo de simulación hidráulica. El modelo de simulación hidráulica de EPANET es una herramienta poderosa que permite calcular las cargas hidráulicas en juntas y los caudales a través de conexiones para un conjunto fijo de niveles de depósitos, niveles de tanques y demandas de agua en diferentes momentos. Durante la simulación, los niveles del depósito y las demandas de la junta se actualizan según los patrones de tiempo previstos, mientras que los niveles del tanque se actualizan utilizando la solución de flujo actual. Para obtener la solución de cargas y flujos en un momento específico, se deben resolver simultáneamente la conservación de la ecuación de flujo en cada junta y la relación de pérdida de carga en cada conexión de la red. Este proceso, conocido como equilibrio hidráulico de la red, requiere el uso de una técnica repetitiva para resolver las ecuaciones no lineales involucradas. EPANET es una herramienta

valiosa para analizar y comprender el comportamiento hidráulico de sistemas de distribución de agua. (Manual del usuario de EPANET, página 28, 2000)

2.5 Marco legal

El marco legal de esta investigación establece el contexto normativo y regulatorio relevante para la sectorización de la red de distribución de agua potable utilizando un gemelo digital calibrado en la empresa ADAMIUAIN, ubicada en el municipio de Ocaña, Norte de Santander. Este marco abarca las leyes, decretos, normas técnicas y regulaciones locales, nacionales aplicables a la gestión y distribución de agua potable, así como al uso de tecnologías emergentes como los gemelos digitales. Entre las normativas más importantes se encuentran la Ley 142 de 1994, la Ley 373 de 1997, el Decreto 1575 de 2007, la Resolución 0330 de 2017 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, las normas técnicas del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) y el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de la Alcaldía de Ocaña.

2.5.1 Legislación Nacional

2.5.1.1 Ley 142 de 1994. Régimen de los Servicios Públicos Domiciliarios: Esta ley regula la prestación de los servicios públicos domiciliarios en Colombia, incluyendo el suministro de agua potable. Establece las obligaciones de los prestadores del servicio, los derechos de los usuarios y el marco tarifario. En particular, el artículo 14 establece la importancia de garantizar la continuidad, calidad y eficiencia en la prestación del servicio.

2.5.1.2 Ley 373 de 1997. Uso Eficiente y Ahorro del Agua: Esta ley promueve el uso eficiente y el ahorro del agua, imponiendo a los prestadores de servicios públicos la obligación de implementar programas de uso eficiente y ahorro del agua. La sectorización de la red mediante un gemelo digital puede considerarse parte de estas estrategias, al permitir una gestión más precisa y eficiente del recurso hídrico.

2.5.1.3 Decreto 1575 de 2007. Sistema de Gestión de la Calidad del Agua: Este decreto establece los criterios para el sistema de gestión de la calidad del agua para consumo humano. Incluye directrices sobre el control y vigilancia de la calidad del agua, la implementación de sistemas de información y la adopción de nuevas tecnologías para mejorar la gestión del servicio.

2.5.2 Normas Técnicas

2.5.2.1 Resolución 0330 de 2017. Esta resolución establece los requisitos técnicos que deben cumplir los prestadores del servicio de agua potable y saneamiento básico en Colombia. Su objetivo principal es garantizar la prestación eficiente y segura de estos servicios, así como la protección de la salud pública y del medio ambiente.

En el contexto de la sectorización de la red de distribución de agua potable en ADAMIUAIN, la Resolución 0330 establece directrices específicas en varios numerales, entre ellos:

Numeral 5.1.2: Requisitos para el diseño y construcción de redes de distribución de agua potable, incluyendo la sectorización de la red y la instalación de dispositivos de control de caudal y presión.

Numeral 5.2.1: Procedimientos para la calibración y verificación de medidores de caudal y presión, asegurando la precisión y confiabilidad de los dispositivos de medición.

Numeral 6.3.4: Directrices para la gestión de datos y la implementación de sistemas de información geográfica (SIG) para el monitoreo y control del sistema de distribución de agua potable.

Estos numerales proporcionan un marco detallado para la implementación de la sectorización de la red de distribución de agua potable en ADAMIUAIN, asegurando el cumplimiento de estándares técnicos y la eficiencia operativa del sistema.

2.5.2.2 Normas del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Las normas técnicas emitidas por ICONTEC complementan la Resolución 0330 y proporcionan lineamientos específicos para aspectos como la selección y calibración de equipos de medición, la instalación de dispositivos de control de caudal y presión, y la gestión de datos para el monitoreo y análisis del rendimiento del sistema.

2.5.2.2.1 Lineamientos Específicos de ICONTEC. Selección y Calibración de Equipos de Medición:

NTC 3964: Establece los requisitos para la selección y calibración de medidores de agua potable. Esta norma específica las características técnicas que deben cumplir los medidores para asegurar su precisión y confiabilidad.

Requisitos técnicos*:* Incluyen precisión de medición, rango de operación, durabilidad y compatibilidad con los sistemas de monitoreo.

Procedimientos de calibración: Describen los métodos y la frecuencia de calibración para garantizar que los medidores proporcionen datos precisos y confiables a lo largo del tiempo.

NTC 2547: Relacionada con la calibración de dispositivos de medición de caudal y presión, especifica los procedimientos de verificación y recalibración necesarios para mantener la exactitud de los datos registrados.

Instalación de Dispositivos de Control de Caudal y Presión:

NTC 3117: Proporciona lineamientos para la instalación de dispositivos de control de caudal y presión en las redes de distribución de agua potable.

Especificaciones de instalación: Incluyen la ubicación adecuada de los dispositivos, métodos de instalación y las condiciones necesarias para su operación óptima.

Requisitos de mantenimiento: Detallan los procedimientos de mantenimiento preventivo y correctivo para asegurar el funcionamiento continuo y eficiente de los dispositivos de control.

Gestión de Datos para Monitoreo y Análisis del Rendimiento del Sistema:

NTC 3701: Se enfoca en la gestión de datos y el uso de sistemas de información para el monitoreo y análisis del rendimiento del sistema de distribución de agua potable.

Recolección de datos: Define los tipos de datos que deben ser recolectados (caudal, presión, consumo) y los métodos para su recolección precisa.

Integración de sistemas: Establece los requisitos para la integración de los datos de los dispositivos de medición en sistemas de información geográfica (SIG) y otras plataformas de análisis.

Análisis de datos: Proporciona directrices para el análisis de los datos recolectados, incluyendo el uso de software especializado y técnicas de análisis para la detección de patrones y anomalías.

El cumplimiento de las normas técnicas y la Resolución 0330 de 2017 es fundamental para asegurar la eficiencia y confiabilidad del proceso de sectorización de la red de distribución de agua potable en ADAMIUAIN, Ocaña. La aplicación adecuada de estos numerales y

normativas garantiza la calidad del servicio, la protección de la salud pública y del medio ambiente, y la optimización de los recursos hídricos disponibles.

2.5.3 Regulaciones Locales

2.5.3.1 Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del Municipio de Ocaña. El POT establece las directrices para el uso del suelo y la infraestructura en el municipio de Ocaña. Incluye disposiciones específicas sobre la gestión de recursos hídricos y la infraestructura de servicios públicos, que son relevantes para la sectorización de la red de distribución de agua potable.

2.5.3.2 Acuerdos Municipales y Resoluciones del Concejo Municipal de Ocaña. Estos documentos contienen normativas y directrices específicas para la gestión de servicios públicos en el municipio, incluyendo el suministro de agua potable. Pueden establecer requisitos adicionales para la implementación de nuevas tecnologías y la sectorización de redes de distribución.

El marco legal para la sectorización de la red de distribución de agua potable mediante un gemelo digital calibrado en la empresa ADAMIUAIN, en el municipio de Ocaña, está compuesto por una combinación de leyes nacionales, normas técnicas y regulaciones locales. Este conjunto normativo proporciona un soporte legal robusto para la implementación de tecnologías avanzadas en la gestión del agua, asegurando la eficiencia operativa y la calidad del servicio

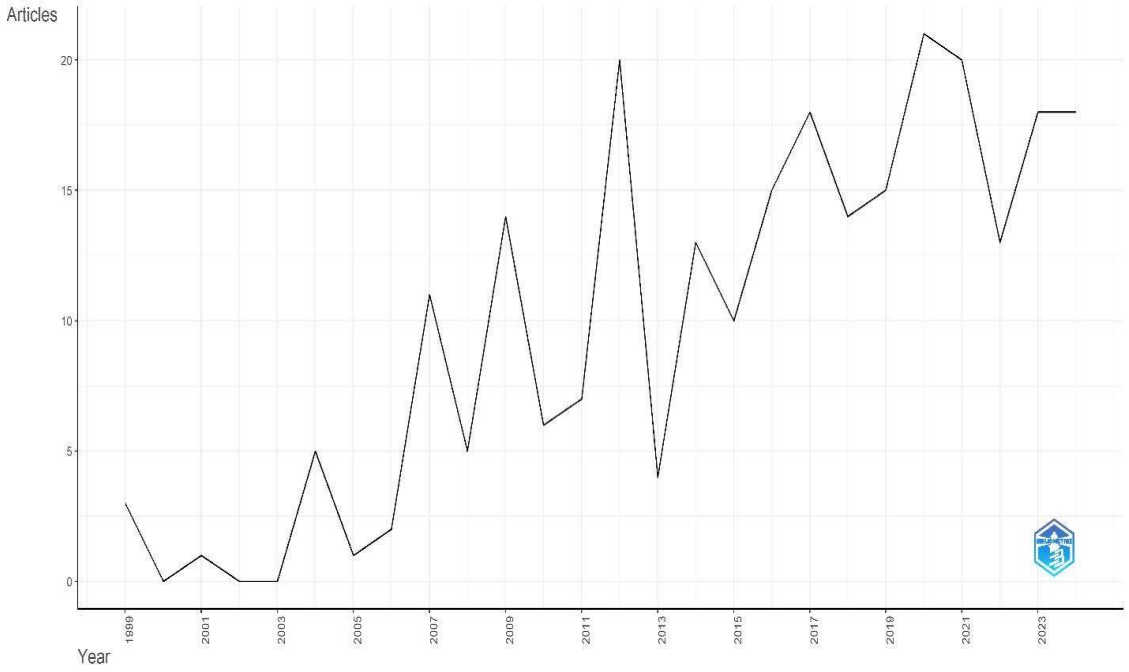
2.6 Estudio bibliométrico

Es fundamental para esta investigación llevar a cabo un estudio bibliográfico, ya que permite analizar la literatura científica disponible y comprender en profundidad las metodologías, avances y aplicaciones más relevantes en este campo. Este análisis resulta clave para establecer una base sólida que sustente el proceso de calibración del modelo hidráulico, identificar las prácticas más eficaces y detectar las tendencias más influyentes en el uso de herramientas como EPANET, para eso se analizaran factores relevantes a nivel mundial y nacional.

De esa manera continuaremos con el análisis del comportamiento observado en la Figura 7, donde la producción científica sobre la modelación de redes hidráulicas con EPANET refleja un patrón de variaciones con picos tanto mínimos como máximos a lo largo de los años. Estas fluctuaciones podrían estar relacionadas con la variabilidad en la disponibilidad de agua, que influye en la urgencia y el interés por este tipo de investigaciones. En períodos de mayor escasez de recursos hídricos, la investigación tiende a aumentar. A pesar de las fluctuaciones, se observa una clara tendencia al alza, lo que sugiere que este campo de estudio está adquiriendo mayor relevancia, especialmente frente a la crisis hídrica que enfrenta el mundo en la actualidad.

Figura 7

Producción anual de artículos



Nota: tomado de *(Rstudio Team, 2024)*

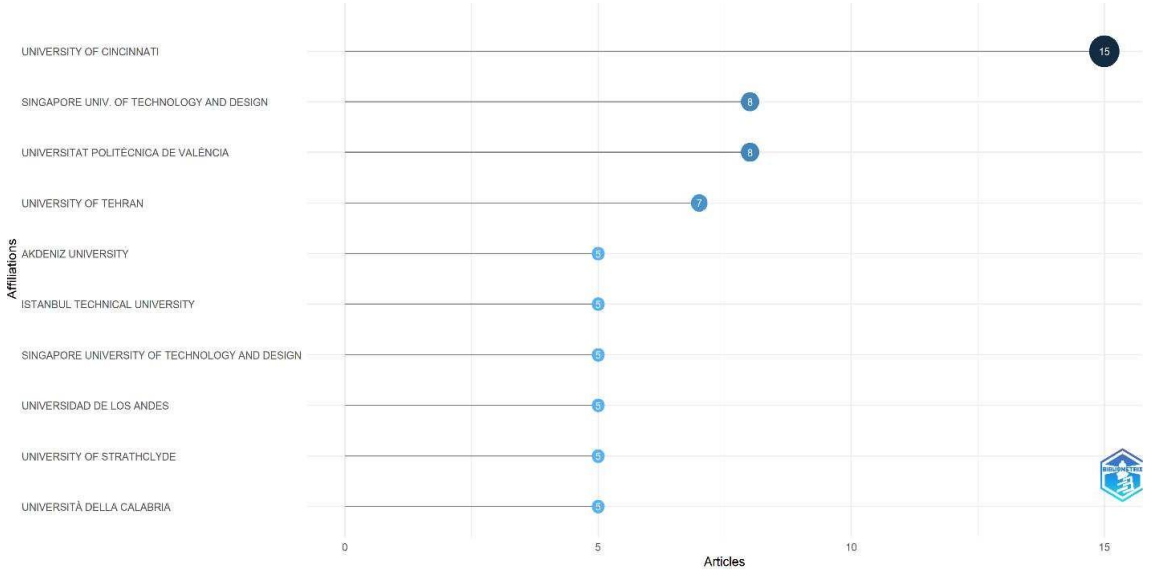
Así mismo la *Figura 8*, muestra las afiliaciones más relevantes en cuanto a la publicación de artículos sobre modelación de redes hidráulicas en EPANET. En primer lugar, destaca la **University of Cincinnati**, con 15 publicaciones, lo que refleja su liderazgo en este campo de investigación.

En tercer lugar, se encuentra la **Universitat Politècnica de València**, con 8 publicaciones. Esta universidad ha sido especialmente útil en el proyecto, ya que se ha utilizado varias de sus publicaciones para el desarrollo del mismo.

Finalmente, cabe destacar la presencia de la **Universidad de los Andes**, una institución colombiana, que se encuentra con 5 publicaciones entre las más relevantes. Esto es motivo de orgullo, ya que refleja la participación activa de Colombia en investigaciones clave relacionadas con la gestión y modelación de redes de acueducto.

Figura 8

Universidades con más artículos publicados

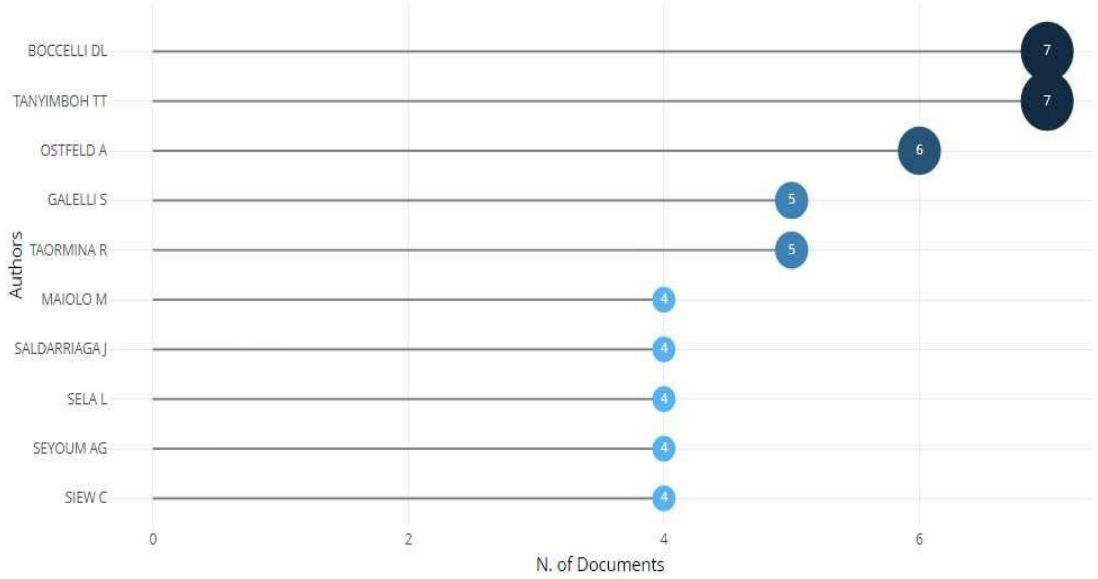


Nota: tomado de (*Rstudio Team, 2024)*

Por otro lado, entre los autores con más publicaciones acerca del tema de la modelación hidráulica de redes en EPANET encontramos a Boccelli DL, con un total de 7 publicaciones, y a Tanyimboh TT con las mismas, seguidos por Ostfeld A con 6 publicaciones, véase en la *Figura 9.*

Figura 9

Autores con más publicaciones



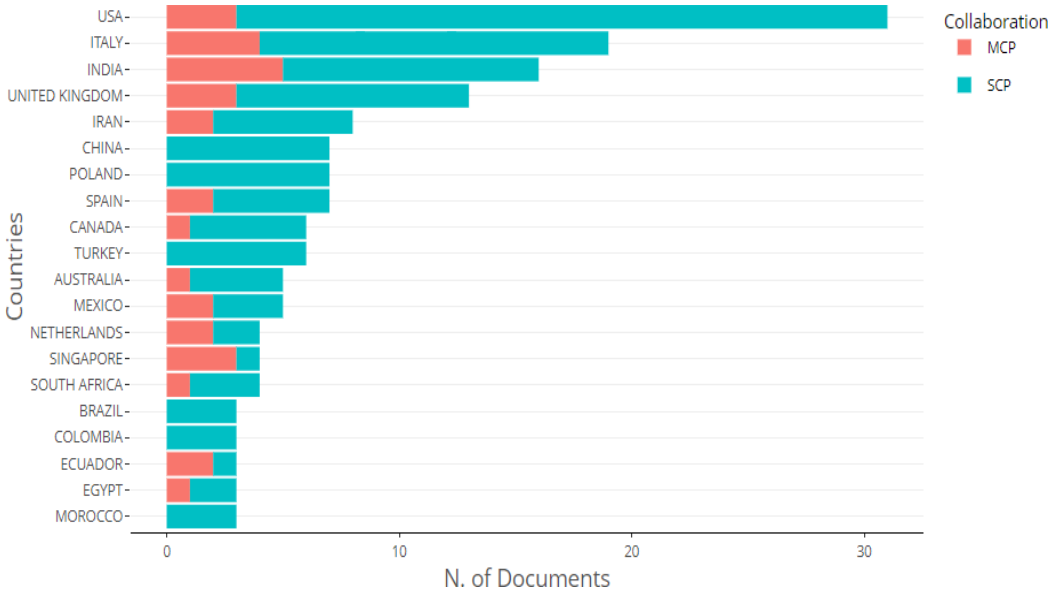
Nota: tomado de (*Rstudio Team, 2024)*

También entre los países con mayor cantidad de publicaciones sobre la modelación hidráulica de redes en EPANET, ver *Figura 10*, se destaca Estados Unidos, con un total de 28 publicaciones. Sin embargo, a pesar de liderar en número de artículos, no es el país con más colaboraciones internacionales, ya que solo registra 3 colaboraciones. En este aspecto, es superado por India e Italia, que cuentan con 5 y 4 colaboraciones respectivamente.

En cuanto a Colombia, el país tiene 3 publicaciones sobre el tema, pero no presenta ninguna colaboración internacional en la elaboración de artículos.

Figura 10

Países con más publicaciones y colaboraciones



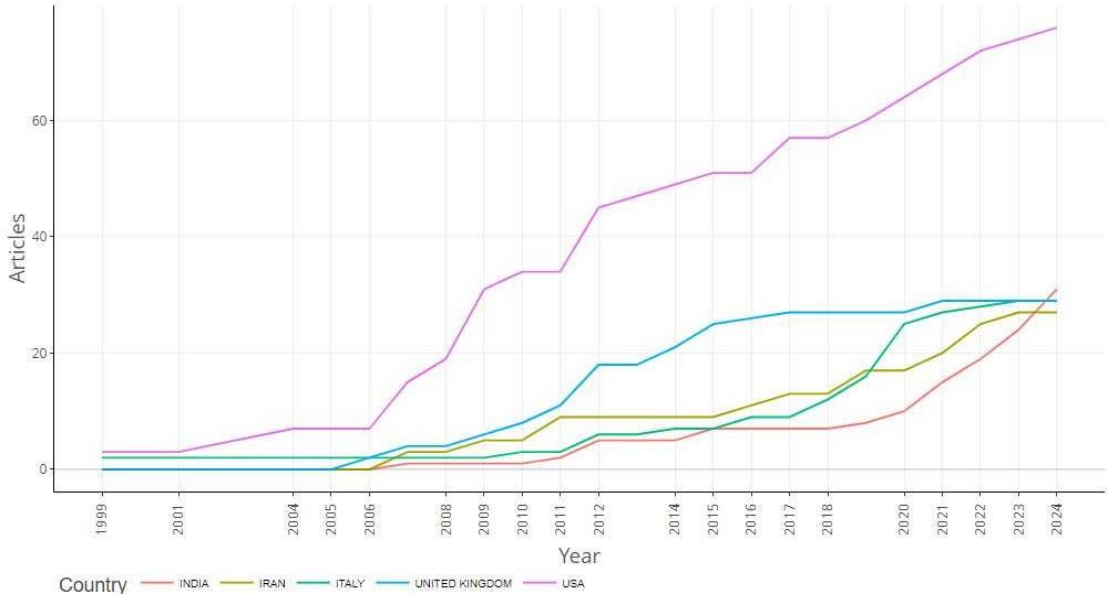
Nota: tomado de (*Rstudio Team, 2024)*

De igual forma, entre los países con más publicaciones sobre la modelación hidráulica de redes en EPANET, se observa claramente cómo Estados Unidos ha mantenido una ventaja considerable sobre el resto. Esta brecha se amplió significativamente a partir del año 2006, cuando Estados Unidos incrementó notablemente su producción en comparación con otros países.

