RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Anderson Álvarez Gómez Camilo Martínez Trillos
FACULTAD	Ingenierías
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería civil
DIRECTOR	Ing. Ray Carlos Ramírez Martínez
TÍTULO DE LA TESIS	Optimización del Procedimiento de Detección de Fugas en las Redes de Acueducto de Ocaña, N. S.
TITULO EN INGLES	Optimization of the Leak Detection Procedure in the Water Distribution Networks of Ocaña, N. S.

RESUMEN

Esta investigación propone optimizar el proceso de detección de fugas en redes de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, mediante la evaluación en campo y el análisis de las condiciones operativas. Se adopta un enfoque cualitativo descriptivo que permite identificar causas asociadas a la fragilidad estructural, el envejecimiento y la presión, proponiendo el uso del geófono PQWT L3000 para mejorar la localización de fugas en el sistema.

RESUMEN EN INGLES

This research proposes optimizing the leak detection process in water distribution networks in the municipality of Ocaña, Norte de Santander, through field evaluation and analysis of operating conditions. A qualitative descriptive approach is adopted to identify causes associated with structural fragility, aging, and pressure, proposing the use of the PQWT L3000 geophone to improve leak localization in the system.

PALABRAS CLAVES	Detección de fugas, redes de acueducto, geófono, evaluación en campo, condiciones operativas
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Leak detection, water supply networks, geophone, field evaluation, operating conditions.

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 153	PLANOS:	ILUSTRACIONES:20	CD-ROM:

Optimización del Procedimiento de Detección de Fugas en las Redes de Acueducto de Ocaña, N. S.

Anderson Álva Rez Gómez

Camilo Martínez Trillos

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña- UFPSO

Ingeniería Civil

Ing. Ray Carlos Ramírez Martínez

2026

Resumen

En la presente investigación se tuvo la finalidad de proponer la optimización del proceso de detección de fugas en las redes de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, mediante el análisis de las condiciones operativas del sistema y la aplicación de procedimientos técnicos de evaluación en campo, para la mejora de la localización de pérdidas de agua. Para ello, se empleó una metodología de enfoque cualitativo descriptivo-analítico, por medio del análisis técnico del sistema y revisión de registros operativos y de mantenimiento del último trimestre; con ello los resultados demuestran que la caracterización de las condiciones operativas incide en las fugas de agua en el sistema está en una fase de fragilidad estructural debido a la fatiga de los materiales y al manejo de las presiones. Las condiciones primordiales son el sistema de presión elevada: En noviembre, se observó un máximo de 38,67 MCA, aunque la presión media alta se mantiene. Por otro lado, se identificó que hubo 57 registros operativos y los informes de daños, se distinguen categorías principales fueron las fugas por desgaste de accesorios y envejecimiento con una frecuencia mayoritaria. Finalmente, la propuesta muestra que, con el uso de los instrumentos tecnológicos, como el geófono, combinado con un método sistemático de inspección, ayuda de manera significativa a optimizar la administración del mantenimiento de redes de acueducto y la detección de fugas invisibles.

Palabras clave: Condiciones operativas, detección de fugas, mejora de la localización, optimización, pérdidas de agua, redes de acueducto.

Índice

1. Problema 11

1.1 Planteamiento del Problema 11

1.2 Formulación del Problema 14

1.3 Objetivos de Investigación 15

1.3.1 Objetivo General 15

1.3.2 Objetivos Específicos 15

1.4 Justificación 16

1.5 Delimitaciones 20

1.5.1 Delimitación Operativa 20

1.5.2 Delimitación Geográfica 21

1.5.3 Delimitación Conceptual 22

1.5.4 Delimitación Temporal 24

2. Marco Referencial 25

2.1 Antecedentes 25

2.1.1 Antecedentes Internacionales 25

2.1.2 Antecedentes Nacionales 27

2.1.3 Antecedentes Locales 30

2.2 Marco Contextual 32

2.3 Marco Conceptual 35

2.3.1 Fugas en Redes de Acueducto 35

2.3.2 Índice de agua No Contabilizada (IANC) 36

2.3.3 Impacto Ambiental y Económico de las Fugas 36
2.3.4 Redes de Acueducto Urbano 37
2.3.5 Tecnologías de Detección de Fugas 37
2.4 Marco Teórico 38
2.4.1 Características de las Condiciones Operativas del Sistema de Acueducto 38
2.4.2 Tipos de Fugas de Agua Presentes en el Sistema de Acueducto 40
2.4.3 Proceso de Detección de Fugas en el Sistema de Acueducto 43
2.5 Marco Legal 45
3. Diseño Metodológico 48
3.1. Tipo de Investigación 48
3.2 Seguimiento Metodológico del Proyecto 49
3.3 Población 52
3.4 Muestra 53
3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información 54
3.6 Procesamiento y Análisis de la Información 56
4. Administración del Proyecto 58
4.1 Recurso Humano 58
4.2 Recurso Financiero 58
4.3 Recurso Institucional 59
4.4 Cronograma de Actividades 59
5. Resultados 62

5.1 Caracterización de las Condiciones Operativas del Último Trimestre en el Sistema de Acueducto del Municipio de Ocaña, Norte de Santander, Mediante el Análisis de Variables Hidráulicas, Estructurales y de Funcionamiento de la Red, que Inciden en Fugas de Agua. ... 62

5.1.1 Variables Hidráulicas ... 66

5.1.2 Variables Operativas ... 68

5.1.3 Variables Estructurales ... 70

5.2 Identificación los Tipos de Fugas de Agua Presentes en el Sistema de Acueducto del Municipio de Ocaña, Norte de Santander, por Medio del Análisis Técnico del Sistema y Revisión de Registros Operativos y de Mantenimiento del Último Trimestre ... 73

5.3 Formulación de una Propuesta de Optimización del Proceso de Detección de Fugas en el Sistema de Acueducto del Municipio de Ocaña, Norte de Santander, Fortaleciendo y Contribuyendo el Sistema de Acueducto Haciendo uso del Geófono PQWT- L3000 ... 85

5.3.1 Diagnóstico del Proceso Actual ... 85

5.3.2 Análisis de Debilidades ... 89

5.3.3 Selección del Sector Piloto ... 93

5.3.4 Geófono PQWT-L3000 (Base Técnica) ... 99

5.3.5 Protocolo Optimizado (Parte Central) ... 105

5.3.6 Validación en Campo (Prueba Piloto) ... 110

5.3.7 Comparación: Método Actual Vs Optimizado ... 116

5.3.8 Implementación en ESPO ... 119

Conclusión ... 124

Recomendaciones ... 127

Referencias ... 129

Apéndices..... 145

Lista de Tablas

Tabla 1 Modelo metodológico 50

Tabla 2 Matriz metodología para el desarrollo del proyecto 55

Tabla 3 Recurso humano 58

Tabla 4 Presupuesto del proyecto 59

Tabla 5 Cronograma de actividades 60

Tabla 6 Matriz de las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander. 64

Tabla 7 Último trimestre del año 2025 75

Tabla 8 Cruzando variables críticas 91

Tabla 9 Matriz de Intervención 91

Tabla 10 Tramo recomendado 95

Tabla 11 Ficha técnica del sector piloto para detección de fugas con geófono 96

Tabla 12 Ubicación del sector piloto 98

Tabla 13 Especificaciones técnicas del Geófono PQWT-L3000 99

Tabla 14 Parámetro y Rango 100

Tabla 15 Parámetro y Valor aproximado 101

Tabla 16 Compatibilidad con materiales de tubería 101

Tabla 17 Desventajas o Limitaciones 102

Tabla 18 Comparación entre método actual y método con geófono en detección de fugas 103