Es importante destacar también al Reino Unido, que ocupa el segundo lugar en número de publicaciones, consolidándose como otro actor clave en la investigación sobre este tema. Ver *Figura 11*.

Figura 11

País con más artículos publicados



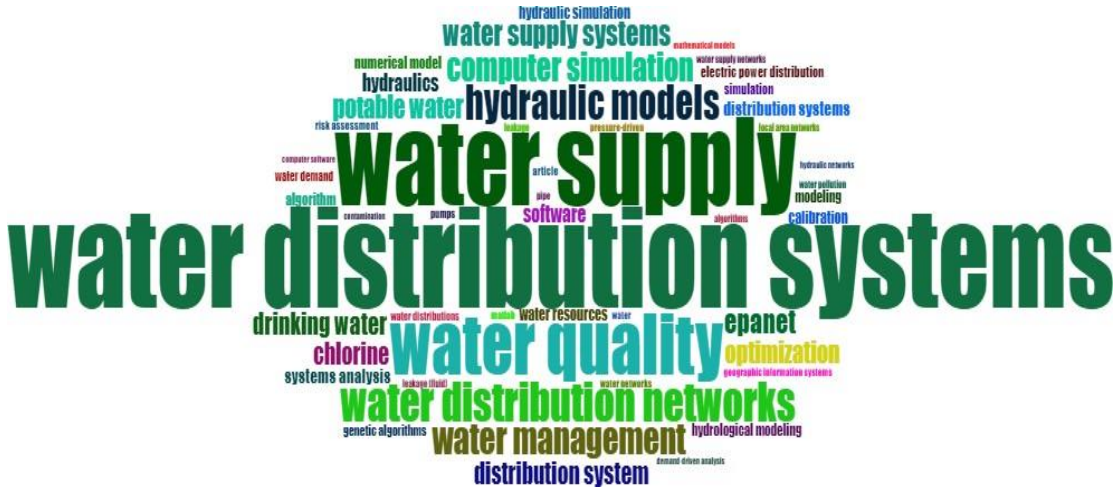
Nota: tomado de (*Rstudio Team, 2024)*

Por otro lado, entre las palabras clave más utilizadas en los trabajos de investigación sobre la modelación hidráulica de redes en EPANET, destacan "sistema de distribución de agua" y "abastecimiento de agua" como las más frecuentes, lo que subraya la importancia de estos temas en la planificación y gestión de recursos hídricos.

Además, la "calidad del agua" también aparece como una de las palabras clave más repetidas, reflejando la preocupación por mantener estándares adecuados en el suministro. A su vez, "red de distribución de agua" y "modelos hidráulicos" son términos clave, indicando el enfoque en la optimización de la infraestructura y la simulación precisa del comportamiento de los sistemas hídricos, véase en la *Figura 12.*

Figura 12

Palabras clave más utilizadas



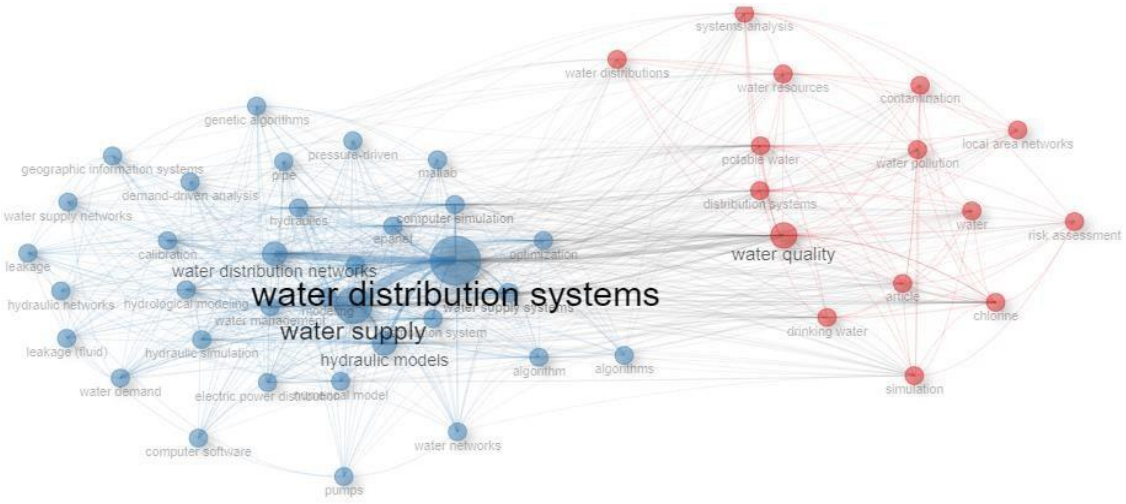
Nota: tomado de (*Rstudio Team, 2024)*

También en este gráfico se muestra la relación entre todas las palabras clave utilizadas en los estudios sobre la modelación hidráulica de redes en EPANET. Ver *Figura 13*, luego se observa claramente que "sistema de distribución de agua" es la palabra más entrelazada con las demás, lo que indica su centralidad y relevancia en este campo de investigación.

De igual manera, "abastecimiento de agua" y "calidad del agua" también se destacan por su fuerte conexión con otros términos, consolidándose como las palabras clave más importantes dentro de esta temática. Todas las palabras utilizadas en estos estudios juegan un papel fundamental en la elaboración de artículos. Cada término refleja aspectos específicos y esenciales de la modelación hidráulica, contribuyendo a una comprensión más amplia y profunda del tema.

Figura 13

Correlación entre palabras clave más utilizadas



Nota: tomado de (*Rstudio Team, 2024)*

Para finalizar en esta gráfica, las naciones con una mayor producción de artículos sobre modelaciones hidráulicas en EPANET están representadas en un azul más intenso. Estados Unidos lidera en producción, seguido por Rusia e India. Además, el gráfico muestra las principales colaboraciones entre países. La colaboración más destacada es entre Estados Unidos e India, mientras que Singapur e Israel también tienen una notable asociación, ver *Figura 14.*

Figura 14

Naciones con una mayor producción de artículos sobre modelaciones hidráulicas en EPANET



Nota: tomado de (*Rstudio Team, 2024)*

Capítulo 3: Marco metodológico

3.1 Tipo de investigación

Al momento de desarrollar un proyecto es fundamental identificar el tipo de investigación que se va a desarrollar, en el caso de este proyecto corresponde a una investigación de tipo experimental con carácter cuantitativo, según (Guevara, Verdesoto, Castro, 2020) la investigación experimental implica el control y la manipulación de ciertas condiciones, estímulos o tratamientos (llamados variables independientes) a los que se expone un objeto de estudio o un grupo de individuos. El propósito es observar y registrar las reacciones o efectos resultantes (llamados variables dependientes) que surgen como consecuencia de estas manipulaciones. Este método nos permite establecer relaciones causales entre las variables analizadas, lo cual es fundamental para comprender una amplia gama de fenómenos y procesos en diversas áreas de estudio.

Por otra parte, (Sánchez, 2009), menciona que la investigación cuantitativa se centra en fenómenos que pueden ser medidos, como, por ejemplo, número de hijos, edad, peso, estatura, entre otros. Se utilizan técnicas estadísticas para analizar los datos recopilados, su objetivo principal es describir, explicar, predecir y controlar objetivamente sus causas, además de predecir su ocurrencia a partir de su revelación, fundamentando conclusiones en el uso riguroso de la métrica o cuantificación tanto en la recolección de resultados como en su procesamiento, análisis e interpretación, a través del método hipotético-deductivo.

El proceso de sectorización de la red consistirá en varias etapas. En primer lugar, se llevará a cabo la recopilación y análisis de las macro mediciones registradas por la empresa con el fin de estimar un patrón de consumo, además, se procederá a la investigación de las micro mediciones por suscriptor para calcular los caudales por tramo, también se realizará la toma de presiones reales en campo para complementar la información obtenida.

Una vez recopilados y analizados estos datos, se procederá a su utilización durante la modelación de la red hidráulica en el software Epanet, dicho modelado le permitirá una mayor gestión de la empresa en la red de abastecimiento.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población

La población objeto de este estudio corresponde al sector en el que opera la empresa "Asociación de Amigos Usuarios Independientes (ADAMIUAIN)", que presta sus servicios a la Ciudadela Norte de Ocaña, Norte de Santander. Este sector está conformado por un total de 1,366 usuarios, según datos proporcionados por (ADAMIUAIN,2024).

3.2.2 Muestra

La muestra seleccionada para este proyecto corresponde a los usuarios ubicados en la parte alta del barrio Galán, en Ocaña, Norte de Santander. Esta zona fue elegida debido a que,

según información proporcionada por los funcionarios de la empresa, presenta los mayores problemas dentro del sistema de distribución de agua. Es importante señalar que la muestra utilizada es de tipo no probabilística, específicamente un muestreo intencional o de conveniencia, dado que se seleccionó en función de su relevancia para los objetivos del estudio y no de manera aleatoria, como lo define Arias, Villasanti & Miranda (2016), se trata de la selección de una muestra mediante métodos no aleatorios, eligiendo individuos que posean características similares a las de la población objetivo. En algunos casos, el investigador puede seleccionar de forma directa e intencionada a los miembros de la población. Lo más común en este procedimiento es utilizar como muestra a los individuos que se encuentran más fácilmente accesibles.

3.3 Recolección de información

Para la recolección de la información, los datos serán suministrados por fuentes primarias, siendo esta la empresa “ADAMIUAIN”, la cual facilitará el catastro de la red de distribución de agua potable existente, cuya última actualización es del año 2020, también se contará con los registros de macro medición tomados por la empresa durante los últimos seis (6) años, además se contará con registros de micro medición por suscriptor que la empresa ha almacenado.

3.4 Análisis de información

Para llevar a cabo el proyecto se estimará un patrón de consumo basado en la macro medición registrada durante los últimos 6 años por parte de la empresa, se calculará el caudal por cada tramo con que cuente la red teniendo en cuenta las micro mediciones almacenadas por la empresa, (en el sector a tratar); esta información es crucial al momento de realizar la modelación de la red hidráulica en el software “Epanet”, una vez modelado se procede a tomar las presiones reales de la red en campo para calibrar el gemelo con el cual se buscarán alternativas que permitan mitigar el impacto de la escasez del agua dentro de la misma

Capítulo 4: Resultados

4.1 Compilar las micro mediciones por suscriptor y catastro existente de la empresa ADAMIUAIN, mediante la base de datos de esta, para calcular los caudales reales de la malla del sistema de acueducto.

4.1.1 Compilación de micro mediciones por suscriptor

Se llevaron a cabo visitas a la sede de la empresa ADAMIUAIN para recolectar información, incluyendo registros de micromediciones. La *Figura 15* muestra evidencia de estas visitas de campo, durante las cuales se mantuvieron conversaciones con el personal de la empresa. El objetivo de estas interacciones fue comprender el funcionamiento interno de la empresa y obtener un contexto general sobre sus operaciones.

Figura 15

Visita a la empresa ADAMIUIN



Nota: Fotografía capturada en la empresa ADAMIUAIN, donde se realizaron visitas periódicas para recopilar información clave, incluyendo macromediciones, micromediciones y el catastro de la red, tomado de (*Autores,2024).*

Se recibieron dos tipos de formatos por parte de la empresa para el almacenamiento de la información de micromediciones. El primero fue proporcionado en formato Excel, en el cual se presenta la información organizada por meses, ver *Tabla 1* donde se muestra un fragmento de dichos datos y en el (*Apéndice A, consumo por mes)* donde se aprecia la totalidad de la información para cada uno de los meses. Luego el segundo formato fue entregado en PDF y contiene los datos de micromediciones clasificados por usuario, véase *Figura 16*.

Tabla 1

Registro digital de micromediciones en función del consumo mensual

suscriptor	***estrato***	***Lec. actual***	***Lec. anterior***	***Consumo en m3***
0100-0005-0000-	*01*	*312*	*310*	*2*
0100-0010-0000-	*01*	*3758*	*3754*	*4*
0100-0015-0000-	*01*	*5373*	*5366*	*7*
0100-0020-0000-	*02*	*6598*	*6592*	*6*
0100-0025-0000-	*02*	*3967*	*3954*	*13*
0100-0030-0000-	*02*	*6000*	*5988*	*12*
0100-0035-0000-	*02*	*4079*	*4079*	*0*
0100-0040-0000-	*02*	*2741*	*2740*	*1*
0100-0045-0000-	*02*	*8120*	*8101*	*19*

Nota: En este fragmento de tabla, se presenta la información de micromediciones correspondientes al mes de junio de 2024, que incluye los siguientes datos: número de suscriptor, estrato socioeconómico, nombre del usuario, lecturas actuales y anteriores, así como el consumo mensual por suscriptor en metros cúbicos, tomado de (*ADAMIUIN,2024).*

Figura 16

registro digital de micromedición en función de usuario

ADAMIUAIN E.S.P.

HISTORIAL DE LECTURAS

Suscriptor: 0500-5674-0000- - BALLESTEROS ROJAS SIGILFREDO

Fecha y Hora del Reporte 19/06/2024 04:38:13 PM

Año	Periodo	Lectura	Consumo	Tipo Cons.	Estado de la Lectura
2023	01 ENERO	366.000000	10.000000	Real	No hay novedad
2023	02 FEBRERO	377.000000	11.000000	Real	No hay novedad
2023	03 MARZO	388.000000	11.000000	Real	No hay novedad
2023	04 DEL 01 AL 30 DE ABRIL DE 2024	399.000000	11.000000	Real	No hay novedad
2023	05 DEL 01 AL 31 DE MAYO DE 2024	407.000000	8.000000	Real	No hay novedad
2023	06 JUNIO	414.000000	7.000000	Real	No hay novedad
2023	07 JULIO	418.000000	4.000000	Real	No hay novedad
2023	08 AGOSTO	421.000000	3.000000	Real	No hay novedad
2023	09 SEPTIEMBRE	427.000000	6.000000	Real	No hay novedad
2023	10 OCTUBRE	433.000000	6.000000	Real	No hay novedad
2023	11 NOVIEMBRE	444.000000	11.000000	Real	No hay novedad
2023	12 DICIEMBRE	456.000000	12.000000	Real	No hay novedad
2024	01 ENERO	471.000000	15.000000	Real	No hay novedad
2024	02 FEBRERO	490.000000	19.000000	Real	No hay novedad
2024	03 MARZO	505.000000	15.000000	Real	No hay novedad
2024	04 DEL 01 AL 30 DE ABRIL DE 2024	520.000000	15.000000	Real	No hay novedad
2024	05 DEL 01 AL 31 DE MAYO DE 2024	535.000000	15.000000	Real	No hay novedad

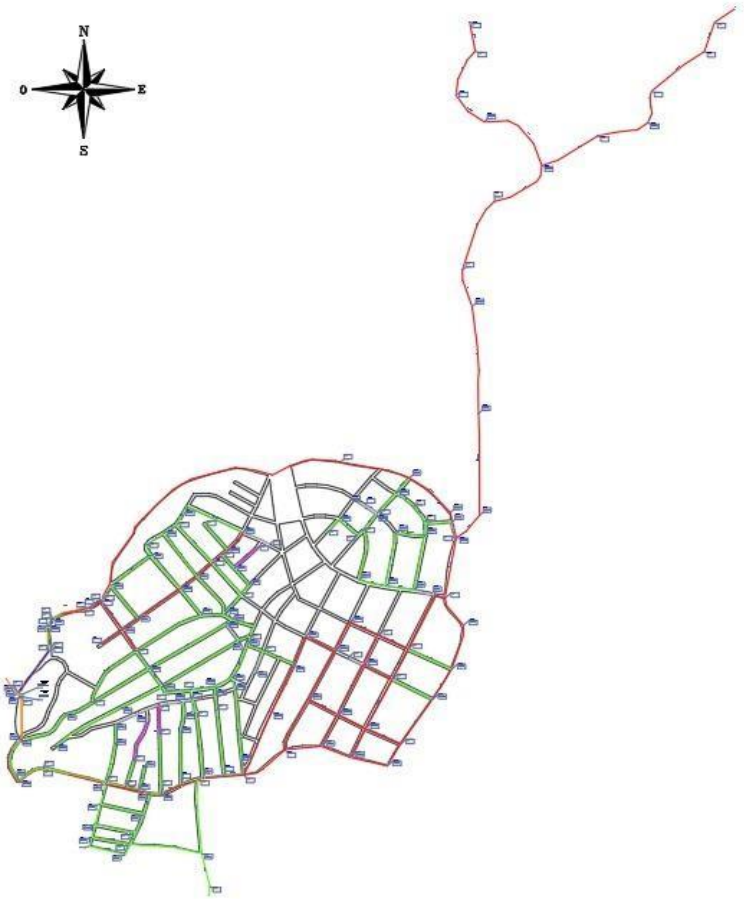
Nota: Se presenta información de los micromedidores organizada por usuario, en la que se detalla, para el usuario Ballesteros Sigifredo, un registro mensual que incluye la lectura del medidor, el consumo registrado, el tipo de consumo, y el estado de la lectura. (*ADAMIUIN,2024).*

Para el cálculo de los caudales, es fundamental determinar la demanda base en los nodos que conforman el catastro, como se detalla en la Figura 17. El proceso inició con la recopilación del consumo mensual de cada suscriptor durante algunos meses del año, con el propósito de abarcar un rango de tiempo que permitiera una mayor precisión en la estimación del caudal. No obstante, se decidió restringir el análisis al primer semestre de 2024 debido a las fluctuaciones en el número de usuarios y a la variabilidad en los consumos, factores que podrían introducir distorsiones en los resultados. Esta selección permitió ajustar los caudales a un valor más representativo de la realidad. Los datos utilizados fueron obtenidos a partir de las

micromediciones proporcionadas por la empresa. En la Tabla 1 se presenta un ejemplo del consumo mensual recopilado por suscriptor durante uno de los meses analizados.

Figura 17

Catastro de red existente



Nota: La imagen del catastro proporciona información crucial, incluyendo detalles sobre tuberías, nodos, suscriptores, diámetros y válvulas. Esta información es esencial para el análisis del sistema, y los datos fueron obtenidos de *ADAMIUAIN (2024).*

Con el fin de facilitar el manejo de la información, se estructuraron los datos de manera que reflejarán claramente el consumo mensual de cada suscriptor. Este proceso se detalla en la

Tabla 2, apreciar información completa en el (*Apéndice A*, compilación de consumo por mes), donde se presenta la evidencia correspondiente.

Tabla 2

Compilación y organización de la información del consumo mensual por suscriptor

Suscriptor	**Cons/Ene**	**Cons/Feb**	**Cons/Mar**	**Cons/Abr**	**Cons/May**	**Cons/Jun**
0100-0005-0000-	4	2	3	3	5	2
0100-0010-0000-	0	3	3	4	3	4
0100-0015-0000-	18	15	11	13	13	7
0100-0020-0000-	8	7	6	5	5	6
0100-0025-0000-	11	10	9	8	13	13
0100-0030-0000-	9	9	8	12	11	12
0100-0035-0000-	3	1	4	5	8	0
0100-0040-0000-	4	17	18	15	18	1
0100-0045-0000-	21	22	17	20	21	19
0100-0050-0000-	9	12	9	11	13	15

Nota: Se puede observar en el siguiente fragmento de la tabla, incluye datos detallados sobre los suscriptores y el consumo mensual durante el período de análisis, según la información proporcionada por ADAMIUAIN. (*Autores,2024)*

A continuación, se convirtió el consumo mensual por usuario a litros por segundo (l/s), ya que esta unidad de medida es necesaria para calcular la demanda base por nodo e integrarla en el modelo. Para realizar esta conversión, se utilizo la siguiente *Ecuacion (1)*

$$\frac{Consumo\ mensual\ promedio\ m^3}{Dias\ del\ mes * 1000} * 100 = l/s \qquad (1)$$

En la *Tabla 3* se detalla el procedimiento seguido para calcular el consumo promedio diario. Esta tabla muestra el promedio de consumo diario para cada mes y para cada suscriptor. Véase información completa en el *(Apéndice A, consumo promedio diario por suscriptor*), Posteriormente, se suman estos promedios para obtener el consumo promedio diario en metros cúbicos. Finalmente, se aplica la *fórmula (1),* previamente descrita, para convertir ese consumo a litros por segundo.

Tabla 3

Consumo promedio diario por suscriptores de la empresa en l/s

Suscrip	Cons/dia/ Ene	Cons/dia/ Feb	Cons/dia/ Mar	Cons/dia/ Abr	Cons/dia/ May	Cons/dia/ Jun	Cons prom día (m3/Dia)	Cons prom (lt/Seg)
0005	0,129	0,069	0,097	0,100	0,161	0,067	0,104	0,0012
0010	0,000	0,103	0,097	0,133	0,097	0,133	0,094	0,0011
0015	0,581	0,517	0,355	0,433	0,419	0,233	0,423	0,0049
0020	0,258	0,241	0,194	0,167	0,161	0,200	0,203	0,0024
0025	0,355	0,345	0,290	0,267	0,419	0,433	0,352	0,0041
0030	0,290	0,310	0,258	0,400	0,355	0,400	0,336	0,0039
0035	0,097	0,034	0,129	0,167	0,258	0,000	0,114	0,0013
0040	0,129	0,586	0,581	0,500	0,581	0,033	0,402	0,0046
0045	0,677	0,759	0,548	0,667	0,677	0,633	0,660	0,0076
0050	0,290	0,414	0,290	0,367	0,419	0,500	0,380	0,0044

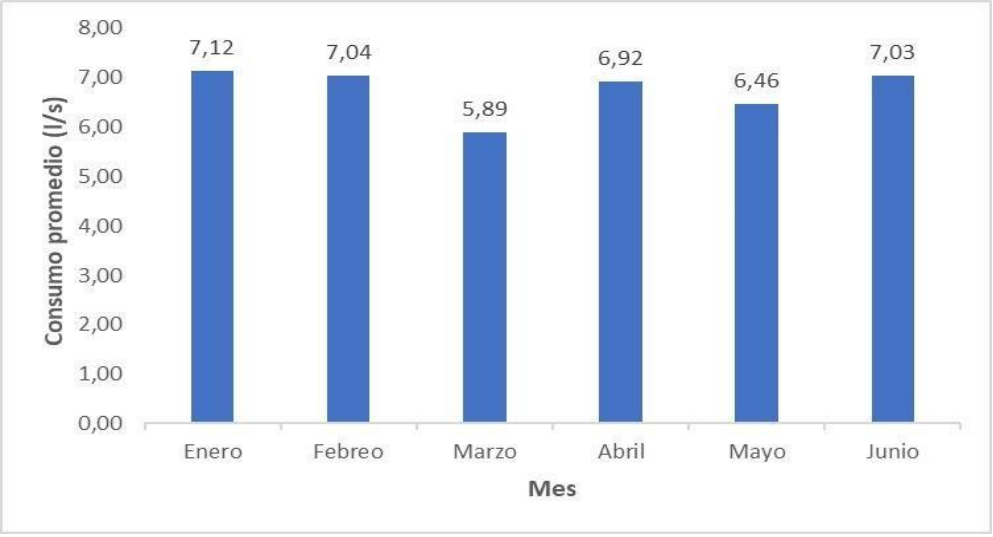
Nota: La tabla presenta un fragmento de los consumos diarios promedios correspondientes a cada mes del período de análisis, según la información proporcionada por *(ADAMIUAIN,2024).* Además, se incluye el consumo promedio diario expresado en litros por segundo, lo que permite una visión más detallada del comportamiento del consumo. Tabla tomada de *(Autores,2024)*

A continuación se muestra un resumen del consumo general de todos los suscriptores de la empresa por cada uno de los meses por medio me garficas las cuales facilitaran el manejo de la informacion

Seguidamente, se presenta la *Figura 18***,** que tiene como objetivo evidenciar el comportamiento del consumo a lo largo de los meses. En la gráfica, se observa que el consumo se mantiene relativamente homogéneo durante el período analizado.

Figura 18

Consumo promedio mensual en l/s por la totalidad de suscriptores de la empresa

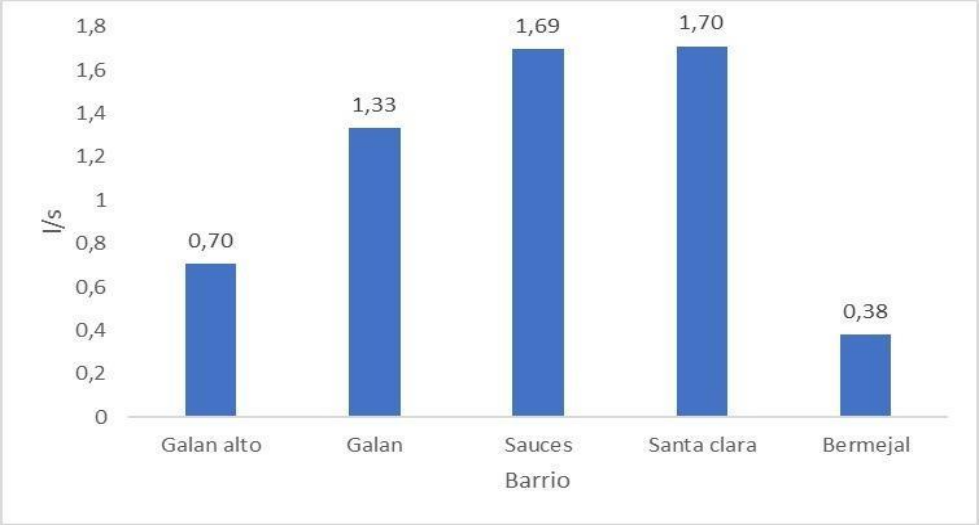


Nota: tomado de *(Autores,2024)*

Luego se elaboraron dos gráficas para complementar el análisis. La primera muestra el consumo total de agua en litros por segundo (l/s) para cada barrio, y la segunda refleja el consumo promedio por suscriptor en cada uno de ellos. En la *Figura 19* se presenta el consumo total por barrio, mientras que en la *Figura 20* se ilustra el consumo promedio por suscriptor de cada barrio.

Figura 19

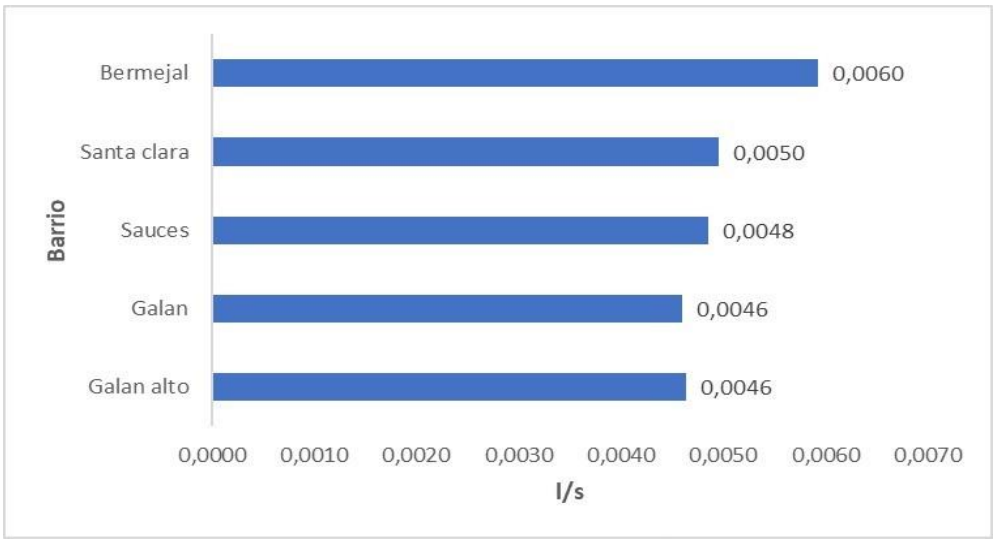
Consumo promedio en l/s de cada barrio del que abastece la empresa



Nota: Se evidencia como el barrio de Santa clara, seguido del de los Sauces son los barrios con el mayor consumo registrado, siendo de 1,7 l/s y 1,69 l/s respectivamente. (*Autores, 2024).*

Figura 20

Consumo promedio en l/s de cada suscriptor



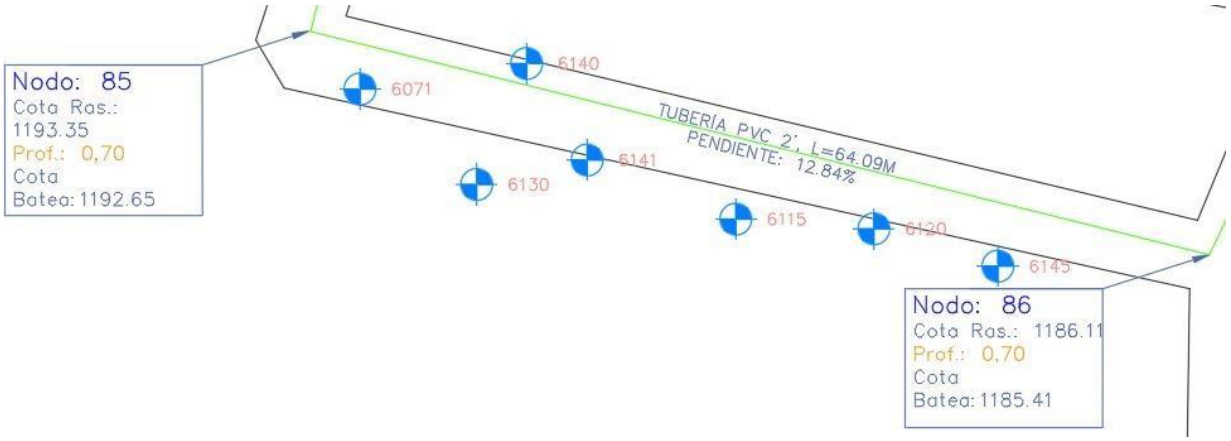
Nota: Se puede ver claramente como los suscriptores de Bermejal son los que más consumen, seguidos por los de Santa Clara, Sauces, Galán y por último Galán parte alta. (*Autores,2024).*

4.1.2 Cálculo de caudales reales de la malla de acueducto

El cálculo de los caudales por nodo se realizó utilizando el catastro de red proporcionado por la empresa, tal como se mencionó previamente. Este catastro incluye la nomenclatura de los nodos, las tuberías correspondientes y los usuarios asociados a cada tramo. En la *Figura 21* se presenta un detalle ampliado del catastro de la red, donde se muestra un ejemplo en el que, entre los nodos 85 y 86, se encuentran registrados un total de 7 suscriptores.

Figura 21

Zoom del catastro de red de ADAMIUAIN con sus usuarios



Nota: Este fragmento tomado, fue extraído del catastro de red, donde se identifican tanto los usuarios como los nodos que comparten. (*Adamiuain,2020)*

Una vez identificados los suscriptores del tramo y su consumo en l/s, se procede a calcular el caudal correspondiente a cada nodo. En la *Tabla 4* se presenta el consumo en l/s de las viviendas incluidas en el tramo seleccionado como ejemplo, destacando los nodos 85 y 86. Véase información completa en el *(Apéndice A, consumo por día).*

Tabla 4

Consumo promedio de los suscriptores del tramo entre los nodos 85 y 86 en l/s

Suscriptor	**Consumo promedio (lt/Seg)**
0600-6071-0000-	0
0600-6115-0000-	0,0067

0600-6120-0000-	0,0022
0600-6130-0000-	0,0008
0600-6140-0000-	0,0041
0600-6141-0000-	0,0045
0600-6145-0000-	0,0036

Nota: tomado de (*Autores,2024)*

A continuación, se calcula la sumatoria de los consumos de cada suscriptor siguiendo el procedimiento descrito y como se detalla en la *Ecuación (2).*

$$Q = \sum consumo\ promedio\ diario\ l/s \qquad (2)$$

$$Q = 0{,}0219\ l/s$$

Luego este procedimiento se llevó a cabo para cada uno de los tramos y nodos del catastro de la red, detallando el barrio correspondiente, la cantidad de suscriptores, los nodos involucrados, así como la nomenclatura y el diámetro de las tuberías. En la *Tabla 5* se presenta de manera más clara toda esta información, incluyendo el caudal en litros por segundo (l/s) de cada tramo que forma parte del catastro. Ver información completa en el *(Apéndice A, cálculo de caudales).*

Tabla 5

Tabla de consumo de cada uno de los tramos del catastro

	Tramo		*Tubería*	*Color*	*Diámetro Tubería*	*Cant de suscriptores*	*Cons Total Lt/Seg*
	Nodo Inicial	*Nodo final*					
	1B	*2B*	*T16*	*verde*	*2"*	*1*	*0,0012*
	2B	*3C*	*P159*	*verde*	*2"*	*4*	*0,0064*
	3C	*4A-1*	*P126*	*verde*	*2"*	*0*	*0*
	4A-1	*5B*	*T10*	*verde*	*2"*	*4*	*0,027*
	5B	*6B*	*P1*	*verde*	*2"*	*5*	*0,0278*
	6B	*10*	*P70*	*verde*	*2"*	*2*	*0,0081*
	10	*9*	*T8*	*verde*	*2"*	*13*	*0,0616*
	10	*11*	*P71*	*verde*	*2"*	*15*	*0,0776*
Galán	*11*	*12*	*P72*	*verde*	*2"*	*3*	*0,01*
Alto	*11*	*13*	*P78*	*verde*	*2"*	*15*	*0,0651*
	12	*14*	*P73*	*verde*	*2"*	*3*	*0,0145*
	14	*16*	*T25*	*verde*	*2"*	*3*	*0,0177*
	14	*15*	*P74*	*verde*	*2"*	*17*	*0,0809*
	16	*18*	*P75*	*verde*	*2"*	*10*	*0,0398*
	16	*17*	*P84*	*verde*	*2"*	*13*	*0,0643*
	18	*22*	*P76*	*verde*	*2"*	*23*	*0,1101*
	19	*21*	*P77*	*verde*	*2"*	*13*	*0,0545*

6A	*7*	*P79*	*Roja*	*3"*	*9*	*0,0419*

Nota: Esta tabla es un extracto del archivo en Excel, en el que se realiza el análisis previamente descrito para uno de los sectores estudiados, en este caso, el barrio Galán parte alta.

(*Autores,2024)*

Una vez determinado el caudal para cada tramo de la red, se procede a calcular la demanda de cada nodo. La demanda de un nodo se obtiene sumando el caudal de los tramos que llegan a él y dividiendo el total por dos. Este cálculo se ilustra en la *Ecuación (3).*

$$Qnodo = \frac{\sum caudal\ tramos\ que\ le\ llegan\ al\ nodo}{2} \qquad (\ 3\ )$$

$$Q_{nodo85} = \frac{0{,}0219}{2} = 0{,}0109\ l/s$$

$$Q_{nodo86} = \frac{0{,}0219}{2} = 0{,}0109\ l/s$$

Este proceso se aplicó a cada nodo de la red, permitiendo la determinación de los caudales reales en toda la malla. La *Tabla 6* presenta un resumen de algunos nodos, incluyendo los caudales medidos para cada uno de ellos. Véase datos completos en *(Apéndice A, cálculo de caudales).*

Tabla 6

Demanda base de los distintos nodos del catastro en l/s

Caudal por Nodos	
Nodo	*Caudal Por Nodo*
1B	*0,000*
2B	*0,003*
3C	*0,003*
4A-1	*0,014*
5B	*0,027*
6B	*0,018*
9	*0,046*
10	*0,074*
11	*0,076*
12	*0,012*
13	*0,057*
14	*0,057*
15	*0,042*
16	*0,061*
17	*0,028*
18	*0,075*
19	*0,027*
21	*0,034*
22	*0,069*

6A	*0,021*
7	*0,051*

Nota: tomado de *(Autores,2024)*

4.1.3 Comparación de los consumos de los usuarios de Galán alto y Población total con la norma

Para el cálculo del consumo según la norma, nos basamos en la normativa colombiana, específicamente en la Resolución 0330 de 2017, la cual establece que la dotación neta máxima depende directamente de la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida. Véase en la *Tabla 7.* A continuación, se presenta la dotación neta máxima por habitante según la altura promedio. (*Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)*

Tabla 7

Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida (tomado de la resolución 0330, 2017, articulo 43)

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

Nota: tomado de la (*resolución 0330, 2017, articulo 43)*

En el caso del municipio de Ocaña, cuya altitud oscila entre los 400 y 2600 m.s.n.m, con un promedio de 1500 m.s.n.m (Alcaldía Municipal de Ocaña, 2012), la dotación neta para sus habitantes es dada por la *expresión (4)*.

$$D_{neta} = 130 \frac{lt}{hab} * día \qquad (4)$$

Una vez determinada la dotación neta para el municipio, se procede a calcular la dotación bruta. La Resolución 0330 de 2017 establece la siguiente *ecuación (5).* (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

$$Dbruta = \frac{Dneta}{1 - \%\, perdidas} \qquad (5)$$

Donde el porcentaje de perdidas máximas no debe superar el 25% (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)

4.1.4 Cálculo de la dotación bruta

Utilizando la ecuación (5), se encuentra la dotación bruta, para el caso de Ocaña.

$$D_{bruta} = \frac{130}{1 - 25\ \%} = 173{,}33\ \frac{lt}{hab} * día$$

Como se observa la unidad de medida de la dotación está expresada en litros/habitante*día, mientras que el registro de micromedición se encuentra en l/s*suscriptor, así que el siguiente paso es realizar la conversión.

Según el DANE (2018), el promedio de habitantes por vivienda en el municipio de Ocaña es de 3,3 habitantes/vivienda. Luego el cálculo de caudal por suscriptor en el municipio se hace mediante el uso de la siguiente *ecuación (6)*

$$Qsuscriptor = \frac{Dneta * \frac{Hab}{viv}}{86400s} \qquad (6)$$

$$Q_{suscriptor} = \frac{D_{neta} * Hab/viv}{86400s}$$

$$Q_{suscriptor} = \frac{173{,}33\frac{lt}{hab} * día * 3{,}3\,\frac{Hab}{Viv}}{86400s} = 0{,}0066\ l/s$$

Se concluye que el consumo por suscriptor para el municipio de Ocaña debe ser de 0,0066 l/s

Una vez encontrado el consumo establecido por la norma se procede a compararlo con el consumo de los suscriptores de ADAMIUAIN, en la siguiente tabla se muestran los consumos promedios del sector de galán parte alta, de toda la población y el de la norma ver *Tabla 8.*

Tabla 8

Consumo por suscriptores

Consumo por norma (l/s)	0,0066
Consumo de Galán alto (l/s)	0,0046
Consumo promedio total (l/s)	0,0048

Nota: (*Autores,2024)*

A partir de estos datos, se concluye que tanto el sector de Galán Alto como la población total abastecida por la empresa presentan un consumo inferior al máximo permitido por la normativa. Aunque el flujo hacia estas zonas no es constante, se observa que los habitantes están consumiendo una cantidad adecuada de agua para satisfacer sus necesidades.

4.2 Estimar el patrón de consumo basados en los récords de información de macro medición de los últimos 6 años registrados por la empresa, con el fin de realizar una simulación 24 horas de la red.

4.2.1 Consulta, recolección y almacenamiento de información de macro mediciones de los últimos seis años

En el marco del presente estudio, se llevaron a cabo visitas a la sede de la empresa ADAMIUAIN véase en la *Figura 15 ,22 y 23,* con el fin de recolectar datos provenientes de macromedicones. Tras un análisis preliminar, se determinó que la información relevante para el estudio abarcaría el período comprendido entre los años 2018 y 2024. Esta decisión se fundamentó en la complejidad de los datos disponibles y en la calidad de la información previa a 2018, la cual resultaba incompleta. Además, se identificó que algunas tuberías de la red carecían de micromedidores antes de esa fecha, lo que imposibilitaba obtener patrones de consumo precisos. Por tanto, se consideró que los datos recopilados durante los últimos cinco años y medio serían suficientes y adecuados para fines del estudio.