Tabla 19 Protocolo optimizado para detectar fugas en redes de acueducto mediante geófono . 106

Tabla 20 Información general de la inspección 110

Tabla 21 Registro de inspección acústica en campo 111

Tabla 22 Registro de confirmación de fuga 111

Tabla 23 Registro fotográfico 111

Tabla 24 Resultados de la prueba piloto 113

Tabla 25 Resultados generales de la prueba piloto 114

Tabla 26 Indicadores de eficiencia del protocolo (KPIs hidráulicos) 114

Tabla 27 Comparación de resultados 116

Tabla 28 Representación comparativa de eficiencia 117

Tabla 29 Programa de capacitación técnica 119

Tabla 30 Cronograma de inspecciones preventivas 120

Tabla 31 Formato de registro de datos 121

Tabla 32 Formato de Indicadores de gestión 121

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa red de acueducto de Ocaña Norte de Santander 21

Figura 2 Localización ESPO S.A. E.S.P. Ocaña 33

Figura 3 Variables Hidráulicas 66

Figura 4 Variable de MCA 67

Figura 5 Variables Operativas 68

Figura 6 Variable de horas 69

Figura 7 Variables Estructurales 70

Figura 8 Variable de Daño de tuberías (plg) 70

Figura 9 Variable de Cantidad de daños en el trimestre 71

Figura 10 Materiales tuberías acueducto de Ocaña 78

Figura 11 Kilómetros por tipo de material 79

Figura 12 Tipo de Materiales dañados 80

Figura 13 Tipos de daños 81

Figura 14 Fugas e Incidencia 82

Figura 15 Diagrama de flujo 86

Figura 16 Mapa metodológico (Inspección con geófono) 92

Figura 17 Metodología para la prueba piloto 95

Figura 18 Protocolo optimizado 106

Figura 19 Protocolo optimizado para la detección de fugas 109

Figura 20 Comparación: método actual vs optimizado 117

Lista de Apéndices

Apéndice 1 Reparaciones y auscultaciones, utilizando el protocolo 145

Apéndice 2 Reparaciones y auscultaciones, sin utilizar el protocolo 149

1. Problema

1.1 Planteamiento del Problema

Desde un comienzo para la humanidad el agua ha sido el recurso de mayor importancia para la supervivencia de la humanidad y su desarrollo como sociedad; aproximadamente se estima que el 70% de la superficie del planeta está cubierta por agua, siendo esta un 97% salada y 3 % dulce. Del total de agua dulce en el mundo, tan sólo el 1 % está disponible para el consumo humano y de los ecosistemas (González, 2019). Por tanto, no es necesario ser un experto en el tema para percibir que cada día estas fuentes de agua se ven reducidos sus cauces y que muchas poblaciones comienzan a experimentar escasez, lo cual, provoca la interrupción del suministro y pone en peligro la calidad de vida de los ciudadanos. Por ello, se vuelve vital buscar medidas más estrictas dirigidas hacia la gestión sostenible y el uso eficaz del recurso hídrico.

Así mismo, el crecimiento poblacional en las ciudades ha impulsado la expansión continua de los sistemas de acueducto con el fin de abastecer a nuevos usuarios del sistema; sin embargo, este proceso ha estado acompañado por un deterioro y disminución de las fuentes hídricas naturales, este crecimiento exponencial de las poblaciones ha generado severos impactos ambientales, y se estima que aproximadamente una cuarta parte de los países enfrentará escasez de agua dulce en los próximos 30 años (Garros Martínez & Safar, 2020).

Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2017), las pérdidas de agua potable en los sistemas constituyen uno de los problemas más críticos para la sostenibilidad de los

servicios públicos a nivel global. Una cantidad considerable de agua tratada no se factura debido a fugas físicas, conexiones no autorizadas y errores de medición; esto se conoce como agua no facturada, el estudio técnico del Banco Mundial (2023), sobre la eficiencia del servicio de agua, una de las estrategias más rentables para mejorar la cobertura y la sostenibilidad financiera de los sistemas de abastecimiento de agua es reducir las pérdidas en las redes de distribución (Liemberger & Wyatt, 2019).

Según varios estudios realizados en todo el mundo, las fugas en las redes de suministro no sólo desperdician recursos hídricos, sino que también, aumentan los costos operativos, aceleran la depreciación de la infraestructura y ponen en peligro la calidad del servicio. Farley & Trow (2023), en su libro enfatizan la necesidad de precisión y protocolos metódicos para la atención temprana para la identificación temprana, advirtiendo que “la detección tardía de fugas aumenta exponencialmente los volúmenes perdidos y los costos de reparación” (p. 35); de igual modo, la gestión de las pérdidas se ha convertido en un elemento fundamental de las operaciones de distribución de agua, al incidir directamente en la eficiencia del sistema y en la optimización del recurso hídrico.

En América Latina, la problemática eleva su impacto debido a las limitaciones técnicas, financieras y operativas que enfrentan las empresas prestadoras del servicio. Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2018), los sistemas de distribución de la región presentan altos volúmenes de agua no contabilizada, asociados principalmente a fugas en redes antiguas y a la ausencia de procesos estandarizados de monitoreo y control. Según la CEPAL (2022), “la capacidad de los operadores para identificar y priorizar acciones de reducción

de pérdidas está limitada por la falta de fortalecimiento técnico en la gestión de las redes de distribución" (párr. 3).

El escenario es el semejante en Colombia; según la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA, 2024), las pérdidas por fugas siguen siendo un problema importante para los prestadores de servicios de agua, lo que afecta la eficacia operativa de la industria y la viabilidad financiera a largo plazo. Los estudios demuestran que, si bien existen sistemas y equipos de detección de fugas, su eficacia depende principalmente de los métodos utilizados para medir, evaluar e interpretar los datos recopilados (Rodríguez Amaya, 2005).

Específicamente en el municipio de Ocaña, Norte de Santander, las pérdidas de agua potable debido a las fugas en las redes de acueducto representan un desafío persistente para la Empresa de Servicios Públicos de Ocaña (ESPO, 2024). Diferentes reportes periodísticos y técnicos han evidenciado la recurrencia de daños en la infraestructura y la presencia de fugas que afectan la continuidad del servicio en varios sectores de la ciudad. Un informe de Caracol Radio Ocaña (2025) señala que "las constantes rupturas en tuberías antiguas generan pérdidas significativas de agua y obligan a suspensiones frecuentes del servicio", reflejando un problema que trasciende lo operativo y tiene impacto directo en los usuarios.

Si bien la empresa cuenta con instrumentos para la localización de fugas, la problemática no se limita a la disponibilidad de equipos, sino a la forma en que se desarrollan los procesos de detección, evaluación y priorización de intervenciones. La ausencia de criterios estandarizados para medir y analizar las pérdidas por fugas dificulta la toma de decisiones técnicas y la

optimización de los recursos destinados al mantenimiento de la red. Tal como lo advierte Huertas Rodríguez (2024), “la gestión eficiente de pérdidas de agua no depende únicamente de la tecnología empleada, sino de la correcta interpretación de la información y de la aplicación coherente de procedimientos operativos” (p. 23).

En este marco, se percibe una clara necesidad de reforzar el modo en que se cuantifican y estudian las pérdidas por fugas en las redes de agua potable del municipio de Ocaña, a partir de una perspectiva técnica y sistemática, coherente con el estado real de la infraestructura local. Esta investigación se origina como respuesta a esta necesidad, proponiendo la optimización del proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, con el objetivo de disminuir las pérdidas reales de agua y favorezcan una administración más sostenible del sistema de distribución.