Figura 22

Macro medidores caja A



Nota: Los Macromedidores situados en la caja A de la empresa ADAMIUAIN realizan las lecturas necesarias para el monitoreo del sistema. (*Autores,2024).*

Figura 23

Visita guiada en la empresa ADAMIUAIN

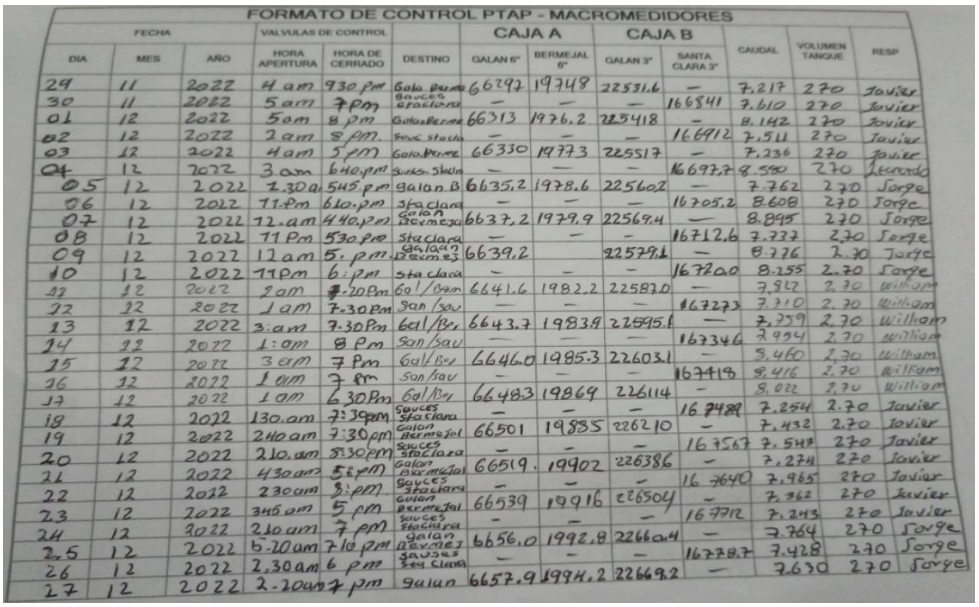


Nota: Se realizó una visita guiada en compañía de un operador de la empresa para comprender el funcionamiento interno de la misma. En la figura se ilustra el recorrido a las cajas de control, donde se gestionan las válvulas de cierre y se toman las lecturas de las macromediciones. *(Autores,2024)*

La información requerida fue suministrada por la empresa en formato impreso, completado manualmente, consulte la *Figura 14.* Estos registros incluyen detalles como fechas y horarios de apertura y cierre de las válvulas, destino del flujo de agua, volumen del tanque, nombre del responsable de la toma de datos, y la información correspondiente al macromedidor para los barrios Galán, Bermejal y Santa Clara, categorizada según el diámetro de las tuberías. Además, se registró la ubicación de la llave de control, indicando si se encontraba en la caja A o B. Es importante destacar que las mediciones se realizan en días alternos, ya que, durante la época de sequía, el caudal de agua disponible no es suficiente para abastecer toda la red.

Figura 24

Formato control de Macromedidores en PTAP



FORMATO DE CONTROL PTAP - MACROMEDIDORES

FECHA			VALVULAS DE CONTROL			CAJA A		CAJA B		CAUDAL	VOLUMEN TANQUE	RESP
DIA	MES	AÑO	HORA APERTURA	HORA DE CERRADO	DESTINO	GALAN 6"	BERMEJAL 6"	GALAN 3"	SANTA CLARA 3"			
29	11	2022	4 am	930 pm	Gala Bume	66297	19748	22531.6	—	7.217	270	Javier
30	11	2022	5 am	7 PM	Sauces Staclara	—	—	—	166841	7.610	270	Javier
01	12	2022	5 am	8 pm	Galan Bermej	66313	1976.2	225418	—	8.142	270	Javier
02	12	2022	2 am	8 PM	Sauc Stacla	—	—	—	166912	7.511	270	Javier
03	12	2022	4 am	5 PM	Gala Berme	66330	19773	225517	—	7.236	270	Javier
04	12	2022	3 am	640 pm	Sauc. Stacla	—	—	—	166977	8.590	270	Leonardo
05	12	2022	7.30 a	545 pm	Galan B	6635.2	1978.6	225602	—	7.762	270	Jorge
06	12	2022	11 Pm	610 pm	Sta clara	—	—	—	167052	8.608	270	Jorge
07	12	2022	12 am	440 pm	Galan Bermeja	6637.2	1979.9	225694	—	8.895	270	Jorge
08	12	2022	11 Pm	530 pm	Staclara	—	—	—	167126	7.737	270	Jorge
09	12	2022	12 am	5. pm	Galan Bermej	6639.2		225791	—	8.776	270	Jorge
10	12	2022	11 Pm	6: pm	Sta clara	—	—	—	167200	8.255	270	Jorge
11	12	2022	8 am	7.20 Pm	Gal/Ber	6641.6	1982.2	225870	—	7.342	270	William
12	12	2022	1 am	7.30 Pm	San/Sau	—	—	—	167273	7.310	270	William
13	12	2022	3: am	7.30 Pm	Gal/Ber	6643.7	1983.9	225945	—	7.259	270	William
14	12	2022	1: am	8 Pm	San/Sau	—	—	—	167346	7.994	270	William
15	12	2022	3 am	7 Pm	Gal/Ber	6646.0	1985.3	226031	—	8.460	270	William
16	12	2022	1 am	7 8m	San/Sau	—	—	—	167419	8.416	270	William
17	12	2022	1 am	6 30 Pm	Gal/Ber	66483	19869	226114	—	8.022	270	William
18	12	2022	130. am	7:30 pm	Sauces Staclara	—	—	—	167488	7.254	270	Javier
19	12	2022	240 am	7:30 pm	Galan Bermejal	66501	19885	226210	—	7.432	270	Javier
20	12	2022	210. am	8:30 pm	Sauces Staclara	—	—	—	167567	7.543	270	Javier
21	12	2022	430 am	5: pm	Galan Bermejal	66519.	19902	226386	—	7.274	270	Javier
22	12	2022	230 am	3: pm	Sauces Staclara	—	—	—	167640	7.965	270	Javier
23	12	2022	345 am	5 pm	Galan Bermejal	66539	19916	226504	—	7.362	270	Javier
24	12	2022	210 am	7 pm	Sauces Staclara	—	—	—	167712	7.243	270	Javier
25	12	2022	5.20 am	710 pm	galan Bermej	6656.0	1992.8	226644	—	7.764	270	Jorge
26	12	2022	2.30 am	6 pm	Sauces Sta Clara	—	—	—	167787	7.428	270	Jorge
27	12	2022	2.20 am	7 pm	galan	6657.9	1994.2	226692	—	7.630	270	Jorge

Nota: Tomado de (*ADAMIUIN, 2024)*

La información fue organizada de manera que facilitara el análisis de los patrones de consumo. Para ello, se creó una tabla que registra la fecha, hora, lectura del macromedidor por cada tubería de distribución y el consumo correspondiente, calculado mediante la diferencia entre la lectura actual y la anterior, teniendo en cuenta la hora en que se realizó el registro. Los detalles del proceso aplicado para el año 2020 se ilustran en las *Tablas 9 y 10*. Luego para una apreciación detallada de la información ver *(Apéndice B, macromediciones por año),* así mismo este método se aplicó a cada año de datos desde 2018, lo que permitió realizar un análisis comparativo a lo largo del tiempo.

Es importante destacar que la empresa no contaba con un procedimiento sistemático para la toma de lecturas a intervalos regulares. Las lecturas se realizaban de manera arbitraria, principalmente durante el cierre o apertura de válvulas para abastecer otros sectores de la red.

Esta falta de un procedimiento sistemático impidió establecer una secuencia temporal precisa por horas, lo que complicó el análisis de los patrones de consumo.

Tabla 9

Fragmento macromediciones ADAMIUAIN

MACROMEDICIONES ADAMIUAIN - 2020					
FECHA	**HORA**	**Galan 6"**	**Consumo Galan 6"**	**Bermejal 6"**	**Consumo Bermejal 6"**
miércoles, 1 de enero de 2020	12:00:00 p. m.	5473,2	0	12188,9	0
jueves, 2 de enero de 2020	8:40:00 p. m.	5473,2	0	12188,9	0
viernes, 3 de enero de 2020	2:00:00 p. m.	5475,3	2,1	12199,1	10,2
sábado, 4 de enero de 2020	9:00:00 p. m.	5475,3	0	12199,1	0
domingo, 5 de enero de 2020	10:00:00 p. m.	5477	1,7	12206,3	7,2
lunes, 6 de enero de 2020	8:00:00 p. m.	5477	0	12206,3	0
martes, 7 de enero de 2020	1:00:00 p. m.	5479,4	2,4	12215,8	9,5

Nota: tomado de (*ADAMIUAIN, 2024)*

Tabla 10

Fragmento macromediciones ADAMIUAIN

MACROMEDICIONES ADAMIUAIN - 2020					
FECHA	**HORA**	**Galán 3"**	**Consumo Galán 3"**	**S. Clara 3"**	**Consumo S. Clara 3"**
miércoles, 1 de enero de 2020	12:00:00 p. m.	17093,6	0	12196,6	0
jueves, 2 de enero de 2020	8:40:00 p. m.	17093,6	0	12196,6	0
viernes, 3 de enero de 2020	2:00:00 p. m.	17102,6	9	12196,6	0
sábado, 4 de enero de 2020	9:00:00 p. m.	17102,6	0	12212,8	16,2
domingo, 5 de enero de 2020	10:00:00 p. m.	17121,6	19	12212,8	0
lunes, 6 de enero de 2020	8:00:00 p. m.	17121,6	0	12222,8	10
martes, 7 de enero de 2020	1:00:00 p. m.	17130,8	9,2	12222,8	0

Nota: tomado de (*ADAMIUAIN, 2024)*

4.2.2 Análisis y procesamiento de información recopilada

La información contenida en las *Tablas 9 y 10* fue ingresada en una tabla dinámica utilizando la herramienta Excel, donde se calculó el promedio de consumo por hora. Este análisis resultó en la *Tabla 11*, que muestra los promedios estimados. Dado que la empresa no dispone de una estimación sistemática de los datos y en su lugar distribuye el agua alternando entre los barrios, se tomó la decisión de agrupar todas las mediciones dentro de intervalos de tiempo específicos. Por ejemplo, todos los consumos registrados entre las 9:00 a.m. y las 9:59 a.m. fueron sumados para obtener un total por hora para cada uno de los cuatro macromedidores de la empresa. Esta metodología se adoptó porque la definición de patrón de consumo requiere el promedio de consumo en intervalos de 24 horas, con datos agrupados por hora. Además, agrupar la información en intervalos horarios facilita la gestión y el análisis dentro del programa EPANET, y es una práctica común empleada por organismos municipales para manejar este tipo de datos.

Es crucial destacar que, como se mencionó anteriormente, la empresa no puede suministrar agua potable a todos sus suscriptores simultáneamente. En su lugar, el servicio se alterna diariamente o en función al volumen de agua disponible en el tanque. Esta alternancia afecta el patrón de consumo, ya que la comunidad adapta su uso de agua en función de la disponibilidad del servicio y la capacidad de los tanques de almacenamiento. No obstante, el análisis del patrón de consumo se realizó bajo las mismas condiciones a lo largo de los últimos seis años, utilizando las macromediciones proporcionadas por la empresa.

Tabla 11

Consumo promedio en 24 horas por macromedidor.

Hora	Prom de Consumo Caja A Galán 6"	Prom de Consumo Caja A Bermejal 6"	Prom de Consumo Caja B Galán 3"	Prom de Consumo Caja B Santa Clara 3"
12:00:00 a. m.	0,81	1,71	3,06	3,53
1:00:00 a. m.	0,69	1,21	3,86	6,50
2:00:00 a. m.	0,91	1,08	4,40	5,99
3:00:00 a. m.	1,09	1,79	4,82	7,66
4:00:00 a. m.	1,25	1,73	6,63	4,85
5:00:00 a. m.	1,42	2,32	7,10	3,82
6:00:00 a. m.	0,47	2,76	9,43	4,93
7:00:00 a. m.	2,34	4,46	15,71	1,84
8:00:00 a. m.	1,06	1,90	6,50	4,80
9:00:00 a. m.	1,33	2,05	7,43	3,05
10:00:00 a. m.	2,28	5,99	16,83	3,53
11:00:00 a. m.	1,43	9,51	8,22	4,68
12:00:00 p. m.	1,00	2,27	4,47	5,96
1:00:00 p. m.	2,50	4,53	11,98	1,99
2:00:00 p. m.	1,99	6,54	8,16	1,19
3:00:00 p. m.	2,28	5,94	11,04	1,52
4:00:00 p. m.	1,44	3,92	6,41	3,27
5:00:00 p. m.	2,03	4,75	8,82	2,09

6:00:00 p. m.	1,65	4,48	6,83	3,03
7:00:00 p. m.	0,86	2,35	3,75	2,83
8:00:00 p. m.	1,39	2,92	5,45	4,83
9:00:00 p. m.	0,97	2,19	4,53	5,78
10:00:00 p. m.	1,00	2,24	4,44	5,39
11:00:00 p. m.	0,63	1,60	2,65	6,92

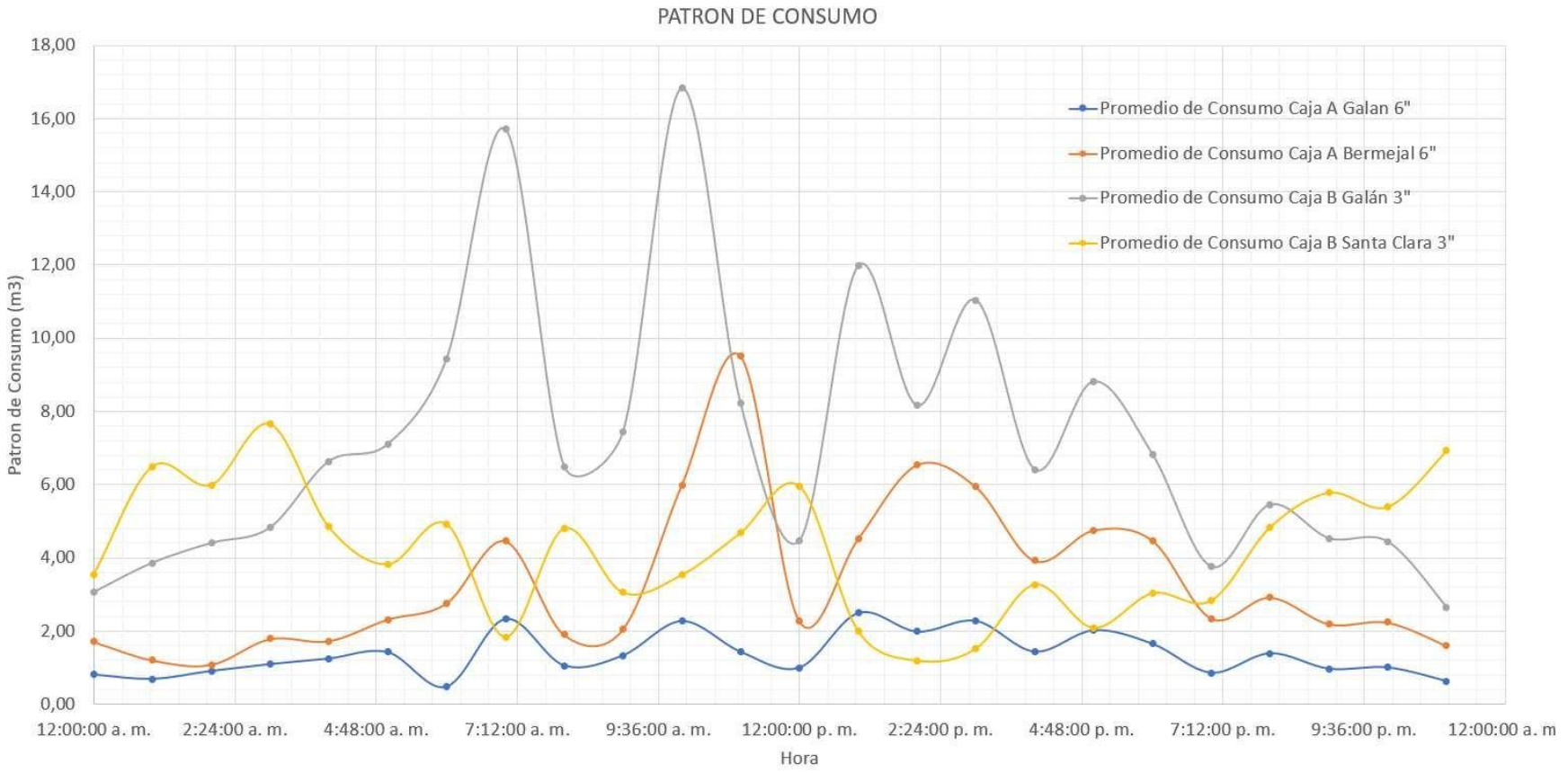
Nota: La tabla anterior presenta los resultados obtenidos al ingresar la información de macromediciones desde 2018 hasta el primer semestre de 2024 en una tabla dinámica en excel. Esta tabla incluye variables clave como la hora y el promedio de consumo por hora del día para cada macromedidor en la red de distribución. (*Autores, 2024*).

4.2.3 Patrón de consumo

A continuación, en la *Figura 25*, se presenta el patrón de consumo graficado, elaborado mediante un diagrama en Excel utilizando los datos de la *Tabla 11*. Este gráfico muestra los picos máximos y mínimos de consumo registrados por el macromedidor a lo largo del tiempo, permitiendo visualizar las variaciones en el flujo de manera clara.

Figura 25

Gráfico Patrón de consumo



Nota: El gráfico muestra en el eje vertical el consumo registrado, mientras que en el eje horizontal se representa su comportamiento lo largo del tiempo. Cabe destacar que se incluyen cuatro macromedidores, los cuales están diferenciados en la leyenda mediante colores distintivos. *(Autores, 2024)*

A partir de este gráfico, se puede observar que las curvas presentan un comportamiento similar en ciertos momentos del día. Esto permite realizar la siguiente síntesis de la información obtenida.

En primer lugar, para la caja A, que cuenta con una tubería de seis pulgadas y un macromedidor encargado de controlar el abastecimiento de agua potable en el sector de Galán parte baja, se ha identificado que el consumo presenta su pico máximo durante el día con un valor de 2,50 metros cúbicos, registrado alrededor de la 1:00 p.m. El consumo mínimo en este sector se observa a las 6:00 a.m., con un valor de 0,47 metros cúbicos.

En segundo lugar, para la misma caja A, que igualmente tiene una tubería de seis pulgadas y un macromedidor que regula el suministro de agua potable para el sector de Bermejal, se ha detectado que el consumo máximo diario alcanza 9,51 metros cúbicos, registrado alrededor de las 11:00 a.m. Por otro lado, el consumo mínimo en este sector se registra a las 2:00 a.m., con un valor de 1,08 metros cúbicos.

En tercer lugar, en la caja B, con una tubería de tres pulgadas y un macromedidor encargado del abastecimiento de agua en el sector de Galán parte media, el consumo presenta su pico máximo diario con un valor de 16,83 metros cúbicos, observado alrededor de las 10:00 a.m. El consumo mínimo en esta área se registra a las 11:00 p.m., con un valor de 2,65 metros cúbicos.

Finalmente, para la caja B, que cuenta con una tubería de seis pulgadas y un macromedidor que abastece los barrios de Santa Clara y Los Sauces, el pico máximo de consumo se presenta a las 6:00 a.m. con un valor de 7,66 metros cúbicos. El consumo mínimo en estos barrios se observa a las 2:00 p.m., con un valor de 1,19 metros cúbicos.

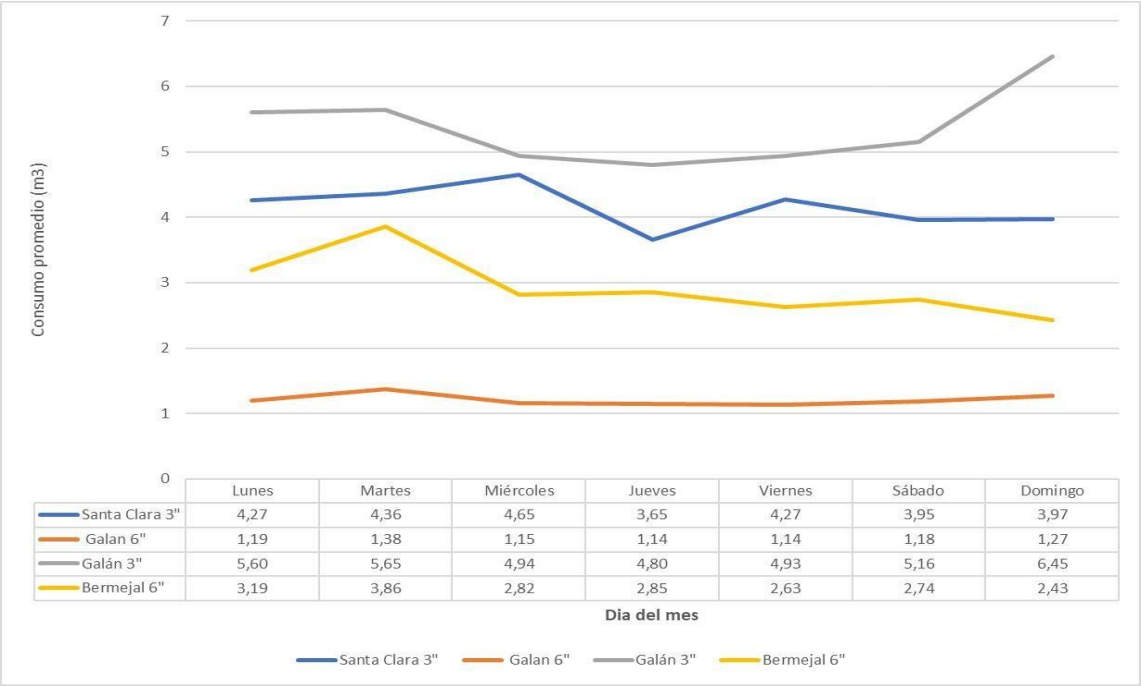
Este análisis de los caudales a lo largo del día en diferentes sectores permite entender los patrones de consumo y optimizar la gestión del recurso hídrico en cada área.

Por otro lado, se tomó la decisión de realizar el análisis del patrón de consumo de manera anual con el objetivo de desglosar y examinar en detalle un conjunto de datos extenso. Este enfoque permite visualizar las fluctuaciones y tendencias específicas de cada año, facilitando la identificación de comportamientos anómalos. o patrones recurrentes que podrían quedar ocultos en un análisis más generalizado. Al segmentar los datos por año, se busca obtener una mayor precisión en la interpretación del comportamiento de consumo, lo que resultará en un análisis más robusto y fundamentado para la toma de decisiones, véase dichos patrones en el Apéndice B (Archivo *Excel.xlsx* compilación de macromediciones y patrón de consumo).

Con el fin de proporcionar una información más detallada, se decidió elaborar un gráfico que refleja el consumo diario en la red, desglosado por macromedidor. Este gráfico se construyó a partir de los datos previamente obtenidos del patrón de consumo, permitiendo observar con mayor amplitud el comportamiento del consumo promedio. Los resultados se presentan en la *Figura 26.*

Figura 26

Consumo promedio diario en m^3



	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Santa Clara 3"	4,27	4,36	4,65	3,65	4,27	3,95	3,97
Galan 6"	1,19	1,38	1,15	1,14	1,14	1,18	1,27
Galán 3"	5,60	5,65	4,94	4,80	4,93	5,16	6,45
Bermejal 6"	3,19	3,86	2,82	2,85	2,63	2,74	2,43

Nota: En el gráfico se destaca el consumo en metros cúbicos en el eje vertical, mientras que el eje horizontal representa los días de la semana. Este gráfico proporciona una visión más detallada del comportamiento del consumo a lo largo del tiempo, permitiendo identificar los días de mayor demanda. (*Autores, 2024).*

4.2.4 Otros patrones de consumo

Luego se seleccionó la zona de Galán Alta para el análisis, debido a que es el barrio más afectado durante la escasez de agua. Esta información fue proporcionada por los operarios que realizan recorridos frecuentes por las calles y tienen contacto directo con la comunidad. Sin embargo, la red de distribución de agua en esta área carece de un macromedidor, lo que limita la disponibilidad de datos precisos para identificar el patrón específico de consumo. En vista de

esta limitación, se optó por estudiar los patrones de consumo previamente establecidos para la red general, ver *Figura 25* y crear un patrón de consumo promedio.

Todo esto es considerable gracias a las condiciones demográficas de la zona. Este enfoque permitirá evaluar si es viable trabajar con la información disponible para obtener un análisis representativo.

Por consiguiente, durante el trabajo de campo como se observa en la *Figura 27*, se observó que la comunidad exhibe patrones de comportamiento similares, atribuibles a que la mayoría de sus miembros pertenecientes a la clase obrera y comparten horarios de trabajo semejantes. Además, la mayoría de la población está clasificada en los estratos 1 y 2, como se ilustra en la *Figura 28.* Esta información fue proporcionada por ADAMIUAIN y se detalla en la *Tabla 12.* Luego se puede ver todos los datos detallados en el *(Apéndice B, estrato socioeconómico)*

Figura 27

Recorrido por la zona de influencia de la empresa ADAMIUAI



Nota: Se llevaron a cabo recorridos y visitas a los barrios cubiertos por el servicio de la empresa ADAMIAUIN para evaluar las condiciones de vida y culturales de sus residentes. Esta jornada tenía como objetivo comprender mejor el entorno en el que se presta el servicio. (*Autores, 2024).*

Tabla 12

Estrato socioeconómico por usuario

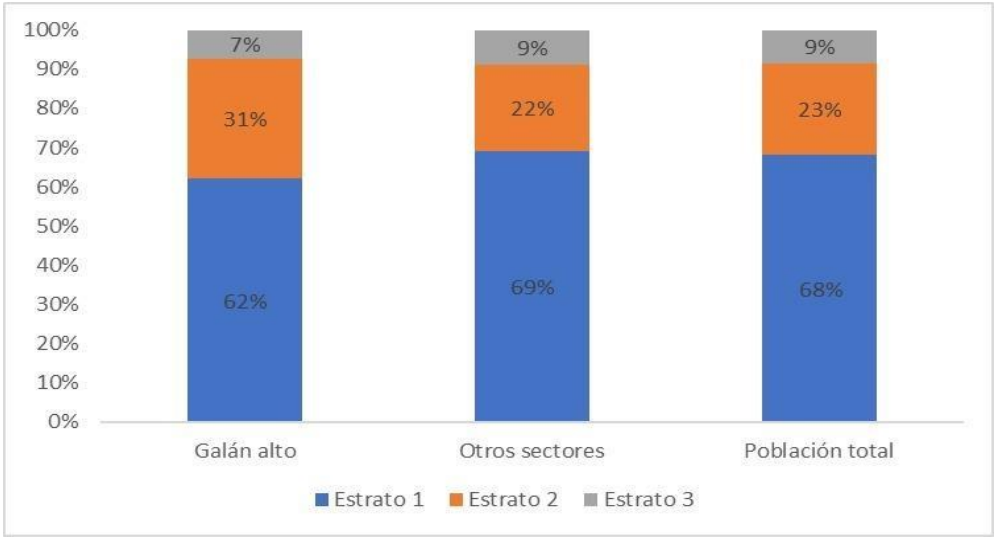
suscriptor	***estrato***
0100-0005-0000-	*01*
0100-0010-0000-	*01*
0100-0015-0000-	*01*
0100-0020-0000-	*02*
0100-0025-0000-	*02*

0100-0030-0000-	*02*
0100-0035-0000-	*02*
0100-0040-0000-	*02*
0100-0045-0000-	*02*
0100-0050-0000-	*01*
0100-0055-0000-	*02*

Nota: Fragmento de información relativo al estrato social de cada uno de los usuarios de la empresa ADAMIUAIN. (*ADAMIUAIN, 2024).*

Figura 28

Gráfico estrato social



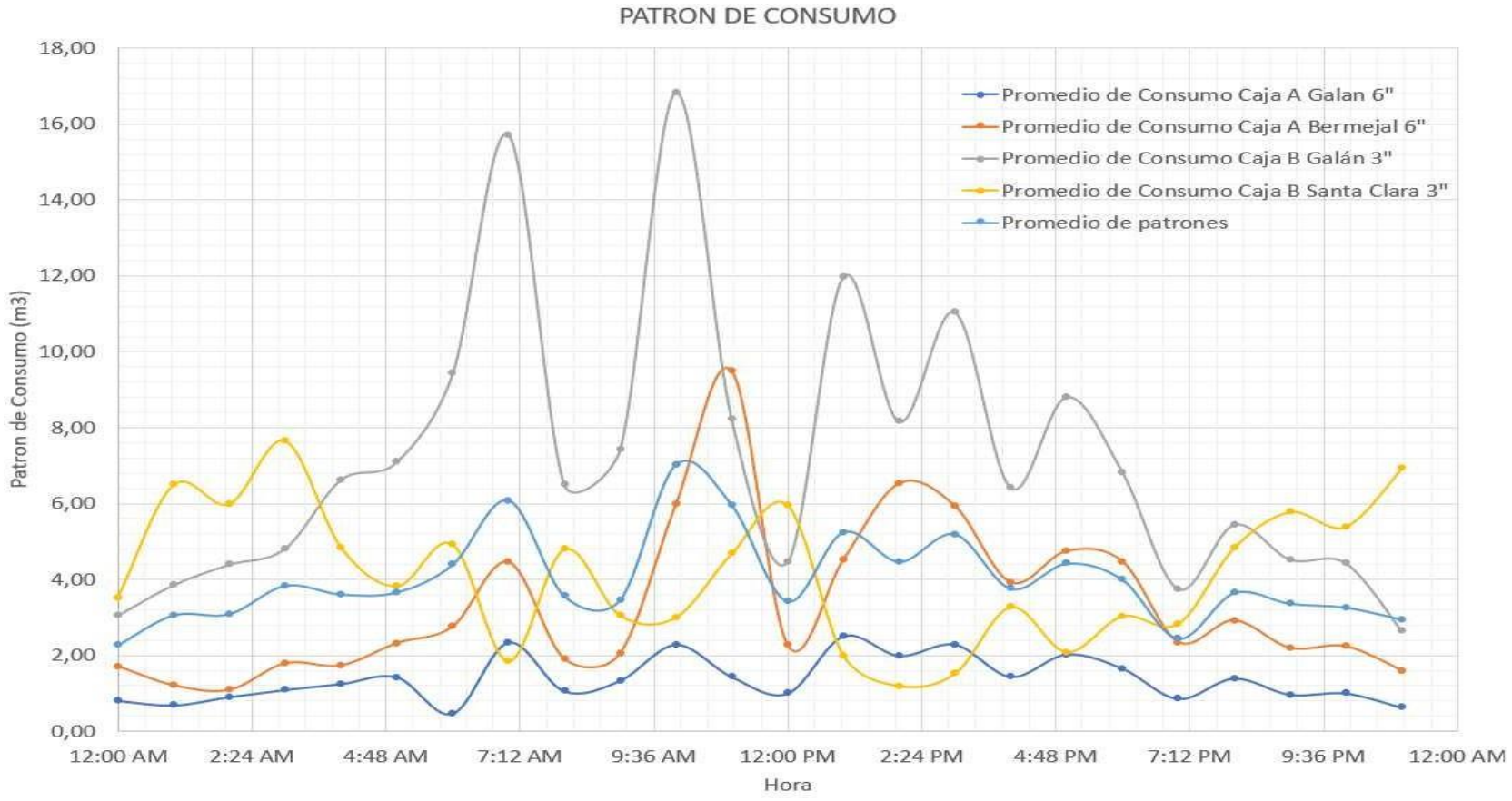
Nota: En el gráfico anterior se ilustran los estratos sociales expresados en porcentajes. La gráfica está compuesta por tres componentes: el primero representa el sitio de análisis en Galán Parte Alta; el segundo abarca otros sectores, excluyendo Galán Parte Alta; y el tercero incluye la totalidad de la población. *(Autores,2024)*

Las visitas realizadas al sitio de influencia de la empresa, junto con la información proporcionada por ADAMIUAIN y el análisis del estrato socioeconómico, han permitido validar las condiciones de vida, culturales, económicas y sociales en el área de estudio. Esta combinación de datos proporciona una base sólida y confiable para el análisis y donde cualquier patrón de consumo podría servir a fin de modelar la red de distribución para el sector de galán parte alta. Así mismo utilizando estos datos y patrones ver Figura 25, se ha desarrollo el patrón promedio que refleja con precisión la realidad del sitio de estudio, Este enfoque asegura una estimación más precisa y representativa del comportamiento en la zona.

Con base en la información previamente mencionada y los datos presentados en la Tabla 11, se llevó a cabo el análisis utilizando Excel. Este proceso generó la Figura 29, en la cual se pueden observar claramente los patrones identificados, así como el patrón promedio obtenido a partir del análisis.

Figura 29

Patrón promedio



Nota: la gráfica anterior muestra los patrones de consumo por macromedidor vistos en la figura 17, además del patrón promedio.

(Autores, 2024)

El análisis del patrón de consumo promedio revela que el consumo máximo alcanza 7.02 metros cúbicos alrededor de las 10:00 am, mientras que el consumo mínimo se observa en 2.28 metros cúbicos cerca de las 12:00 am. Esta variabilidad en el consumo indica que los datos obtenidos son coherentes y concluyentes.

4. 3 Modelar la red de distribución de agua potable existente de la empresa, a través del software EPANET 2.0 y calibrarlo por presiones instantáneas tomadas en campo, para la optimización de la toma de decisiones por parte de la empresa.

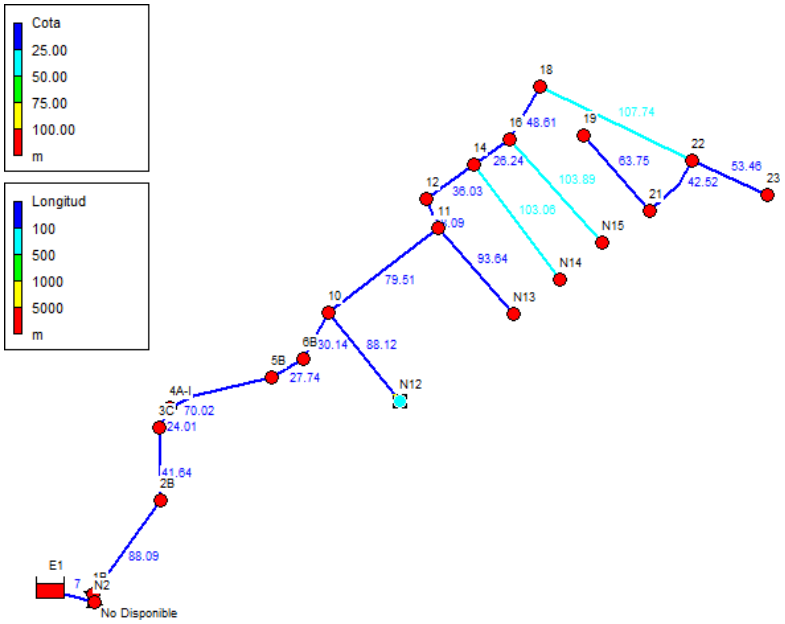
4.3.1 Modelación de la red de distribución del sector de Galán parte alta en EPANET

La red hidráulica del sector de Galán Alto está compuesta por una tubería de salida en PVC de 4 pulgadas, la cual posteriormente se reduce a 2 pulgadas, siendo esta última la encargada de distribuir el agua por todo el sector. Esta red abastece el área, y consta con un total de 21 nodos y 20 tuberías.

Para la modelación de esta red en el software EPANET, fue necesario ingresar diversos datos de entrada fundamentales para la modelación, como las cotas de cada nodo, así como la longitud y el diámetro de las tuberías. Esta información es esencial para realizar un análisis detallado del comportamiento hidráulico del sector. En la *Figura 30* se muestra la modelación de la red en el software EPANET.

Figura 30

Modelación de la red



Nota: En la imagen anterior se observan los principales componentes del sistema, incluyendo tuberías y nodos, detallando sus respectivas longitudes y cotas. Estos elementos son fundamentales para comprender la estructura y distribución del sistema analizado.

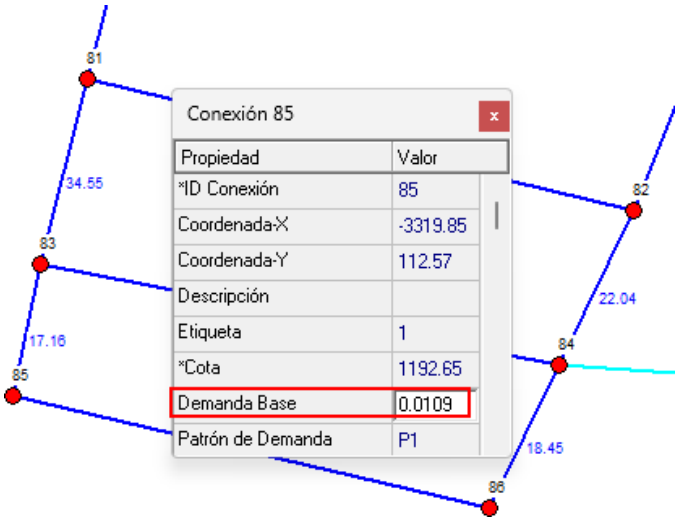
(Autores,2024)

4.3.2 Asignación de demandas para cada uno de los nodos de la red

Con el modelo de la red hidráulica ya modelado en EPANET, el siguiente paso es asignar a cada nodo el caudal y/o demanda base obtenidos en el objetivo 1. En la *Tabla 6* se presentó un resumen de los nodos con sus respectivos caudales. En la *Figura 31* se ilustra el proceso de asignación de caudales a cada nodo.

Figura 31

Asignación de caudales por nodo



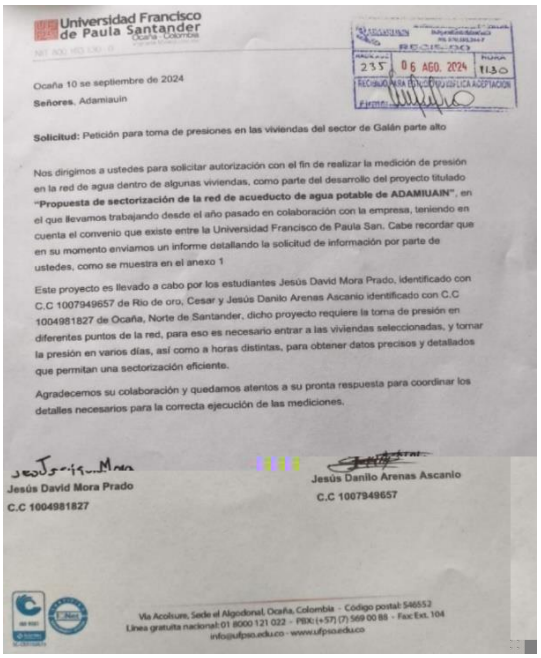
Nota: (*Autores, 2024)*

4.3.3 Toma de presiones en campo

Para realizar las mediciones de presión en campo, se solicitó autorización a la empresa ADAMIUAIN, conforme al convenio entre la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y dicha entidad véase en la *Figura 32*. Este permiso fue necesario para visitar a los usuarios, con el fin de evitar malentendidos con la comunidad, especialmente porque la zona presenta dificultades de acceso.

Figura 32

Permiso para trabajo en campo



Universidad Francisco de Paula Santander
Ocaña, Colombia

RECIBIDO
235 06 AGO. 2024 11:30
RECIBIDO PARA REVISIÓN Y EVALUACIÓN DE LA ACEPTACIÓN
Firma:

Ocaña 10 se septiembre de 2024

Señores. Adamiauin

Solicitud: Petición para toma de presiones en las viviendas del sector de Galán parte alto

Nos dirigimos a ustedes para solicitar autorización con el fin de realizar la medición de presión en la red de agua dentro de algunas viviendas, como parte del desarrollo del proyecto titulado **"Propuesta de sectorización de la red de acueducto de agua potable de ADAMIUAIN"**, en el que llevamos trabajando desde el año pasado en colaboración con la empresa, teniendo en cuenta el convenio que existe entre la Universidad Francisco de Paula San. Cabe recordar que en su momento enviamos un informe detallando la solicitud de información por parte de ustedes, como se muestra en el anexo 1

Este proyecto es llevado a cabo por los estudiantes Jesús David Mora Prado, identificado con C.C 1007949657 de Rio de oro, Cesar y Jesús Danilo Arenas Ascanio identificado con C.C 1004981827 de Ocaña, Norte de Santander, dicho proyecto requiere la toma de presión en diferentes puntos de la red, para eso es necesario entrar a las viviendas seleccionadas, y tomar la presión en varios días, así como a horas distintas, para obtener datos precisos y detallados que permitan una sectorización eficiente.

Agradecemos su colaboración y quedamos atentos a su pronta respuesta para coordinar los detalles necesarios para la correcta ejecución de las mediciones.

Jesús David Mora Prado
C.C 1004981827

Jesús Danilo Arenas Ascanio
C.C 1007949657

Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88 - Fax: Ext. 104
info@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

Nota: permiso solicitado a la empresa ADAMIUAIN, para realizar trabajo de campo. *(Autores, 2024).*

Es fundamental contar con un manómetro, como se muestra en la *Figura 33*, para registrar las presiones reales en campo. Al utilizar el manómetro, es crucial seguir ciertas recomendaciones. Una de ellas es que el manómetro no debe presentar fugas, ya que estas pueden alterar las lecturas. Si se detecta una fuga, es esencial corregirla de inmediato, lo cual puede hacerse mediante el uso de teflón o un empaque adecuado.

Figura 33

Manómetro de mano



Nota: El manómetro portátil se emplea para la medición de presiones en campo y resulta una herramienta importante para obtener datos precisos. Su uso es esencial para el análisis y monitoreo de las condiciones de presión en el sistema. (*Autores,2024)*

Tras recibir la autorización de la empresa para las salidas de campo y contar con el apoyo de su personal durante las visitas, ver *Figuras 27 y 34,* se procedió a realizar un mapeo de la zona para identificar las viviendas adecuadas para la toma de presiones. La mayoría de las casas contienen tanques aéreos, lo cual es desfavorable para obtener lecturas de presión precisas, ya que el tanque altera directamente la medición. Esto se debe a que el agua fluye desde el registro hacia el tanque, y desde allí se distribuye en la vivienda, véase en la *Figura 35*.