1.2 Formulación del Problema

¿De qué manera la optimización de los procedimientos de detección y análisis de fugas en las redes de acueducto de Ocaña puede contribuir a un mejor control de las pérdidas de agua potable en el sistema de distribución operado por la ESPO S.A. E.S.P.?

1.3 Objetivos de Investigación

1.3.1 Objetivo General

Proponer la optimización del proceso de detección de fugas en las redes de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, mediante el análisis de las condiciones operativas del sistema y la aplicación de procedimientos técnicos de evaluación en campo, para la mejora de la localización de pérdidas de agua.

1.3.2 Objetivos Específicos

Caracterizar las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, mediante el análisis de variables hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua.

Identificar los tipos de fugas de agua presentes en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, por medio del análisis técnico del sistema y revisión de registros operativos y de mantenimiento del último trimestre.

Formular una propuesta de optimización del proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, fortaleciendo y contribuyendo el sistema de acueducto haciendo uso del Geófono PQWT- L3000.

1.4 Justificación

Es un hecho que la efectividad en la reducción de pérdidas no depende solamente de la disponibilidad de herramientas o instrumentos especializados, sino más bien, en la forma en que se estructuran y ejecutan los procesos de detección. Como afirmó Nivicela Zhagui (2025), “la mejoría en el control de pérdidas de agua requiere procedimientos sistemáticos y homogéneos que permitan identificar, y actuar sobre las fugas de manera eficaz” (p. 7), demostrando la necesidad de enfoques que consideren las características propias de cada red, como el material en que están hechas las redes, su antigüedad, las condiciones de operativas y el comportamiento histórico de las fugas.

En términos ambientales, las pérdidas de agua en las redes de distribución no sólo representan un problema económico, sino también, un impacto directo sobre los ecosistemas asociados a las fuentes de abastecimiento. Tal como señalan Gleick y Palaniappan (2010), “reducir las pérdidas en los sistemas urbanos es una de las formas más efectivas de disminuir la presión sobre los recursos hídricos sin comprometer el acceso al agua potable” (p. 1114). En municipios como Ocaña, donde las fuentes superficiales son sensibles a fenómenos de variabilidad climática, optimizar los procesos de detección de fugas contribuye a una gestión más responsable del recurso.

En el sector académico y científico, este proyecto se justifica por su aporte al conocimiento aplicado en ingeniería civil, particularmente en el área de gestión de sistemas de acueducto. La literatura actual aborda la temática ampliamente las pérdidas de agua desde

enfoques generalizados, pero son limitados los estudios que analizan y estudian a escala local, la optimización de los procesos de detección a partir de la caracterización técnica de los sectores de una red. De este modo, esta investigación propone un enfoque que permite articular antecedentes, variables técnicas que juegan un papel importante en el proceso y análisis comparativos, generando insumos que pueden ser replicables en cualquier otra situación similar.

En el ámbito internacional, la reducción de pérdidas en redes de abastecimiento de agua se tiene en cuenta como una estrategia fundamental para avanzar hacia una gestión sostenible del agua. De este modo, los objetivos de desarrollo sostenible planteados por la ONU (2023), destacan la importancia de "fortalecer la eficiencia en el uso del agua en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la captación y el abastecimiento" (párr. 6). La optimización de los procesos de detección de fugas se alinea directamente a este propósito, al permitir un mejor aprovechamiento del agua producida sin requerir necesariamente mayores fuentes de captación.

En un artículo el Banco Mundial (2025), señaló que "las pérdidas físicas de agua en los sistemas generan costos elevados que limitan la capacidad de inversión de los prestadores y reducen la confiabilidad del servicio" (párr. 3), lo que deja en evidencia la necesidad de fortalecer los procesos relacionados a la detección y manejo de las fugas. Uno de los desafíos más importantes a nivel técnico, económico y ambiental que enfrenta la ingeniería civil moderna, es el manejo eficaz del agua potable en sistemas urbanos de acueducto. Dentro de esta problemática, las fugas en las redes que provocan pérdidas de agua son una de las razones más significativas por las que el sistema opera con ineficiencia, lo que impacta negativamente la

continuidad del servicio y la sustentabilidad financiera de las compañías proveedoras de servicios hídricos, así como la preservación del recurso hídrico esencial.

En Latinoamérica, diferentes estudios coinciden en que los niveles de pérdidas de agua superan con amplitud los valores técnicos aceptables, evidenciando deficiencias tanto en la infraestructura como en los procedimientos operativos. Desde lo institucional y económica, la optimización del proceso de detección de fugas tiene un impacto directo en la sostenibilidad financiera de las empresas prestadoras. Cada metro cúbico de agua que se produce, trata y distribuye sin ser contabilizado implica costos asociados a energía, insumos químicos, operación y mantenimiento, sin generar ingresos por facturación. Estudios del Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2023) destacan que “la reducción de pérdidas técnicas permite mejorar la eficiencia operativa y liberar recursos que pueden destinarse a la modernización de la infraestructura” (párr. 4), lo cual resulta especialmente relevante para empresas con limitaciones presupuestales.

En Colombia el “Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico” establece que las pérdidas máximas admisibles no deben exceder el 25% del volumen producido (Ministerio de Vivienda, Ciudad & Territorio, 2017). No obstante, informes de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD, 2025), señalan que un número significativo de empresas prestadoras presentan índices superiores a este valor, situación que se asocia, en gran parte, a limitaciones claras en los métodos empleados para la localización de fugas y a la falta de priorización técnica de los sectores más vulnerables del sistema.

En la situación local, el sistema de acueducto del municipio de Ocaña enfrenta desafíos similares a los observados en otras ciudades intermedias del país, asociados al envejecimiento de la infraestructura, la heterogeneidad de los materiales de las redes y la presión creciente sobre las fuentes de abastecimiento. Estas condiciones hacen evidente la necesidad de fortalecer los procesos mediante los cuales se detectan y analizan las fugas, pasando de prácticas reactivas a esquemas técnicos que permitan identificar sectores críticos y optimizar la toma de decisiones operativas. La ausencia de estudios locales que aborden esta problemática desde una perspectiva comparativa y sistemática constituye un vacío de conocimiento que limita la mejora continua del servicio (SSPD, 2023).

Finalmente, esta aplicación se justifica ya que el proyecto se alinea con las políticas nacionales del sector de agua potable y saneamiento básico, así como, con los lineamientos de la CRA (2024), que promueven el fortalecimiento de capacidades técnicas y la mejora continua de los procesos operativos. La optimización de procesos para la detección de fugas más allá de la utilización de nuevas herramientas y tecnologías, constituye una alternativa viable y de alto impacto para mejorar la eficiencia de los sistemas de acueducto. De este modo, la presente investigación se justifica plenamente desde el panorama técnico, ambiental, social, económico y académico, evidenciando su importancia y pertinencia para el contexto nacional y local como lo es el municipio de Ocaña.

1.5 Delimitaciones

1.5.1 Delimitación Operativa

La presente investigación aborda el proceso de detección de fugas en la red que distribuye agua potable al municipio de Ocaña, más específicamente en el sistema operado por la empresa ESPO S.A. E.S.P., enfocando a las pérdidas reales provocadas por fugas físicas en las diferentes tuberías. El claro alcance de la investigación comprende la revisión y análisis de los procedimientos técnicos actuales usados para la localización de fugas, esto incluye las actividades de inspección en campo, auscultación acústica e interpretación de señales, considerando también el uso del geófono como una herramienta de apoyo dentro del proceso operativo vigente, el cual está sujeto al préstamo por parte de la compañía mencionada. No se incluyen en el estudio las pérdidas aparentes, los aspectos comerciales del servicio ni la ejecución de intervenciones físicas sobre la infraestructura.

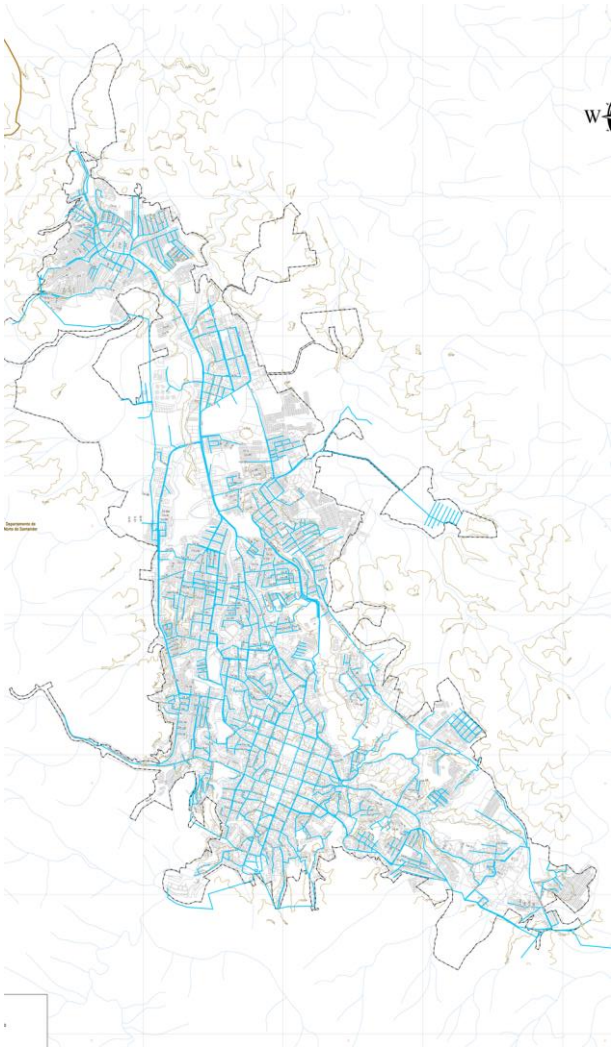
El análisis se desarrolla en sectores específicos de la red urbana, seleccionados con base en criterios técnicos como tipo de material de tubería, condiciones del terreno y características operativas del sistema, con el fin de garantizar la representatividad y viabilidad del estudio. En consecuencia, el proyecto se limita a proponer la optimización operativa al proceso de detección de fugas, orientadas al fortalecimiento del control de pérdidas de agua potable, sin contemplar la incorporación de tecnologías avanzadas ni la realización de obras de rehabilitación.

1.5.2 Delimitación Geográfica

La investigación tendrá un enfoque geográfico puntual a las necesidades del casco urbano de la ciudad de Ocaña, Norte de Santander utilizando las redes de distribución de acueducto de la empresa ESPO S.A. E.S.P. Para el estudio e investigación del proyecto y no se abarcan las redes de acueducto rurales o de otros municipios (figura 1).

Figura 1

Mapa red de acueducto de Ocaña Norte de Santander



Nota. Alcaldía Municipal de Ocaña en Norte de Santander (2023)

1.5.3 Delimitación Conceptual

Fugas en sistemas de distribución: Son las pérdidas no controladas del recurso que se presenta en la red de distribución debido a fallas estructurales, como rupturas en tuberías conexiones defectuosas deterioro de tubería o accesorios, estas fugas pueden ser visibles o no visibles (Denardi & Puccini, 2024).

Fugas no visibles: Son las pérdidas del recurso que ocurren en tuberías de difícil ascenso y vista de la ubicación debido a la estructura que se encuentran sobre ellas bien sea una pavimentación o cualquier otra, incrementando el desperdicio de agua y la eficiencia del sistema. (Denardi & Puccini, 2024).

Impacto ambiental y social de las fugas: Las pérdidas de agua en las redes de distribución afectan considerablemente al entorno natural, a la economía y a la calidad del servicio que se ofrece a las comunidades. Estas codifican un factor clave que intervienen en la percepción social del riesgo como una muestra aleatoria de peligro, poniendo de manifiesto la deficiencia del sistema y el perjuicio que causará a otras estructuras en el futuro (González Ramírez, et al., 2023).

Índice de Pérdidas de Agua por Usuario Facturado (IPUF): Indicador que posibilita el análisis de la eficiencia en la distribución de agua potable y de las pérdidas. Este indicador establece una relación entre el volumen total de agua generado por el sistema y los volúmenes que los usuarios consumen, conforme a lo registrado por los micromedidores. Es posible calcular

la cantidad de agua que se pierde en la red de distribución y que, por lo tanto, no se consume ni se factura, al hacer esta comparación (Bejarano & Hernández, 2022).

Pérdidas reales: Ocurren debido a fugas en las tuberías, conexiones defectuosas y fallas estructurales en la infraestructura hidráulica. Resultan de los daños mecánicos en alguna actividad o fallas por otros motivos en la calidad de los equipos del sistema (Vallejo Diaz, 2023).

Red de distribución de acueducto: Es el conjunto de tuberías, válvulas, accesorios, cámaras de inspección y otros elementos hidráulicos encargados de transportar y distribuir el agua potable desde los tanques de almacenamiento o estaciones de bombeo hasta los usuarios finales (Jiménez Castaño, 2025).

Tecnologías de detección: Se incluirá el equipo Geófono PQWT- L3000 para realizar la investigación (Watson Hernández, 2022).

Viabilidad de implementación: Se consideran factores como costos, infraestructura, compatibilidad con sistemas existentes y aceptación por parte de operadores y entidades reguladoras (Bejarano Méndez & Valencia Camargo, 2024).

1.5.4 Delimitación Temporal

Bajo esta perspectiva, la delimitación temporal de esta investigación será de dentro de un rango de tiempo de cuatro (4) meses a partir de la fecha de aprobación de la propuesta cada semana será seleccionada para ir avanzando con los objetivos planteados.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes Internacionales

En primer lugar, en Perú, Alvarado Cutipa y Llanos Muñiz (2024), en su tesis titulada "Estimación de pérdidas de agua en redes mediante la metodología de caudal mínimo nocturno en un subsector operacional de la ciudad de Tacna" tuvo la finalidad de calcular las pérdidas concretas en el sub sector 28. Para esto, utilizó el método de Caudal Mínimo Nocturno, basado en el modelo de Balance Hídrico que sugiere el BID (2023), diseño no experimental. Los datos requeridos de los usuarios activos y la lectura de medidores nocturnos se recolectaron para calcular las pérdidas reales en este estudio. Además, se recopilaron datos entregados por la EPS Tacna S.A., como caudales que ingresan al sector operativo bajo análisis, registro de usuarios, facturación e inventario técnico y comercial para medir el volumen de agua no facturada (ANF) y realizar una evaluación. Concluye que la misma tuve una pérdida real del 9,52% y a una pérdida aparente del 2,73% del volumen total de agua asignado al subsector. Su aporte al presente proyecto se basa en el planteamiento del problema de las pérdidas de agua en redes de acueducto ha sido reconocido a nivel internacional como uno de los principales retos de la gestión hídrica.