Figura 34

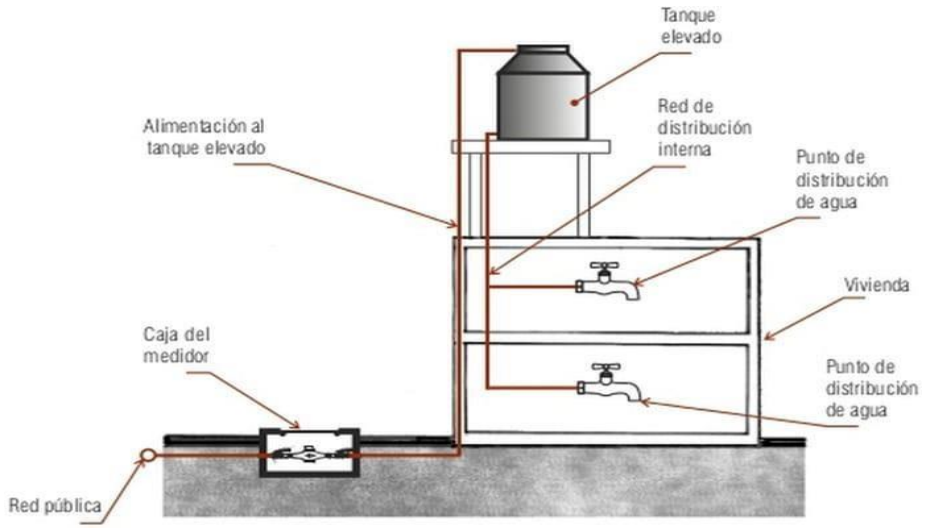
Visitas a los usuarios con funcionarios de la empresa



Nota: En la figura se observa la presencia de un operario de ADAMIUAIN, brindando acompañamiento durante el proceso. *(Autores, 2024).*

Figura 35

Sistema de abastecimiento de agua indirecto con tanque de agua

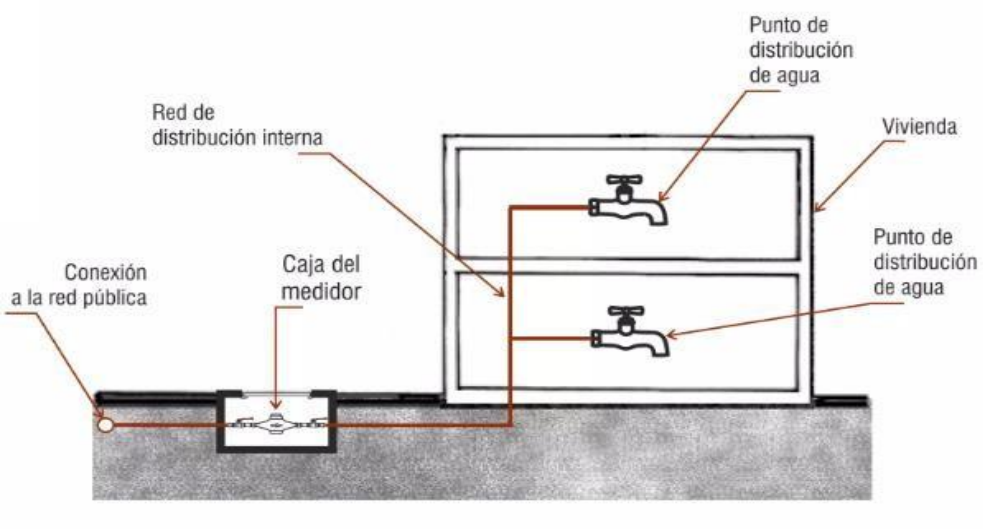


Nota: En la figura se presenta un desglose detallado del sistema indirecto con tanque. (*Carranza Morales, 2018)*

Para garantizar que la medición de presiones sea precisa, es necesario que el sistema de distribución de agua dentro de la vivienda sea directo. Esto implica que el abastecimiento fluya desde la llave de registro directamente hacia el punto de distribución de agua potable, como una llave de cocina o lavadero, sin la intervención de otros sistemas de almacenamiento, véase en la *Figura 36.*

Figura 36

Sistema de abastecimiento de agua directo



Nota: En la figura se presenta un desglose detallado del sistema de abastecimiento directo. *(Carranza Morales, 2018)*

Luego se identificaron, como usuarios idóneos para la toma de presiones aquellos propietarios que contaban con un sistema de abastecimiento directo y que permitieron el acceso a

sus domicilios. Además, se garantizó que las lecturas se realizarán lo más cerca posible de los nodos seleccionados para el análisis véase en la *Figura 37,* con el fin de aumentar la precisión. Así mismo la selección de estos nodos se basó en los siguientes dos factores: primero, que estuvieran ubicados en zonas críticas, y segundo, que coincidieran con usuarios que cumplieran con las condiciones previamente mencionada, ver *tabla 13*. Este proceso resultó desafiante, ya que la mayoría de los usuarios contaban con tanques aéreos debido a la intermitencia del servicio de agua potable, que se suministra cada día por medio, durante gran parte del año debido a la escasez.

Figura 37

Vista satelital de los nodos en el sitio de análisis



Nota: se evidencia la localización de los nodos, donde posteriormente se tomarán presiones.

(Autores,2024)

Tabla 13

Nodos y Usuarios seleccionados para la toma de presiones

Nodo	Usuarios
10	940,926,945,941
11	725
14	541,39
16	365
18	40
N12	1070

Nota: (*Autores, 2024)*

Con la información preliminar disponible ver *Tabla 13*, se procedió a realizar las mediciones de presión en campo, acompañados por un funcionario de la empresa ver *Figura 38*. Este acompañamiento fue fundamental para generar confianza en la comunidad y aprovechar el conocimiento del operador sobre el área de estudio. Posteriormente, se realizaron a cabo mediciones en distintos momentos del día, con el objetivo de obtener el mayor número posible de lecturas y así asegurar un análisis más completo y representativo.

Figura 38

Toma de presiones en campo



Nota: La fotografía fue tomada el 11 de septiembre a las 12:09:06 pm, correspondiente al nodo N12 y al usuario o suscriptor 1070. En ella, se evidencia la medición de la presión, así como la presencia de un operario de la empresa brindando acompañamiento durante el proceso. (*Autores, 2024)*

Así mismo luego de tomar presiones en campo, durante una semana, a varias horas del día, en los distintos nodos y los diferentes usuarios seleccionados, se procedió a digitalizar la información obtenida del manómetro como se muestra en la *Figura 39 y 40*, en un cuadro de Excel ver *Tabla 14*,

Figura 39

Evidencia 1, toma de presión con manómetro



Nota: La fotografía fue tomada el 10 de septiembre a las 09:06:49 am, correspondiente al nodo 11 y al usuario o suscriptor 725. En ella, se evidencia la medición de la presión. *(Autores,2024).*

Figura 40

Evidencia 2, toma de presión con manómetro



Nota: La fotografía fue tomada el 14 de septiembre a las 04:07:33 pm, correspondiente al nodo 10 y al usuario o suscriptor 940. En ella, se evidencia la medición de la presión. *(Autores,2024)*

Tabla 14

Recopilación lecturas de presiones

TOMA DE PRESIONES EN CAMPO							
Nodo	**Usuario**	**Hora**	**Presión (PSI)**	**Nodo**	**Usuario**	**Hora**	**Presión (PSI)**
10	940	4:50 p. m.	42	18	40	10:07 a. m.	54
10	926	5:17 p. m.	39	N12	1070	9:13 a. m.	65
11	725	6:03 p. m.	38	10	941	9:07 a. m.	37
14	541	9:03 a. m.	40	10	940	9:12 a. m.	39

11	725	9:06 a. m.	36	18	40	9:57 a. m.	53
10	940	10:03 a. m.	42	16	365	1:57 p. m.	46
10	926	10:14 a. m.	40	10	941	2:07 p. m.	42
10	945	8:00 a. m.	41	N12	1070	2:12 p. m.	66
11	725	8:09 a. m.	39	10	940	2:18 p. m.	42
14	541	9:01 a. m.	38	10	940	2:55 p. m.	40
16	365	9:05 a. m.	42	16	365	3:03 p. m.	46
11	725	9:06 a. m.	36	10	941	3:05 p. m.	42
18	40	9:14 a. m.	57	N12	1070	3:08 p. m.	66
14	390	9:15 a. m.	15	18	40	3:08 p. m.	57
N12	1070	10:02 a. m.	64	N12	1070	3:54 p. m.	66
10	926	10:59 a. m.	40	10	941	3:56 p. m.	41
11	725	11:57 a. m.	38	18	40	4:01 a. m.	56
14	541	12:01 p. m.	34	16	365	4:03 p. m.	44
16	365	12:04 p. m.	44	10	940	4:07 p. m.	42
N12	1070	12:09 p. m.	67	10	940	4:55 p. m.	39
18	40	12:15 p. m.	54	N12	1070	4:59 p. m.	63
10	941	8:57 a. m.	36	16	365	5:05 p. m.	41
10	940	9:03 a. m.	40	10	941	5:07 p. m.	42
N12	1070	9:15 a. m.	66	18	40	5:09 a. m.	57

Nota: En la tabla anterior se presentan datos que incluyen el nodo, el usuario, la hora en la que se realizó la lectura y el valor de la lectura. (*Autores,2024)*

Dado que el manómetro proporciona lecturas de presión en PSI, es necesario convertir estos valores a metros de columna de agua, que es la unidad utilizada por las normas colombianas. Para realizar esta conversión, se multiplica el valor obtenido en PSI por el factor de conversión 0.704. Para más detalles consulta la *Tabla 15*.

Tabla 15

Resumen de presiones en campo y conversión a (M.C.A)

RESUMEN DE PRESIONES EN CAMPO			
Nodo	**Hora**	**Presión (PSI)**	**Presión (M.C.A)**
10	8:00 a. m.	41	28,86
10	9:00 a. m.	38	26,75
10	10:00 a. m.	41	28,86
10	11:00 a. m.	40	28,16
10	2:00 p. m.	42,00	29,57
10	3:00 p. m.	41	28,86
10	4:00 p. m.	41,5	29,22
10	5:00 p. m.	40,5	28,51
11	8:00 a. m.	39	27,46
11	9:00 a. m.	36	25,34
11	12:00 p. m.	38	26,75
11	6:00 p. m.	38	26,75

14	9:00 a. m.	31,00	21,82
14	12:00 p. m.	34	23,94
16	9:00 a. m.	42	29,57
16	12:00 p. m.	44	30,98
16	2:00 p. m.	46	32,38
16	3:00 p. m.	46	32,38
16	4:00 p. m.	44	30,98
16	5:00 p. m.	41	28,86
18	9:00 a. m.	57	40,13
18	10:00 a. m.	53,5	37,66
18	12:00 p. m.	54	38,02
18	3:00 p. m.	57	40,13
18	4:00 p. m.	56	39,42
18	5:00 p. m.	57	40,13
N12	9:00 a. m.	65,5	46,11
N12	10:00 a. m.	64	45,06
N12	12:00 p. m.	67	47,17
N12	2:00 p. m.	65	45,76
N12	3:00 p. m.	67	47,17
N12	4:00 p. m.	66	46,46

N12	5:00 p. m.	63	44,35

Nota: En la tabla anterior se presenta la información de manera organizada, incluyendo la conversión de la presión de PSI a M.C.A.(*Autores,2024)*

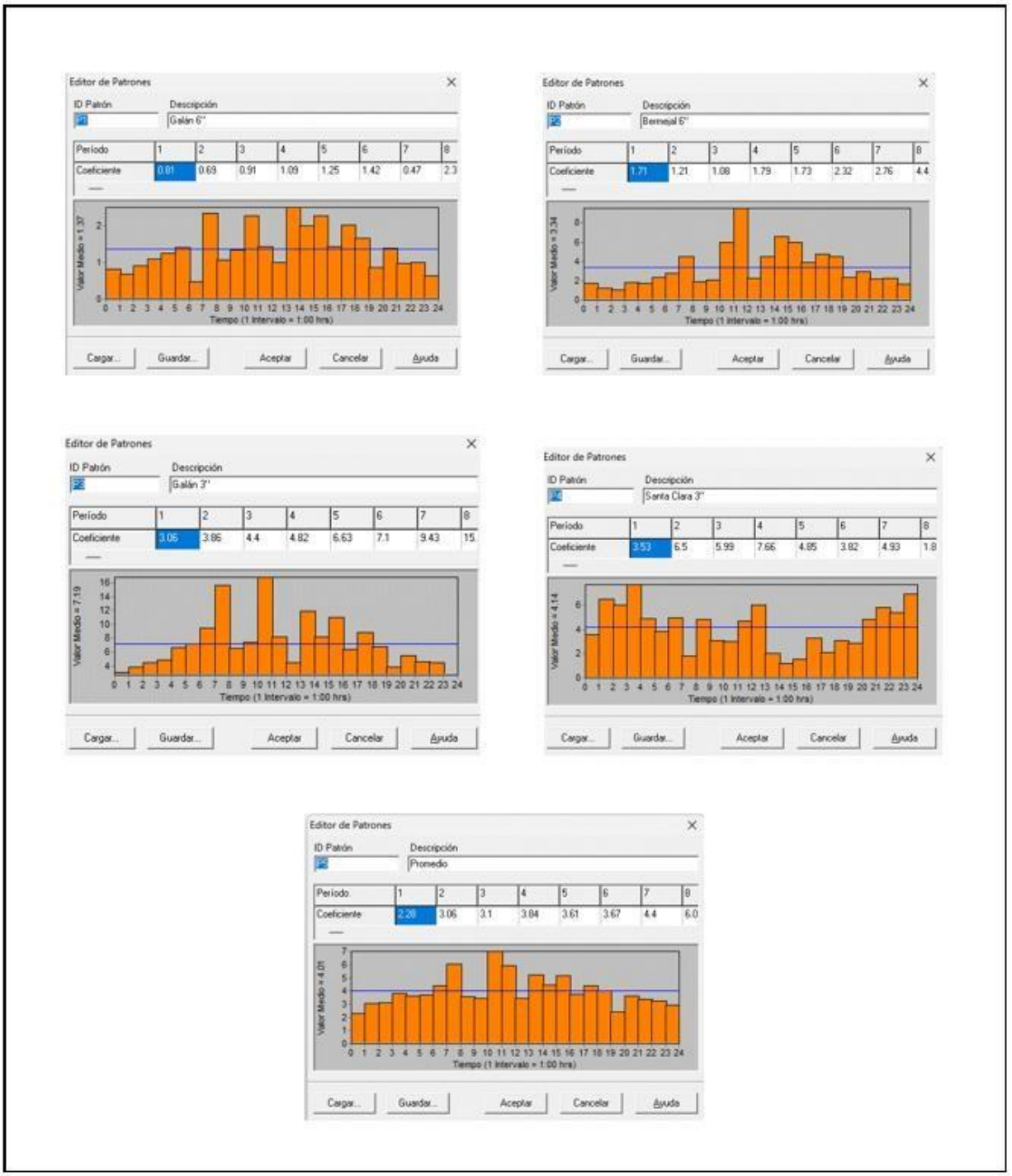
Se obtuvieron un total de 34 lecturas de presión, distribuidas en distintos nodos a lo largo de varios días y en diversas horas del día. La cantidad de lecturas se justificó debido a que los valores registrados fueron consistentes a lo largo del tiempo, lo que indica un comportamiento uniforme de la presión. Esto puede atribuirse a que la mayoría de los usuarios disponen de tanques aéreos donde los usuarios no consumen agua directamente de la red si no a través de sus tanques, esto provoca que la presiones no se vean alteradas a la hora de realizar la lectura. Además, la selección de esta cantidad de mediciones se basó en estudios previos, como el de (*Bosch y Recio,2014),* en su trabajo calibración y simulación del sistema fuente para abasto de agua del acueducto el gato. Así mismo como (Escandón y Minchala,2023), en su trabajo titulado Modelamiento hidráulico de redes de distribución de agua potable del sector Cruz Verde II.

4.3.4 Modelación de la red de distribución de la zona de estudio a 24 horas

Para la ejecución del modelo de la red de Galán Alto en un período de 24 horas, es necesario incorporar un patrón de consumo en el sistema. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, esta red no cuenta con un macromedidor que permita generar un patrón de consumo específico. Por esta razón, se optó por modelar y analizar la red utilizando cada uno de los patrones calculados en el objetivo anterior ver *Figura 29*. Luego en la *Figura 41* se muestra la inclusión de estos patrones en el modelo.

Figura 41

Digitalización de cada uno de los patrones calculados al modelo

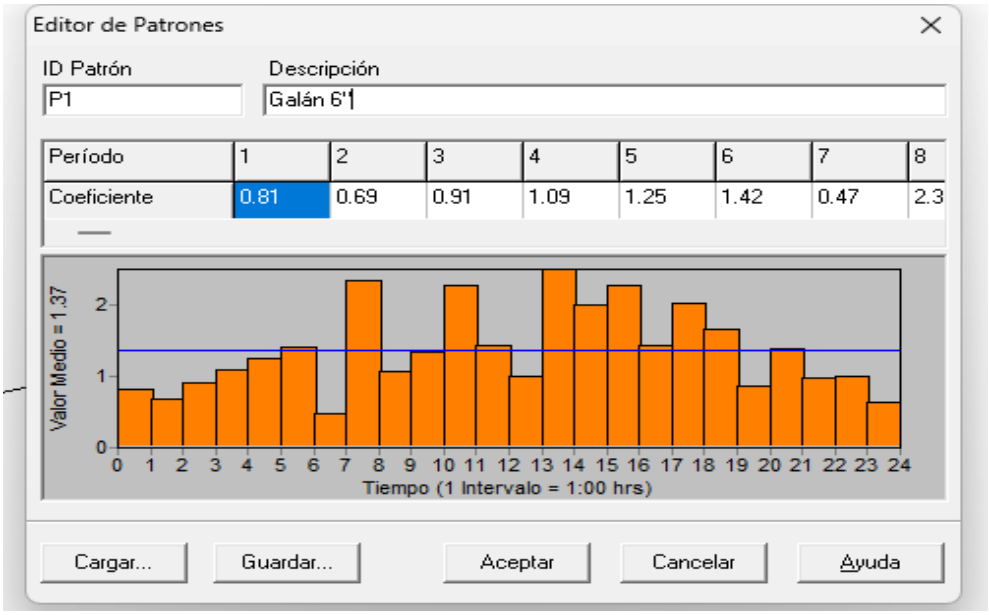


Nota: (*Autores, 2024)*

Finalmente, el patrón de consumo que mostró la mejor correlación con los datos reales medidos en campo fue el correspondiente a la red Galán de 6", que abastece a la zona adyacente al área de estudio. Por esta razón, se decidió utilizar dicho patrón para el análisis. En la *Figura 42* se muestra el ingreso del patrón seleccionado en EPANET.

Figura 42

Patrón de consumo elegido para la modelación

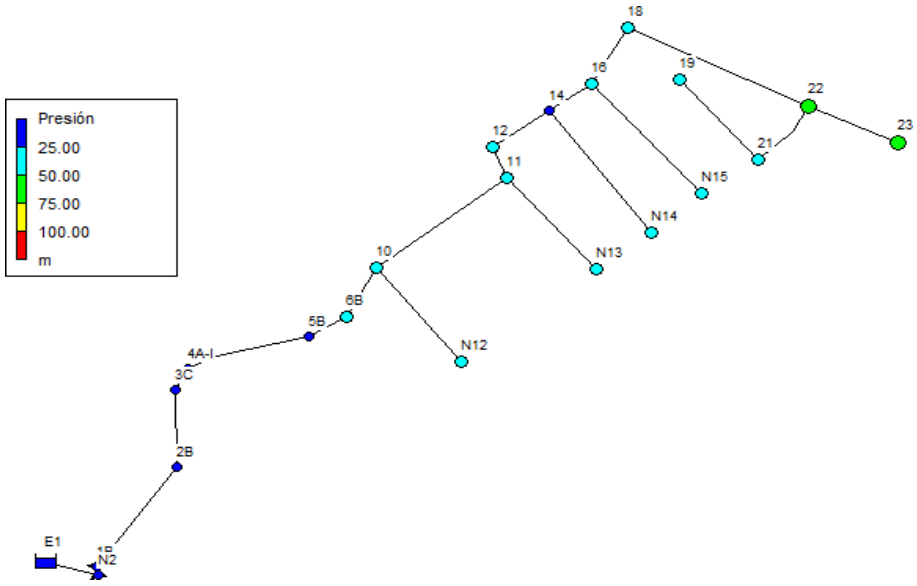


Nota: (*Autores,2024)*

Una vez ingresado el patrón en el sistema, se procede a ejecutar el modelo de la red de Galán Parte Alta. En la *Figura 43* se presentan los resultados de esta modelación.