Seguidamente, es Panamá, Calderón de León (2024), en su tesis "Análisis, gestión y modelación de pérdidas de agua en la ciudad de Panamá", para ello su objetivo fue estudiar las

pérdidas de agua potable en la ciudad desde los puntos de vista teórico al identificar los puntos de mejora de la red, utilizando la información proporcionada por el abastecimiento y aproximando los sumideros de las perdidas reales y aparentes", implementando un método mixto, descriptivo, con lo cual los resultados muestran lo importante que es que cada abastecimiento haga un balance hídrico, porque este proporciona una perspectiva general de la distribución del recurso y permite evaluar qué tan eficiente es su reparto. Las publicaciones anuales sobre el funcionamiento del abastecimiento de la ciudad de Panamá no incluyen el balance mencionado ni los datos para llevarlo a cabo, por lo que se necesitó emplear extrapolaciones y estimaciones para hacerlo. Concluyendo, la evaluación de los datos suministrados por el abastecimiento mostró una calidad que va desde lo regular hasta lo bajo, lo cual demuestra que la entidad necesita mejorar su sistema de recolección y publicación de datos. Aportando que la efectividad de estos programas y herramientas depende en gran parte de la correcta interpretación de los datos y de la adaptación de los procesos a las condiciones específicas de cada red de distribución.

Finalmente, en Perú, Tirado Garriazo (2024), en su tesis "Influencia del control de presión en la reducción de pérdidas de caudal y en la funcionalidad de la red de distribución de agua potable del sector San Joaquín de Huamanga Ayacucho, 2023, mantuvo el objetivo de "determinar la influencia del control de presiones en la reducción de pérdidas de caudal y la funcionalidad de la red de distribución de agua potable del Sector San Joaquín de Huamanga-Ayacucho", dicha investigación fue de tipo mixto y tiene un enfoque explicativo no experimental. En los resultados del cálculo del índice de pérdidas de caudal que se llevó a cabo en esta investigación, se encontraron variaciones significativas en comparación con los valores

encontrados, siendo el más alto el 37.58% y el más bajo el 19.80%. Este resultado demostró que el índice de pérdida de caudal en la red de distribución de agua potable tiene un impacto en su rendimiento; por lo tanto, es un asunto que necesita ser abordado para este sector. De igual manera, a través del modelamiento hidráulico y su informe correspondiente, identificó que las tres válvulas reductoras de presión (VRP) existentes no eran suficientes. Como resultado, instalaron cinco más, lo que produjo una reducción notable del 72.94% en las presiones excesivas. Finalmente, demostró cómo las características de la red de distribución de agua potable afectan la velocidad del flujo, la presión y el grado hidráulico en cada una de las tuberías que examinaron. Esto se debe a que cada tubería presenta un comportamiento distinto según sus propias características. Para concluir, este estudio enfatiza la importancia de contar con una infraestructura y una gestión del agua mejoradas, que son fundamentales para asegurar un abastecimiento eficaz y sostenible en el sector. Este aporte se vincula a este proyecto ya que demuestra que la infraestructura de modelos hidráulicos con técnicas de detección permite comprender mejor el comportamiento de las pérdidas en redes.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

En Bogotá, Osorio Cabrera (2024), diseñaron un modelo para el gestionamiento de pérdidas de agua en el acueducto en un municipio del Meta, en donde tuvo como objetivo el desarrollo de un instrumento dinámico para gestionar la pérdida de agua en el acueducto a fin que contribuya para tomar decisiones en la E.S.P. de Guamal-Meta. Para esto, implementó la metodología IWA que consiste en fases que se siguen para determinar el equilibrio hídrico para lo cual, se toma una fecha específica, volumen de metros cúbico ingresado al sistema, y volumen

facturado, para estimar la diferencia lo que se reconocería como la pérdida de recurso hídrico. Los resultados revelan que la gestión de pérdidas de agua está regulada por la legislación colombiana, y es ineludible el desarrollo de este instrumento para que se puedan estructurar los planes para disminuir el desperdicio de agua, conforme a los requisitos técnicos, por lo que, el plan ayuda a controlar y valorar financieramente los programas para ejecutar operativamente su gestión, rastreo e implementación. Por lo que, concluye que es importante para que se reduzcan las pérdidas, siendo ineludible para proporcionar un cimiento de seguridad, control y observancia legal.

Por otra parte, las pérdidas de agua en redes de acueducto han sido una preocupación constante para las empresas prestadores del servicio y los entes reguladores de estas empresas. Por ejemplo, en Bogotá, Ladino Moreno (2024) en su tesis “Estimación y localización de fugas en sistemas de distribución de agua a través de algoritmos de optimización combinatorias” planteó el objetivo de un diseño de modelo para optimizar y combinar datos en la reducción de incertidumbre que se presenta en la estimación y localización de fugas en sistemas de suministro de agua”, para ello aplicó una metodología mixta en la cual se basa en un modelo de redes neuronales bidireccionales y filtros de Kalman extendidos. Los hallazgos mostraron pronósticos precisos y estables en la presión del sistema a corto plazo, y también expusieron patrones caóticos que apoyan la teoría de Kolmogorov. La respuesta al impulso se adecuó correctamente al modelo, en tanto que la respuesta de frecuencia mostró un comportamiento de tipo paso bajo. En cuanto a la combinación de ecuaciones hamiltonianas con el Internet de las Cosas (IoT) y un enfoque híbrido, se probó que era muy eficaz, alcanzando una exactitud del 95% en la detección de fugas en el sistema experimental. Además, se distinguió el potencial de las funciones de

transferencia para definir cómo se comporta el sistema en distintos contextos al contrastar los modelos teóricos de sistemas de flujo y presión. Este estudio aporta que no basta con localizar fugas, sino que es necesario analizar cómo influyen variables como el material de la tubería, la antigüedad de la red y las condiciones operativas del sistema para optimizar la localización temprana de dichas fugas.

Adicionalmente, en la ciudad Bogotá, Pinilla Mora (2024), titula su estudio como "Evaluación de buenas prácticas para la detección y control de pérdidas en redes de acueducto en zonas urbanas". El propósito fundamental de esta investigación fue examinar la eficacia de la "Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá" (EAAB-ESP) en lo que concierne a la administración de su red de distribución, así como, sugerir mejoras fundamentadas en experiencias internacionales, para ello manejó métodos de carácter cualitativo y cuantitativo, que incluyen análisis estadístico de datos sobre pérdidas y entrevistas a expertos. El estudio mostró que la puesta en práctica de técnicas de gestión más eficaces y tecnologías avanzadas, parecidas a las empleadas en Europa, podrían disminuir considerablemente las pérdidas de agua en Bogotá. Asimismo, determinaron las razones más habituales de pérdidas en la red de distribución, dividiéndolas entre fugas técnicas reales y aparentes. El empleo de sistemas de información geográfica y la planificación sectorial se resaltan como instrumentos cruciales para optimizar la administración de pérdidas. El estudio concluye que la EAAB-ESP debe tener una actitud abierta y decidida para identificar sus debilidades y corregirlas. Dichas experiencias documentadas en ciudades como y municipios intermedios han mostrado que la sectorización de redes y el análisis sistemático de información hidráulica contribuyen a mejorar la identificación de pérdidas reales.

2.1.3 Antecedentes Locales

En el municipio de Ocaña, Norte de Santander, el sistema de acueducto ha presentado históricamente dificultades relacionadas con la continuidad del servicio y la operación de la red de distribución. A pesar de no disponer de estudios específicos que cuantifiquen las pérdidas por fugas en el sistema local de distribución de agua, existen antecedentes que evidencian problemas operativos relacionados al suministro de agua.

Chacón Manosalva (2020), en su "Propuesta de diseño del sistema de acueducto convencional de la vereda la Rinconada del municipio de Ocaña, Norte de Santander" con el objetivo de "Proponer el diseño del sistema de acueducto convencional de la vereda La Rinconada del municipio de Ocaña, Norte de Santander" para ello, su método fue de tipo descriptivo y cuantitativo con el que los hallazgos marcan que durante la realización del proyecto, pudo constatar que el sistema no satisface los estándares mínimos requeridos por la Resolución 0330/2017 (Ministerio de Vivienda, Ciudad & Territorio, 2017), lo que demuestra las deficiencias en el sistema. Su trabajo de modelación en el *software EPANET* dio lugar a un sistema de acueducto ideal, con velocidades y presiones aceptables, lo que permitió mejorar las condiciones actuales del acueducto de la vereda. Se llevó a cabo un examen técnico para calcular la tensión creada en el cable que sostiene los cruces aéreos. El hallazgo fue que el cable Ø5/8" con una resistencia nominal de ruptura de 15.9 toneladas es adecuado para la propuesta de diseño. Este aporte señala la insuficiencia de respuesta a la necesidad de desarrollar diseños técnicamente excelentes que estén en consonancia con las condiciones concretas de un área rural andina colombiana, como contribución a mejorar el acceso de la población al agua potable.

Por otra parte, Navarro, et al. (2022), en su tesis “Formulación de lineamientos estratégicos de gestión ambiental para el manejo de los sistemas de agua potable y aguas residuales. Caso: sector urbano del municipio de Ocaña, Norte de Santander”, tuvo la finalidad de “Establecer los lineamientos estratégicos de gestión ambiental para la implementación de prácticas de sostenibilidad en el manejo de los sistemas de agua potable y aguas residuales, en la zona urbana del Municipio de Ocaña”, para ello llevó a cabo una investigación mixta con una perspectiva descriptiva, orientada a caracterizar la organización del estado presente de los sistemas de abastecimiento y gestión de aguas residuales en el ámbito urbano. Tras analizar los sistemas de abastecimiento de agua potable y el tratamiento de aguas residuales en el contexto de la gestión ambiental del municipio de Ocaña, Norte de Santander, se determina que tiene una cobertura mayor al 90% para los servicios de alcantarillado y agua potable. Enfatizan que no identificó la priorización de las medidas dirigidas a satisfacer las necesidades de agua potable y saneamiento básico para asegurar la calidad de vida de los habitantes. Esto se debe a que no hubo una coordinación ni un trabajo interdisciplinario entre el ente territorial, las autoridades sanitarias y ambientales, además de que la población civil no fue considerada como un actor esencial para alcanzar una gestión ambiental eficaz. Concluyen que, a partir de acciones orientadas hacia la eficiencia administrativa, mejorando los recursos existentes para supervisar, implementar y cumplir con las funciones misionales en el manejo de los recursos hídricos; la intervención comunitaria como elemento esencial para crear e implementar políticas públicas, alcanzar las metas propuestas y fortalecer a los participantes establecidos en cada una de las tácticas. Este aporte resalta que la detección activa de fugas debe apoyarse en criterios técnicos claros para priorizar zonas críticas, evitando intervenciones aleatorias que incrementan los costos operativos sin resultados sostenibles.

Estos antecedentes a nivel local, aunque sean limitados en términos de precisión, dejan en evidencia que el control de pérdidas por fugas conforma una problemática real en el departamento y municipio, esto justifica el desarrollo de investigaciones que se orientan a mejorar los procesos de detección, evaluación y análisis de las pérdidas en las redes de agua potable del municipio de Ocaña (Navarro Claro & Vergel Rodríguez, 2024).

2.2 Marco Contextual

El municipio de Ocaña se ubica en el nororiente de Colombia, en el departamento de Norte de Santander, dentro de la región del Catatumbo. Su topografía es mayormente montañosa, con una altitud cercana a los 1.200 m.s.n.m. En los últimos años, el crecimiento urbano ha sido progresivo, lo que ha implicado una expansión constante de la infraestructura de servicios públicos. En este escenario, la red de acueducto cumple un papel fundamental para garantizar el suministro de agua potable a la población urbana y rural del municipio (Reyes Clavijo, 2022).

Así mismo, la prestación del servicio de acueducto en Ocaña está a cargo de la Empresa ESPO S.A. E.S.P., empresa responsable de la captación, el tratamiento y la distribución del agua potable. Al igual que en muchos municipios intermedios del país, el sistema de distribución ha sido intervenido de forma gradual a lo largo del tiempo, dando lugar a una red conformada por tuberías de diferentes materiales, diámetros y antigüedad. Esta diversidad influye directamente en el comportamiento hidráulico del sistema y en la aparición de fugas que no siempre son evidentes o son descubiertas en corto plazo (Reyes Clavijo, 2022).

Figura 2

Localización ESPO S.A. E.S.P. Ocaña



Nota. https://maps.app.goo.gl/eN7NJ25nMh52cSkw7

Desde el ámbito ingenieril, uno de los principales desafíos de los sistemas de acueducto urbanos en Colombia está relacionado con la identificación adecuada de las pérdidas reales de agua. La CRA (2024), señala que la reducción de las pérdidas físicas no depende únicamente de inversiones en infraestructura, sino también de un conocimiento detallado del funcionamiento de la red y de los métodos empleados para evaluar su desempeño y comportamiento (CRA, 1995). Por esta razón, la medición y el análisis de fugas adquieren un papel fundamental en los procesos de toma de decisiones operativas (figura 2).

En el caso específico de Ocaña, la información disponible sobre el comportamiento de las pérdidas por fugas resulta limitada y, en muchos casos, se apoya en reportes operativos y en la experiencia del personal de campo sobre las redes, más que en evaluaciones técnicas. Esta situación dificulta la identificación de sectores críticos y la priorización de intervenciones, lo que conlleva a respuestas reactiva frente a fallas visibles en lugar de estrategias preventivas basadas en información confiable (Ibáñez Rodríguez, 2022). Diversos estudios relacionados con la gestión de redes urbanas destacan que esta falta de caracterización técnica constituye una de las principales barreras para mejorar la eficiencia del servicio prestado (Borja Vega, 2024).

Además, las condiciones ambientales, geográficas y urbanas del municipio influyen en el comportamiento de las fugas de agua. Factores como la variabilidad climática, la presencia de suelos heterogéneos y el tránsito vehicular sobre las redes enterradas incrementan la probabilidad de deterioro de las tuberías y dificultan la detección temprana de fallas. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales ha advertido que los sistemas de acueducto en zonas con alta presión sobre el recurso hídrico deben fortalecer sus mecanismos de control para evitar pérdidas innecesarias de agua potable (MinAmbiente, 2023).

En este escenario, la forma como se evalúan actualmente las pérdidas por fugas en la red de acueducto de Ocaña representa un punto crítico de análisis. Más allá de la disponibilidad de equipos o herramientas específicas, resulta necesario examinar los criterios técnicos empleados para interpretar los indicios de fugas, relacionarlos con las características físicas de la red y transformar esa información en acciones concretas de control. Puesto que, investigaciones recientes en ingeniería sanitaria subrayan que la mejora en la gestión de pérdidas comienza con

una comprensión integral del sistema y con metodologías de evaluación adaptadas al contexto local (Reyes Clavijo, 2022).

Por lo tanto, el presente estudio se contextualiza en la necesidad de fortalecer los procesos mediante los cuales se identifican, analizan y gestionan las pérdidas de agua por fugas en las redes de distribución del municipio de Ocaña. Este enfoque busca aportar elementos técnicos que permitan una lectura más precisa del comportamiento de la red, contribuyendo a una gestión más eficiente del recurso hídrico y a la sostenibilidad del servicio de acueducto en el ámbito urbano.