Figura 43

Resultados de la modelación del patrón de consumo en galán parte alta



Nota: En la figura anterior se ilustra el comportamiento de la red en función de la presión. El color rojo indica presiones muy altas, mientras que el color morado representa las presiones más bajas de la red. (Autores,2024)

4.3.4.1 ***Calibración del modelo.*** Contando con el modelo inicial disponible se procede a calibrarlo, de manera que se asemeje lo máximo posible a las presiones reales tomadas en campo, para lograr esto se procedea ejecutar el sistema en múltiples ocasiones, alternando los coeficientes de rugosidad de las tuberías y ejecutándolo con los distintos modelos matemáticos con los que trabaja EPANET.

La pérdida de carga calculada por el modelo no debería diferir más de un 10-20% respecto a las mediciones en campo (Bosch y Recio, 2014), además, se sugiere que en al menos

el 85% de los nodos, el error relativo en las presiones y cargas piezométricas no exceda el 5%, y en el 95% de los nodos no supere el 10% (Bosch y Recio, 2014)

Es por esto que se decide trabajar con un error general y/o promedio de todas las presiones no mayor al 5%, para una calibración más eficiente del sistema.

4.3.4.2 **Calibración con Hazen – Williams.** Para la primera calibración se optó por utilizar la ecuación de perdida de Hazen – Williams, se ejecutó el modelo en dos ocasiones cambiando su coeficiente de rugosidad. Esta fórmula se usa para calcular la perdida de carga, y según Yepes (2022), se expresa mediante la siguiente *ecuación (7).*

$$h = 10{,}674 * \frac{Q^{1,852}}{C^{1,852} * D^{4,871}} * L \qquad (7)$$

$Donde;$

$h = Pérdida\ de\ carga(m)$

$Q = Caudal\ (\frac{m^3}{s})$

$C = Coeficiente\ de\ rugosidad$

$D = Diametro\ interno\ de\ la\ tuberia\ (m)$

$L = Longitud\ d\ ela\ tuberia\ (m)$

Con la *ecuación (7),* anteriormente mostrada se realizó la simulación de la red durante un periodo de 24 horas, variando el coeficiente de rugosidad de la tubería, en la *Tabla 16,* se puede mostrar el coeficiente de rugosidad para cada material

Tabla 16

Coeficiente de Hazen-Williams para diferentes materiales

Material	C
Hierro galvanizado	120
Vidrio	140
Plomo	130-140
Plástico (PE, PVC)	140-150
Tubería lisa nueva	140
Acero nuevo	140-150
Acero	130
Acero rolado	110
Lata	130
Madera	120
Hormigón	120-140

Nota: *adaptado de (Alegret y Martinez, 2019*)

Dado que la red de tuberías del catastro de la empresa está construida con material PVC, se modeló utilizando los siguientes coeficientes de rugosidad ver *(8) y (9):*

$$C1 = 140 \qquad (8)$$

$$C2 = 150 \qquad (9)$$

Luego en las *tablas 18 y 19,* se muestran los resultados de esta modelación.

4.3.4.3 **Calibración con Darcy-Weisbach.** Otra alternativa para el cálculo de perdida de carga es el de Darcy-Weisbach, la cual Plaza (2017), la expresa de la siguiente manera, ver *ecuación (10).*

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * 9{,}81 \frac{m}{s^2}} \qquad (10)$$

$Donde$;

$hf = Pérdida\ de\ energia\ (m)$

$f = Factor\ de\ fricción\ (adimensional)$

$D = Diametro\ interno\ de\ la\ tuberia\ (m)$

$L = Longitud\ d\ ela\ tuberia\ (m)$

Para trabajar con la ecuación de Darcy-Weisbach, Rojas (2016), propone diferentes coeficientes de rugosidad para distintos materiales, en la *Tabla 17,* se muestran dichos coeficientes con su respectivo material

Tabla 17

Coeficientes de rugosidad para diferentes materiales

Material	C Hazen-Williams (universal)	ε Darcy Weisbach (mm)	n Manning (universal)
Fundición	130-140	0,26	0,012-0.015
Hormigón	120-140	0,3-3,0	0,012-0,017
Hierro galvanizado	120	0,15	0,015-0,017
Plástico	140-150	0,0015	0,011-0,015
Acero	140-150	0,045	0,015-0,017
Cerámica	110	0,3	0,013-0,015

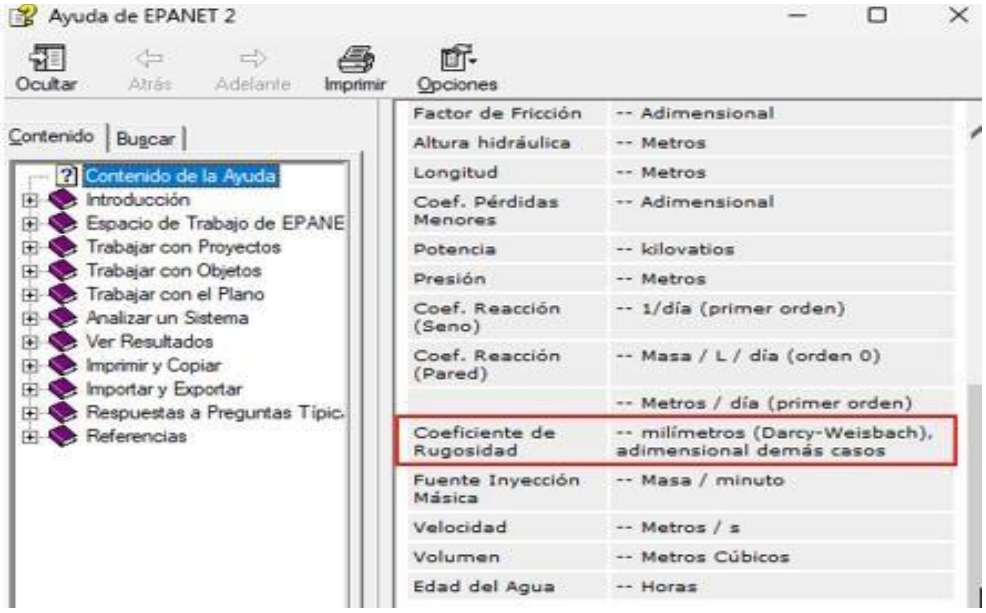
Nota: adaptado de. (Rojas, 2016)

Como se explicó, la red d acueducto está compuesta en PVC, así que se elige el coeficiente de rugosidad de 0,0015

Es importante resaltar que para el caso de la ecuación de Darcy-Weisbach, el coeficiente de rugosidad del material debe agregarse a las tuberías en longitudes de mm, mientras que en los demás casos este es adimensional, en la *figura 36*, se muestra la evidencia de esto.

Figura 44

Unidades de medida en los que se debe agregar el coeficiente de rugosidad de las tuberías al modelo.



Nota: Tomado de (*Autores,2024)*

Finalmente se procede a modelar la red con la ecuación de pérdidas de Darcy-Weisbach, utilizando un coeficiente de rugosidad de 0,0015, en las *tablas 18 y 19,* se muestran los resultados de esta modelación.

4.3.4.4 **Calibración con Chezy-Manning.** Este es el último modelo matemático que existe en EPANET y el ultimo que utilizamos para calcular la pérdida de carga en el sistema, Ledesma (2022), lo expresa mediante la siguiente *ecuación (11).*

$$h = \frac{1}{n} * \sqrt[3]{R^2} * \sqrt{S} \qquad (\ 11\ )$$

$Donde$;

$h = Pérdida\ de\ energia\ (m)$

$n = Coeficiente\ de\ rugosidad$

$R = Radio\ hidraulico\ de\ la\ tuberia$

$S = Pendiente\ de\ la\ tuberia$

Para trabajar con la ecuación de Chezy - Manning, Rojas (2016), propone diferentes coeficientes de rugosidad para algunos materiales, donde dichos coeficientes se muestran en la *Tabla 17.*

Al estar la red compuesta de tubería en PVC, se adopta un coeficiente de rugosidad de 0,011 y de 0,0015, y se procede a modelarla con ambos valores, en las tablas *18 y 19,* se muestran los resultados de esta modelación.

Tabla 18

Datos de presiones reales y con los distintos modelos matemáticos

DATOS DE PRESIONES REALES Y CON LOS DISTINTOS MODELOS MATEMATICOS

Nodo	Hora	Presión "real" (m.c.a)	Hazen-Williams (140)	Hazen-Williams (150)	Darcy-Weisbach (0,0015)	Chezy-Manning (0,011)	Chezy-Manning (0,015)
10	8:00 a. m.	28,86	28,94	29,02	28,95	28,61	27,76
10	9:00 a. m.	26,75	28,59	28,71	28,62	28,04	26,69
10	10:00 a. m.	28,86	26,83	27,16	27,06	25	21,04
10	11:00 a. m.	28,16	28,44	28,58	28,49	27,8	26,24
10	2:00 p. m.	29,57	27,45	27,71	27,6	26,1	23,08
10	3:00 p. m.	28,86	26,83	27,16	27,06	25	21,04
10	4:00 p. m.	29,22	28,42	28,57	28,48	27,77	26,19
10	5:00 p. m.	28,51	27,37	27,64	27,53	25,96	22,81
11	8:00 a. m.	27,46	26,64	26,75	26,65	26,24	25,16

11	9:00 a. m.	25,34	26,2	26,35	26,24	25,52	23,81
11	12:00 p. m.	26,75	26,73	26,82	26,73	26,38	25,42
11	6:00 p. m.	26,75	25,56	25,79	25,66	24,45	21,82
14	9:00 a. m.	21,82	18,98	19,15	19,02	18,28	16,4
14	12:00 p. m.	23,94	19,56	19,66	16,84	19,18	18,14
16	9:00 a. m.	29,57	30,95	31,12	30,98	30,2	28,31
16	12:00 p. m.	30,98	31,54	31,65	31,54	31,16	30,09
16	2:00 p. m.	32,38	29,33	29,7	29,53	27,48	23,24
16	3:00 p. m.	32,38	28,45	28,93	28,75	25,94	20,38
16	4:00 p. m.	30,98	30,71	30,92	30,77	29,82	27,61
16	5:00 p. m.	28,86	29,22	29,6	29,42	27,28	25,87
18	9:00 a. m.	40,13	39,21	39,39	39,25	38,46	36,53
18	10:00 a. m.	37,66	36,67	37,15	36,96	34,11	28,45

18	12:00 p. m.	38,02	39,82	39,93	39,82	39,43	38,34
18	3:00 p. m.	40,13	36,67	37,15	36,96	34,11	28,45
18	4:00 p. m.	39,42	38,98	39,18	39,03	38,07	31,81
18	5:00 p. m.	40,13	37,45	37,84	37,65	35,48	30,99
N12	10:00 a. m.	45,06	42,79	43,12	43,01	40,96	36,99
N12	12:00 p. m.	47,17	44,96	45,04	44,97	44,68	43,92
N12	2:00 p. m.	45,76	43,41	43,67	43,56	42,05	39,03
N12	3:00 p. m.	47,17	42,79	43,12	43,01	40,96	36,99
N12	4:00 p. m.	46,46	44,38	44,52	44,43	43,73	42,15
N12	5:00 p. m.	44,35	43,32	43,12	43,49	41,91	38,77

Nota: resultados de la calibración para cada uno de los modelos. *(Autores, 2024)*

Tabla 19

Datos de presiones reales y cálculo de error para cada uno de los modelos matemáticos

DATOS DE PRESIONES REALES Y CALCULO DE ERROR PARA CADA UNO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Nodo	Hora	Presión "real" (m.c.a)	Error Hazen (140)	Error Hazen (150)	Error Darcy (0,0015)	Error Chezy (0,011)	Error Chezy (0,015)
10	8:00 a. m.	28,86	0,26%	0,54%	0,30%	0,88%	3,82%
10	9:00 a. m.	26,75	6,87%	7,32%	6,98%	4,81%	0,23%
10	10:00 a. m.	28,86	7,05%	5,90%	6,25%	13,39%	27,11%
10	11:00 a. m.	28,16	0,99%	1,49%	1,17%	1,28%	6,82%
10	2:00 p. m.	29,57	7,16%	6,28%	6,66%	11,73%	21,94%
10	3:00 p. m.	28,86	7,05%	5,90%	6,25%	13,39%	27,11%
10	4:00 p. m.	29,22	2,72%	2,21%	2,52%	4,95%	10,36%
10	5:00 p. m.	28,51	4,01%	3,06%	3,44%	8,95%	20,00%
11	8:00 a. m.	27,46	2,97%	2,57%	2,94%	4,43%	8,36%
11	9:00 a. m.	25,34	3,38%	3,97%	3,54%	0,69%	6,05%
11	12:00 p. m.	26,75	0,08%	0,25%	0,08%	1,39%	4,98%
11	6:00 p. m.	26,75	4,46%	3,60%	4,08%	8,60%	18,44%

14	9:00 a. m.	21,82	13,03%	12,25%	12,85%	16,24%	24,85%
14	12:00 p. m.	23,94	18,28%	17,86%	29,65%	19,87%	24,21%
16	9:00 a. m.	29,57	4,67%	5,25%	4,78%	2,14%	4,25%
16	12:00 p. m.	30,98	1,82%	2,18%	1,82%	0,59%	2,86%
16	2:00 p. m.	32,38	9,43%	8,29%	8,81%	15,14%	28,24%
16	3:00 p. m.	32,38	12,15%	10,67%	11,22%	19,90%	37,07%
16	4:00 p. m.	30,98	0,86%	0,18%	0,67%	3,73%	10,87%
16	5:00 p. m.	28,86	1,23%	2,55%	1,93%	5,49%	10,37%
18	9:00 a. m.	40,13	2,29%	1,84%	2,19%	4,16%	8,97%
18	10:00 a. m.	37,66	2,64%	1,36%	1,87%	9,44%	24,46%
18	12:00 p. m.	38,02	4,75%	5,03%	4,75%	3,72%	0,85%
18	3:00 p. m.	40,13	8,62%	7,42%	7,89%	15,00%	29,10%
18	4:00 p. m.	39,42	1,13%	0,62%	1,00%	3,43%	19,31%

18	5:00 p. m.	40,13	6,67%	5,70%	6,18%	11,58%	22,77%
N12	10:00 a. m.	45,06	5,03%	4,30%	4,54%	9,09%	17,90%
N12	12:00 p. m.	47,17	4,68%	4,51%	4,66%	5,27%	6,89%
N12	2:00 p. m.	45,76	5,14%	4,57%	4,81%	8,11%	14,71%
N12	3:00 p. m.	47,17	9,28%	8,58%	8,82%	13,16%	21,58%
N12	4:00 p. m.	46,46	4,49%	4,18%	4,38%	5,88%	9,28%
N12	5:00 p. m.	44,35	2,33%	2,78%	1,94%	5,51%	12,59%
			5,172%	**4,754%**	**5,321%**	**7,873%**	**7,832%**

Nota: Resultados de la calibración y cálculo de error para cada uno de los modelos. (*Autores, 2024)*

Finalmente, se presenta la calibración del modelo en cinco configuraciones diferentes, variando entre los modelos matemáticos (ecuaciones de pérdida) y los coeficientes de rugosidad de las tuberías. A continuación, se ofrece un resumen del porcentaje promedio de error para cada configuración. En la *Tabla 20,* se muestran estos resultados.

Tabla 20

Porcentaje promedio de error para cada configuración

Error Hazen (140)	**Error Hazen (150)**	**Error Darcy (0,0015)**	**Error Chezy (0,011)**	**Error Chezy (0,015)**
5,172%	4,754%	5,321%	7,873%	7,832%

Nota: (*Autores, 2024)*

El análisis de los errores obtenidos mediante diferentes modelos de cálculo de pérdidas de presión en la red sugiere que el modelo de Hazen-Williams es el que presenta el menor margen de error en comparación con los modelos de Darcy y Chezy. Sin embargo, dentro del mismo modelo de Hazen-Williams, se observa una mejora en el ajuste de las presiones reales al utilizar un coeficiente de rugosidad de 150, en lugar de 140.

Por lo tanto, se puede concluir que el modelo más eficiente y preciso para la red en estudio es el modelo de Hazen-Williams con un coeficiente de rugosidad de 150, ya que logra garantizar que el error promedio en las estimaciones no sea mayor al 5%. Este resultado es consistente con los criterios teóricos que se adoptaron para el trabajo, en los cuales se establece que un margen de error inferior al 5% es aceptable para este tipo de cálculos hidráulicos.

En resumen, la variación del coeficiente de rugosidad dentro del mismo modelo permitió una mejor calibración, haciendo que el modelo Hazen-Williams con C=150 sea el más adecuado para simular las condiciones de la red.

4.3.5 Modelación de la red de distribución en EPANET

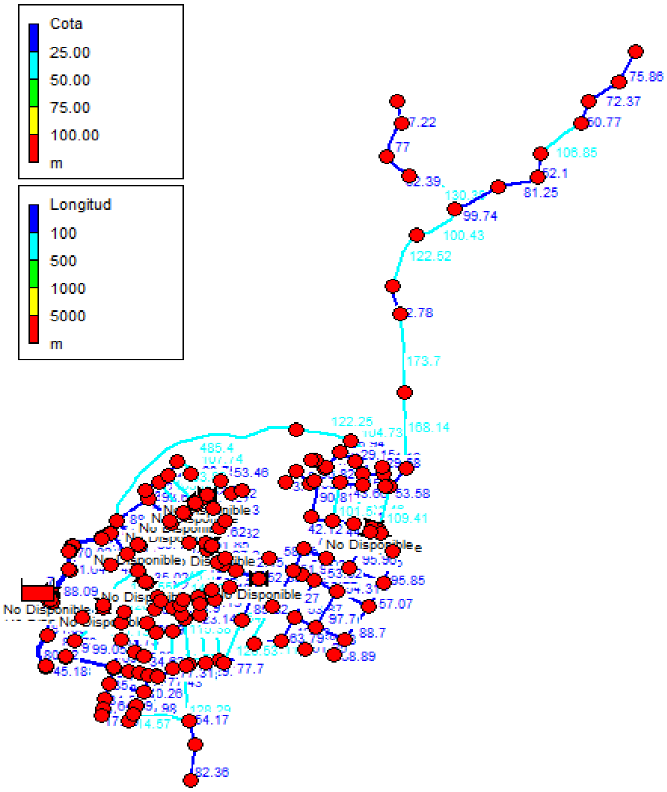
La red hidráulica de la empresa está compuesta por cinco tuberías independientes, cada una de estas le proporciona agua a un barrio distinto. Es importante destacar que, de estas cinco tuberías, cuatro están equipadas con macro medidores, mientras que una de ellas no cuenta con este dispositivo de medición. Esta información ha sido previamente detallada en el trabajo, y se considera fundamental para comprender la funcionalidad y operatividad de la red.

A su vez, la red hidráulica está compuesta en su totalidad por 184 nodos y 208 tuberías. Dentro de esta malla, el barrio Santa Clara y Bermejal rural está compuesto por una tubería de PVC de 3 pulgadas, mientras que el barrio Galán, Sauces y Bermejal urbano por una tubería de PVC de 2 pulgadas, toda esta red abastecida por un tanque de almacenamiento de agua potable de 792 m^3 (Adamiuain,2024). En el catastro de la red presentado anteriormente en la *Figura 9*, se puede evidenciar la red hidráulica descrita

Una vez identificada la extensión del catastro de la red, se procede a dibujarla en el software EPANET, con todos los datos de entrada, como la respectiva cota de cada nodo, además de los diámetros y longitudes de las tuberías, y las válvulas correspondientes. En la Figura 37 se muestra el resultado

Figura 45

Dibujo de la red de distribución en el software EPANET



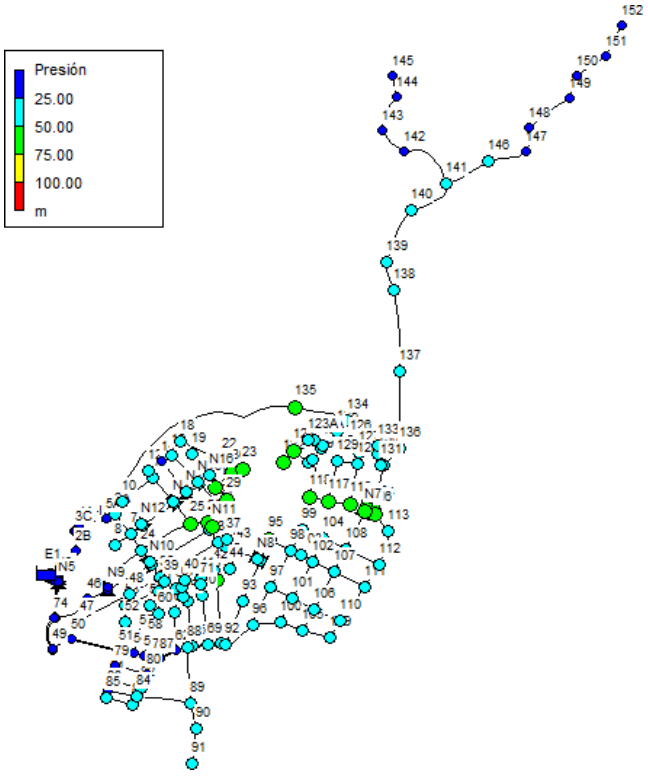
Nota: tomado de (*Autores, 2024)*

4.3.6 Modelación del catastro completo en un periodo de 24 horas

A continuación, se procede a ejecutar el sistema en toda su extensión utilizando el patrón de consumo previamente seleccionado. Se opta nuevamente por el modelo matemático Hazen-Williams, con un coeficiente de rugosidad de 150, dado que, como se mencionó anteriormente, de esta manera se obtuvo el menor error en el sistema, siendo inferior al 5%. En la Figura 38 se muestran los resultados de la simulación descrita.