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Fugas en Redes de Acueducto

De acuerdo con el WA DOH (2025), los detrimentos de agua en los sistemas de distribución ocurren de manera no controlada, afectando tanto la eficiencia del sistema como la calidad del servicio prestado. Las pérdidas reales se refieren a la salida física del recurso a través de roturas, fisuras o uniones mal puestas en las tuberías y componentes defectuosos o mal instalados en el sistema. Por otro lado, las pérdidas aparentes se originan por errores de medición, fraudes o conexiones ilegales que no son registradas adecuadamente. Según el EPA (2015), las fugas especialmente las imperceptibles, constituyen uno de los principales desafíos de las empresas de servicios públicos, ya que afectan tanto la sostenibilidad de las fuentes de abastecimiento como la eficiencia operativa de las redes, la presente investigación se centra en la

gestión y detección activa de las fugas reales, particularmente aquellas imperceptibles o no visibles que requieren el uso de tecnologías acústicas especializadas.

2.3.2 Índice de agua No Contabilizada (IANC)

El concepto de agua no contabilizada se refiere a la diferencia entre el volumen de agua que ingresa al sistema de distribución y aquel que es finalmente facturado a los usuarios. De acuerdo a la BID (2017), esta variable reúne tres componentes: pérdidas físicas de agua, consumo no autorizado y errores al medir. En Colombia, la CRA (2024), estableció métodos para calcular y controlar este indicador, esto con el fin de reducir el impacto económico y ambiental que representa este índice IANC es, por tanto, un parámetro clave para medir la eficiencia y sostenibilidad de las redes de acueducto.

2.3.3 Impacto Ambiental y Económico de las Fugas

Las fugas no sólo representan pérdidas económicas por agua no facturada y mayores costos de mantenimiento de la infraestructura, sino que también, generan impactos ambientales considerables. El desperdicio del recurso aumenta la presión sobre ríos, acuíferos y demás fuentes hídricas, que en muchos casos ya se encuentran en riesgo por el cambio climático y la sobreexplotación (MinAmbiente, 2023). En el ámbito económico, Navarro Claro, y Vergel Rodríguez (2024), señalan que las pérdidas de agua reducen los ingresos de las empresas prestadoras, comprometen la calidad del servicio y aumentan los gastos en reparaciones. En

consecuencia, controlar las fugas se convierte en una prioridad tanto para la sostenibilidad ambiental como para la eficiencia financiera.

2.3.4 Redes de Acueducto Urbano

En áreas urbanas, las redes de acueducto son infraestructuras fundamentales que llevan agua desde las plantas de tratamiento hasta los consumidores. Estas redes cuentan con diversos elementos, como válvulas, tuberías, tanques de almacenamiento, bombas y otros, que se ocupan de asegurar un abastecimiento seguro, eficaz y estable de agua potable. Estos componentes juegan un papel esencial en el funcionamiento del sistema, garantizando que el agua llegue a los usuarios finales con la presión y el tratamiento apropiados. En Colombia, estas redes son parte fundamental de la prestación del servicio público domiciliario de acueducto, cuidando así el derecho fundamental al agua y contribuyendo directamente a la mejora de la salud pública, al bienestar y al desarrollo económico nacional. Su funcionamiento no se limita solo a la entrega del agua, sino también garantizan la continuidad, presión adecuada y calidad del agua en todas sus entregas a los usuarios (CRA, 2024).

2.3.5 Tecnologías de Detección de Fugas

Las tecnologías empleadas para identificar fugas han cambiado con el tiempo, pasando de técnicas tradicionales como la inspección visual, las correlaciones acústicas y los geófonos a métodos más recientes que incluyen sistemas electromagnéticos, sensores avanzados e instrumentos digitales. Estas optimizaciones se han promovido por la necesidad de perfeccionar

la exactitud, eficacia y aumentos económicos por intervención, adecuándose a las condiciones halladas en cada ubicación y a las particularidades específicas de las redes (Apolaya Alejandría, 2025).

En tanto, el uso e implementación de estas tecnologías y la integración de sistemas de monitoreo han permitido una detección más temprana y precisa de las fugas, contribuyendo eficazmente a la reducción de pérdidas de agua y al mantenimiento sostenible de las infraestructuras hidráulicas, esto según Farah y Shahrour (2024), los geófonos siguen siendo una de las herramientas más empleadas en campo debido a su capacidad de captar vibraciones y ruidos comunes en fugas. En la actualidad, fabricantes como *PQWT Instruments* han desarrollado equipos portátiles multifrecuencia que mejoran la precisión en la localización de fugas en diferentes materiales y profundidades de tubería.

2.4 Marco Teórico

2.4.1 Características de las Condiciones Operativas del Sistema de Acueducto

Para establecer su funcionamiento hidráulico en la red primaria, que regula el funcionamiento de la red, y la secundaria, se divide una red de distribución en dos partes. La red principal tiene la capacidad de transportar el agua a través de líneas principales o troncales y abastecer las redes secundarias. En tanto la presión elevada (hidráulica), la fatiga y la corrosión de las tuberías (estructurales) y el manejo inadecuado de válvulas o transitorios (funcionamiento) son las condiciones operativas que afectan a un acueducto en términos de fugas. La antigüedad

de la red, la calidad de los materiales y las oscilaciones de presión son fundamentales, como lo demuestra el empleo de sistemas de monitoreo (Osorio Sierra, 2018).

Asimismo, una de las variables hidráulicas son las altas presiones y sobrepresiones, la elevada presión acrecienta el caudal de fugas y sobrepresiones usuales que destrozan las tuberías, dichas rupturas de tuberías, las fugas y los daños en los electrodomésticos suelen ser provocados por la presión alta (superior a 80 psi) y la sobrepresión en acueductos, que generalmente son consecuencia del golpe de ariete (cierre veloz de válvulas) o de la topografía. La presión ideal está entre (40\) y (60\) psi. Las soluciones fundamentales comprenden el uso apropiado de bombeo, las VRP y los venteos de aire (Valdez, 2023).

Otra de las condiciones influyentes en las en las fugas de agua es la variabilidad de la presión, es decir, los cambios violentos de presión correspondientes a variaciones en la demanda. Esta incertidumbre en la potencia del agua en las tuberías, que varía de acuerdo con el momento del día, el grado de consumo (demanda) y la elevación. Esta fluctuación provoca descensos en la presión cuando aumenta la demanda, o sobrepresiones que causan daños a la infraestructura. Esto se debe a la variación de altura (hidrostática), las pérdidas por fricción y los picos de consumo (cuando varios usuarios abren grifos al mismo tiempo). su efecto en la alta variabilidad produce presiones inestables, lo que provoca incomodidades (como falta de agua en los últimos pisos) o rupturas de electrodomésticos y tuberías debido a la sobrepresión (Lugo, et al., 2022).

Conjuntamente, la antigüedad y material de las tuberías o de materiales susceptibles a la corrosión (hierro fundido, acero) muestran mayor riesgo de roturas que en muchos casos se

deben a la calidad de la instalación y los deterioros en las uniones y enlaces. La corrosión en acueductos tiene un impacto mayormente sobre las cañerías de metal antiguas (de plomo, acero galvanizado o hierro fundido) y el cobre. Este proceso debilita estos materiales a través de reacciones químicas con agua o suelos (pH bajo, oxígeno disuelto). Estas tuberías, por lo general, tienen varias décadas de antigüedad, lo que genera filtraciones, pérdida de carga y contaminación del agua potable con metales (Payares Estrada, 2025).

Por otra parte, otras de las condiciones que influyen pueden ser el funcionamiento de válvulas debido a las aperturas y cierres veloces que producen ondas de choque (transitorios hidráulicos). Además del poco control de presiones, es decir la ausencia de VRP en sectores críticos por falta que mantenimiento preventivo, el cual, no se detectan a tiempo las fugas ocultas, que pueden ser localizadas mediante sistemas en los que existes intermitencias en el servicio provocando interrupciones en el suministro, lo que produce huecos en la red que ocasionan contaminación y presiones negativas, así como también fatiga mecánica al reanudar el flujo (Liemberger & Wyatt, 2019).