Figura 46

Modelación de la red por Hazen-Williams



Nota: en la figura anterior se presenta una leyenda de colores que identifica los nodos con mayores y menores niveles de presión tomado de *(Autores,2024).*

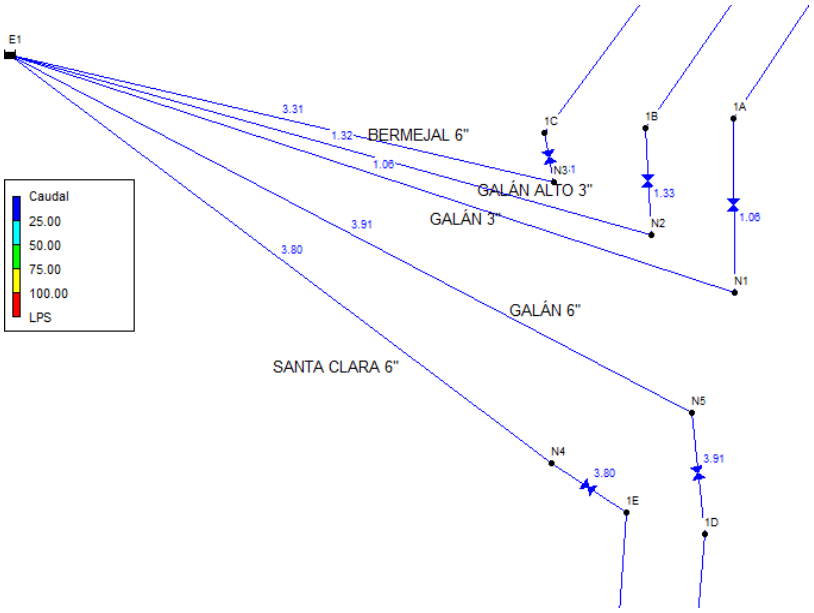
Tras ejecutar la simulación de la red, se obtuvieron resultados con presiones que varían entre 20 y 55 m.c.a, cumpliendo con los estándares normativos. Esto confirma que el problema no se encuentra en la parte hidráulica de la red, ya que el sistema opera de manera eficiente.

4.3.7 Caudales demandados

Luego de la simulación y calibración véase en la *Figura 47* se pudieron determinar los caudales demandados por los usuarios como se observa en la *Tabla 21*.

Figura 47

Cálculo de caudales mediante Simulación de red en EPANET.



Nota: En la *Figura 47* se ilustran las tuberías que componen la red de distribución, junto con los caudales asociados a cada una de ellas, tomado de (*Autores, 2024).*

Tabla 21

Demandas de caudal por tubería de distribución

Tubería	Caudal demandado (l/s)

Santa Clara 6”	3,8
Galán 6”	3,91
Galán 3”	1,06
Galán alto	1,33
Bermejal 6”	3,31
Sumatoria	13,41

Nota: Información sobre el caudal demandado por cada tubería y el consumo total de caudal registrado *(Autores, 2024).*

4.3.8 Propuesta de sectorización para el sector de Galán parte alta

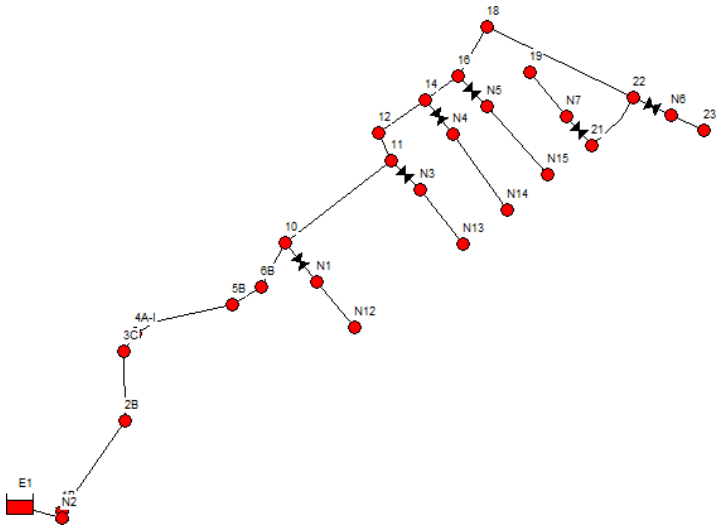
A lo largo del proyecto, se ha observado que la red de distribución está sectorizada de manera parcial, con cada red principal abasteciendo diferentes partes de la zona de influencia de la empresa. Además, la red cuenta con pocas válvulas de corte ubicadas en algunos puntos de la misma. Sin embargo, su operación actual es en gran medida empírica, dependiendo de la experiencia de los operarios, lo que limita el control y la precisión. Algunas de estas válvulas tampoco son de tipo llave maestra, lo que permite su manipulación por parte de la población, generando inseguridad y afectando el correcto funcionamiento de la red.

En respuesta a estos desafíos, se ha propuesto una mejora en la sectorización existente, enfocada en el sector de Galán parte alta. Esta propuesta incluye la instalación de nuevas válvulas de control en puntos clave, lo que permitirá aislar más eficientemente la zona, facilitando las operaciones de mantenimiento sin interrumpir el servicio de agua en otras áreas.

Esta mejora también permitirá un control más específico sobre el caudal y la presión, optimizando el manejo del sistema y garantizando una distribución más eficiente y estable del suministro. En la figura 48 se muestra la mejora de la sectorización propuesta

Figura 48

Sectorización propuesta para el sector de Galán parte alta.



Nota: Adaptado de (Autores, 2024)

Con el uso del modelo hidráulico propuesto, la empresa podrá anticipar el impacto que tendría el cierre o apertura de las válvulas en la red. Esta capacidad de visualización anticipada permitirá simular diferentes escenarios antes de tomar cualquier acción, lo que ayudará a mejorar la toma de decisiones. La empresa podrá prever de manera exacta lo que sucedería al ejecutar cualquier operación sobre la red, asegurándose de elegir la mejor estrategia para garantizar un suministro de agua eficiente y minimizar las interrupciones o problemas no previstos.

El modelo de sectorización propuesto, representado en la imagen adjunta, no solo optimizará el aislamiento de zonas y facilitará un control hidráulico más detallado, sino que también contribuirá a que la empresa tome decisiones más informadas y anticipadas, mejorando la eficiencia y la seguridad en la operación del sistema hidráulico.

5. Conclusiones

La recopilación de datos mediante la micro medición por suscriptor permitió un análisis detallado del consumo de agua en la población, revelando que este se ha mantenido de manera consistente por debajo del límite máximo establecido por la normativa vigente. Esto refleja un uso eficiente y responsable de los recursos por parte de los suscriptores.

Al estimar los patrones de consumo en las redes principales del sistema, se identificaron distintos picos de demanda, lo que evidencia la irregularidad en el servicio de agua prestado por la empresa. Los momentos de mayor consumo coinciden con la práctica de almacenamiento de agua por parte de los usuarios, quienes se preparan para las interrupciones del servicio en los días posteriores. Este comportamiento refleja la necesidad de mejorar la continuidad del suministro.

El modelado y la calibración del sistema hidráulico permitieron analizar las presiones en la red, que oscilan entre 19 m.c.a. y 48 m.c.a. Para garantizar el cumplimiento normativo, es necesario verificar que estas presiones se ajusten a lo establecido por la Resolución 0330 de 2017. Según esta norma, en su artículo 61, la presión mínima para poblaciones menores a 12.500 habitantes debe ser de 10 m.c.a., mientras que el artículo 62 establece que la presión no debe superar los 60 m.c.a. La empresa ADAMIUAIN, con un total de 1.366 suscriptores, opera en una población que cumple con estos criterios, lo que implica que la red debe mantener presiones dentro de este rango.

En este sentido, el análisis concluye que el sistema actual es óptimo, ya que cumple con las presiones normativas, manteniéndose dentro del intervalo de 10 m.c.a. a 60 m.c.a. Tanto el sistema existente como el sistema calibrado propuesto presentan un comportamiento adecuado, respetando los requerimientos establecidos por la normativa colombiana.

Adicionalmente, tras realizar la simulación del modelo, se identificaron los caudales demandados por la población en cada una de las redes principales. Como se detalla en el catastro generado en EPANET, las tuberías principales que abastecen los diferentes barrios requieren un caudal de 13,41 l/s para cubrir de manera eficiente las necesidades de toda la población, especialmente durante la hora de mayor demanda (2:00 pm). Sin embargo, en épocas de sequía, el sistema solo trata 6,55 l/s, lo que representa el 49% de la demanda total, explicando por qué la red ha sido sectorizada. La demanda supera la capacidad de tratamiento, lo que ha llevado a la empresa a alternar el suministro entre los sectores en días alternos.

Esta situación ha impulsado a los usuarios a instalar tanques aéreos en sus viviendas para mitigar la irregularidad del servicio. La sectorización de la red, aunque necesaria bajo las condiciones actuales, es una consecuencia directa de la insuficiente capacidad de tratamiento frente a la demanda. Por tanto, se requiere una solución que incremente dicha capacidad o una gestión más eficiente del agua, particularmente durante las épocas de sequía.

6 Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos y las conclusiones presentadas, se sugieren las siguientes acciones y mejoras para optimizar el proceso y asegurar el cumplimiento de los objetivos planteados:

En primer lugar, se recomienda la instalación de un macromedidor en la red principal del barrio Galán Alto, con el fin de medir los metros cúbicos de salida hacia el barrio. Esto facilitaría la elaboración de un patrón de consumo más específico para la zona, lo que contribuiría a la calibración de un modelo digital más ajustado a la realidad.

Además de la instalación del macromedidor, se sugiere la instalación de puntos de medición de presión en distintos puntos a lo largo de la red. Esto permitiría que las mediciones de presión sean más precisas, ya que se realizarían directamente en la red y no dentro de las viviendas, donde las pérdidas por accesorios pueden distorsionar los datos. En algunos puntos de la red fue imposible obtener mediciones debido a la existencia de tanques aéreos en las viviendas, por lo que no se podía medir la presión en estas. Contar con estos puntos de medición distribuidos por toda la red permitiría obtener datos más representativos y mejorar la confiabilidad de las simulaciones.

Otra recomendación es la instalación de puntos de medición de caudal. Durante este proyecto no fue posible calibrar el sistema por caudales debido a la falta de puntos de medición

adecuados. La instalación de estos puntos permitiría calibrar el modelo tanto por caudal como por presión, lo que resultaría en una simulación más precisa y acorde con la realidad de la red.

Asimismo, se sugiere la instalación de válvulas de corte en diferentes puntos de la red. Esto permitiría aislar áreas específicas durante tareas de mantenimiento o reparaciones sin interrumpir el suministro en toda la red. Además, se recomienda la instalación de válvulas de control, que regularían la presión y el caudal en zonas críticas. Estas válvulas facilitarían un mayor control operativo sobre la red, permitiendo reducir la presión en los puntos más elevados a niveles normativos, lo que mejoraría el suministro de agua a más usuarios de manera simultánea y aseguraría un servicio más continuo y eficiente.

Se recomienda a la empresa ADAMIUAIN mantener el software actualizado de forma regular, incorporando variables clave, como los caudales en cada uno de los nodos del sistema y la actualización de los distintos los patrones de consumo de la población. La constante actualización del modelo permitirá una visión más precisa y dinámica del comportamiento de la red, lo que facilitará tanto el análisis como la toma de decisiones a largo plazo. Al contar con información actualizada, la empresa podrá optimizar el control operativo de la red, anticiparse a posibles problemas y mejorar la eficiencia en la distribución del agua, garantizando un servicio más estable ajustado a las necesidades cambiantes de los usuarios.

Se sugiere a la empresa ADAMIUAIN implementar un manejo más eficiente de la información, que aumente la credibilidad y el alcance de futuros estudios, para el caso de las macromediciones, se aconseja realizar las lecturas para cada una de las redes en horarios

específico, además de tomar varias lecturas al día a diferentes horas. Finalmente, sería recomendable que este registro de datos no se realice de forma manual, sino electrónicamente, para minimizar los errores de transcripción por parte de los operadores.

7 Referencias

Abril Orellana, O. A. (2018). Sectorización óptima de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Santa Marta, Colombia utilizando los algoritmos METIS [Trabajo Fin de Máster, Intensificación en Hidráulica Urbana, Universidad Politécnica de valencia].

Badini Florián Pulido, S. (2017). Propuesta de optimización del servicio de la red de distribución de agua potable del municipio de Madrid Cundinamarca [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Recuperado de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/968/

Badini Florián, S., & Pulido, F. (2017). Propuesta de optimización del servicio de la red de distribución de agua potable (RDAP) del municipio de Madrid, Cundinamarca [Trabajo de investigación, Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil].

Benítez, C. (2021). Programa para la reducción de pérdidas del suministro de agua potable de la empresa de servicios públicos de Paipa S.A.S Red Vital E.S.P. Recuperado de https://repositorio.uan.edu.co/server/api/core/bitstreams/e2047241-b7df-4097-b64a-0ae42b7bcf70/content

Bosch y Recio (2014), calibración y simulación del sistema fuente para abasto de agua del acueducto el gato. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382014000100008

Campbell González, E. O. (2017). Sectorización de Redes de Abastecimiento de Agua Potable basada en detección de comunidades en redes sociales y optimización heurística [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente]. Recuperado de: **http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000200003&lng=es&tlng=es**

Carranza Morales (2018), manual de instalaciones sanitarias de una vivienda. recuperado de https://es.slideshare.net/slideshow/manual-de-instalaciones-sanitarias-de-una-vivienda/92841601#18

Castro Sánchez, C. J., Hernández Sánchez, V. D., & Moreno Vanegas, A. J. (2021). Optimización de la red de distribución de agua potable del municipio de Villeta – Cundinamarca [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia, Programa de Ingeniería Civil].

Castro, Hernández, Moreno, (2021). Optimización de la red de distribución de agua potable del municipio de Villeta, Cundinamarca. Recuperado de **https://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/10750/Trabajo%20de%20Grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y**

DANE. (2020). Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Recuperado de https://www.dane.gov.co/

Dávila Rodríguez, E. J., & Ortega Contreras, G. (2019). Diseño hidráulico del sistema de acueducto rural vereda San Francisco, municipio Labateca, departamento Norte de Santander [Tesis de pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander]. Facultad de Ingeniería, Plan de Estudios de Ingeniería Civil.

Escandón y Minchala (2023), Modelamiento hidráulico de redes de distribución de agua potable del sector Cruz Verde II. Recuperado de **https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/13898/1/19421.pdf**

Fabra Arbona, L. (2016). Análisis y proyecto de sectorización de la red de abastecimiento de agua potable de las urbanizaciones del Plantío y La Cañada. Sector Sur [Trabajo Fin de Máster, Intensificación en Hidráulica Urbana, Universidad Politécnica de valencia].

Flórez Sepúlveda, A. L., Bonilla Granados, C. A., & Celeita Molina, J. (2023). Análisis de sectorización hidráulica en redes de distribución de agua implementando Epanet e iDistritos. Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de Pamplona.

Fragoso Sandoval, L., Ruiz y Zurvia-Flores, J. R., & Toxky López, G. (2016). La sectorización en redes de agua potable para mejorar su eficiencia hidráulica. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 37(2), 29-43. Recuperado el 23 de mayo de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000200003&lng=es&tlng=es

Garzón Orduña, A. J. (2014). Evaluación patrones de consumo y caudales máximos instantáneos de usuarios residenciales de la ciudad de Bogotá [Trabajo final de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Facultad de Ingeniería, Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos.

IPCC. (2021). Informe sobre el cambio climático. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Jsarabia. (2024). En Ocaña adelantan trabajos para mejorar servicio de agua. Noticias de Norte de Santander, Colombia y el Mundo. **https://www.laopinion.com.co/ocana/en-ocana-adelantan-trabajos-para-mejorar-servicio-de-agua**

León, L.M. y Santiago, S.L. (2021). Sectorización de redes de distribución de agua potable en el acueducto de Coraasan utilizando la herramienta Epanet: caso de estudio: Municipio Tamboril: parte alta. (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (PUCMM), Santiago de los Caballeros, República Dominicana

Mabardy Ramirez, G. P. (2022). Formulación de alternativas para la optimización del sistema de abastecimiento de agua potable del municipio de Condoto, Departamento de Chocó [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle, Bogotá].

Morelos, R. A., & Ramírez-Hernández, J. (2014). La sectorización de la distribución de agua potable en San Luis Río Colorado, Sonora como una alternativa de mejora en el uso del

agua. Medio Ambiente y Sustentabilidad, pagina 44. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Manuel-Gutierrez-12/publication/301341157_Reciclaje_de_materiales_de_construccion_aplicacion_en_mezclas_de_concreto_hidraulico/links/5712e2f208ae39beb87a4c02/Reciclaje-de-materiales-de-construccion-aplicacion-en-mezclas-de-concreto-hidraulico.pdf#page=56

Muñoz, J., & Rueda, L. (2017). Manual de procedimientos para elaborar catastro de redes de alcantarillado. Recuperado de https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5407/Mu%C3%B1ozMartosCristianLibardo20?sequence=1

Ocaña hoy (2024) https://www.facebook.com/Ocanahoy/photos/a.588096268005751/2266171523531542/?type=3&locale=ms_MY

Pérez de la Torre, J. (2018). Gestión de Agua No Contabilizada en Empresas de Servicios Públicos de Agua Potable. Recuperado de http://bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/tpos/1502-1381_PerezdelaTorreM.pdf

POT Ocaña. (2023). Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Ocaña - 2023 [Documento sancionado]. Recuperado de https://www.ocana-nortedesantander.gov.co/pot--2023-del-municipio-de-ocana/pot-ocana-sancionado-2023---google-drive

Rodríguez, R. (2009). Programa de mejoramiento y rehabilitación de redes de acueducto y alcantarillados en Juan de Pasto. Recuperado de https://sired.udenar.edu.co/11188/1/80499.pdf

Rosen, R., Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2021). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine. Recuperado de **https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315003808**

Rozo Contreras, D. E. (2019). Modelación de la red de acueducto de Ocaña desde tanques principales de distribución hasta redes de 10" con el software EPANET para la empresa ESPO S.A "E.S.P", en el municipio de Ocaña, Norte de Santander [Trabajo de grado modalidad pasantía, Universidad Francisco de Paula Santander]. Facultad de Ingenierías, Ingeniería Civil.

Sarmiento Huertas, L. S., & Silva Diaz, R. (2017). Modelación y optimización de la red de acueducto urbano del municipio de Tibana-Boyacá [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil].

Secretaría de Planeación de la Alcaldía de Ocaña. (s.f.). Informe general del municipio de Ocaña [Captura de pantalla]. Recuperado de https://es.scribd.com/document/281481431/Informe-General-Del-Municipio-Ocana

Semillas, G. (s. f.-b). El manejo comunitario del agua en Ocaña. La experiencia de la Asociación Adamiuain. Sitio Web Semillas.org.co. https://www.semillas.org.co/es/el-manejo-comunitario-del-agua-en-ocaa-la-experiencia-de-la-asociacin-adamiuain

Souza, R. G., Meirelles, G., Brentan, B., & Izquierdo, J. (2022). Rehabilitación en Redes de Distribución de Agua Intermitente para su Óptima Operación.

Yasumura A. T., Braga da Silva, F. G., da Silva, A. C., dos Reis, J. A. T., de Freitas, C. L., & de Mello Valério, V. E. (2020). Proposal of optimal operation strategy applied to water distribution network with statistical approach. Ambiente & Água, volumen(15), páginas. Recuperado de https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/RCDCD7r5PkGTn8tzS5MxqJf/?lang=en

Apéndices

Apéndice A

(Archivo *Excel.xlsx* compilación de micro mediciones y cálculo de caudales): véase información como registro de micro mediciones en función del consumo mensual, compilación de consumo por mes, cálculo de caudales, así como cálculo de caudales.

Apéndice B

(Archivo *Excel.xlsx* compilación de macro mediciones y patrón de consumo): véase información como estrato socioeconómico y registro de macro mediciones, así como gráficos de consumo por cada año desde el 2018 hasta el primer semestre del 2024.