2.4.2 Tipos de Fugas de Agua Presentes en el Sistema de Acueducto

La detección de las pérdidas que ocurren a lo largo del proceso de producción, operación y distribución del recurso hidráulico en el sistema de Acueducto es uno de los aspectos más importantes. Las raíces, las obras que causan daños, las condiciones climáticas extremas y la temperatura son los factores externos que tienden a causar fugas. También se incluyen otras circunstancias externas, como las corrientes parásitas externas, el tráfico pesado y otros eventos

como roedores, incendios o terremotos. La causa principal de fugas y averías son las propiedades intrínsecas del material, que incluyen la corrosión de los componentes metálicos y los tornillos, los defectos causados por el envejecimiento del material, así como aquellos provocados por otros factores, como problemas en la fabricación del revestimiento interno o externo y una falta de espesor o timbrado (presión nominal soportada). También se considera la reacción con el tipo de agua y terreno (Mora, 2023).

Estas pérdidas están relacionadas con dos elementos fundamentales como las fugas técnicas (pérdidas reales, tanto visibles como no visibles) y la defraudación de fluidos (pérdidas comerciales o aparentes, que incluyen conexiones fraudulentas y masivas o dispersas, así como errores relacionados con la lectura). Las últimas son un componente difícil de medir y monitorear, representando una porción significativa del total de las pérdidas del sistema. Las filtraciones en las redes de agua ocurren en los empalmes, en sus componentes (como tés, válvulas, ventosas, hidrantes y collarines) y también cuando se rompen las tuberías de acometidas o las generales. Estas pueden ser poros, circunferenciales, longitudinales o reventones. Por lo que, las fugas pueden tener muchas causas posibles, y a menudo se producen como resultado de la combinación de diversos factores; también, la presencia de fugas puede verse afectada por los materiales, la composición, la antigüedad y las técnicas de montaje de las partes del sistema de distribución. Por ello, la calidad de la instalación inicial de las partes del sistema de distribución es otro factor relacionado; así mismo, las condiciones del agua, como la temperatura, la agresividad y la presión, son un factor a tener en cuenta; puesto que, de igual modo, pueden ser provocadas por factores externos, como el contacto con otras estructuras, la

tensión ocasionada por vibraciones del tráfico, cargas heladas y tierra congelada alrededor de las cañerías o la corriente eléctrica perdida (Moncayo Parra, 2022).

Ladino Moreno, et al. (2022), señala que la estimación de fugas en tuberías a presión para sistemas puede ser invisibles estas se generan bajo la tierra o en el interior de estructuras. Son difíciles de detectar y pueden no ser notadas durante un largo periodo, causando pérdidas significativas de agua y daños en la estructura (infiltraciones, hundimientos). En algunos casos, si las cañerías que atraviesan las paredes se rompen o fisuran, puede transcurrir mucho tiempo antes de que las fugas sean detectadas, especialmente cuando no producen ruido o el agua tarda demasiado en filtrarse por muros o techos.

Por lo que, el indicio más frecuente de la presencia de una fuga de este tipo es cuando el consumo del agua se eleva repentinamente; estas fugas en tuberías y acometidas pueden ocurrir debido a factores externos a la tubería, a atributos inherentes al material, al funcionamiento de la red, a las condiciones de la instalación y por otras razones como las condiciones de instalación externa que ocurren roturas y fugas por asentamientos del terreno en las zanjas, por asentamientos del suelo cerca de arquetas, por no proteger contra la corrosión interna y externa, por mal desempeño al ejecutar la zanja para distribuir cargas internas y externas, por no estar a la altura en cuanto a tipo, velocidad y presión del agua que se transporta y otros errores en la instalación como una mala ejecución del montaje, el uso de materiales de unión deficientes o no anticipar contracciones y dilataciones debidas a cambios térmicos (Ladino Moreno, et al., 2022).

2.4.3 Proceso de Detección de Fugas en el Sistema de Acueducto

Las filtraciones en las redes de agua ocurren en los empalmes, en sus componentes (como tés, válvulas, ventosas, hidrantes y collarines) y también cuando se rompen las tuberías de acometidas o las generales. Estas pueden ser poros, circunferenciales, longitudinales o reventones. Estas fugas en tuberías y acometidas pueden ocurrir debido a factores externos a la tubería, a atributos inherentes al material, al funcionamiento de la red, a las condiciones de la instalación y por otras razones, Romero, et al. (2024), indican que los procesos de detección de fugas en el sistema de acueducto se puede llevar a cabo la identificación y localización de la fuga de fondo utilizando técnicas matemáticas que se basan en la transformada de Fourier. Para eso, se requiere identificar los componentes espectrales de las señales de fuga y distinguirlos de los componentes de ruido. Esto se logra utilizando la función de coherencia. Esta función posibilita la búsqueda de frecuencias compartidas entre dos señales y la evaluación de su similitud. Cuando se aplica a un proceso estacionario, brinda una medida estadística de la correlación entre dos señales en función de sus frecuencias. La comunidad científica emplea con frecuencia esta herramienta matemática en investigaciones en las que se pretende identificar fallas.

Rodríguez Amaya (2005), señala que el proceso de detección de fugas en adición a la asistencia con disposiciones acerca de la recuperación y reemplazo, la localización de fuga y el programa de reparación pueden provocar otras actividades de agua, incluyendo:

Revisión de las válvulas y de las tomas de agua en el sistema que distribuye; Actualización de los mapas del sistema de distribución; Monitoreo de procesos y análisis de

fuentes, transmisión e instalaciones de distribución mediante tecnologías de telemetría y sensores remotos.

El software de monitoreo y los sensores remotos tienen la capacidad de notificar a los operadores acerca de las fugas, las oscilaciones en la presión, las dificultades con la integridad del equipo y otras inquietudes.

Revisar las tuberías, limpiar, revestir y realizar otras labores de mantenimiento para optimizar los sistemas de distribución y evitar que se produzcan rupturas o pérdidas.

Las instalaciones deben tener en cuenta, incluso, estrategias para reducir la cantidad de agua que se emplea en el mantenimiento rutinario del sistema de agua.

Es decir, la detección de fugas en acueductos es un procedimiento técnico organizado: Primero se lleva a cabo la localización, que incluye el seguimiento del flujo nocturno y el uso de imágenes satelitales; después se procede con la localización acústica (geófonos) o con gas trazador (hidrógeno/nitrógeno) para deterinar ubicaciones específicas; y finalmente, se realiza una excavación y geolocalización exacta. Para detectar áreas con fugas sospechosas, se supervisan los sectores y los caudales nocturnos, utilizando frecuentemente algoritmos o sensores acústicos que están incorporados en los contadores. Además, se debe aplicar detección acústica (geófonos) utilizando dispositivos para detectar el ruido del agua saliendo de la tubería; es perfecto para fugas que hacen ruido, donde los correladores examinan las ondas sonoras de

dos ubicaciones para determinar con precisión el punto de fuga entre ambas (Tovar Romero, et al., 2024).

2.5 Marco Legal

El marco legal de los acueductos en Colombia se fundamenta primeramente en la Constitución Política de 1991, la cual, en sus artículos 365 y 366 los cuales aseguran la provisión eficaz de servicios públicos, en particular del agua potable, que es uno de los objetivos primordiales del Estado social de derecho (ANC, 1991).

Asimismo, la Ley 142/1994, del Régimen de los Servicios Públicos Domiciliarios Determina el marco regulatorio general para que en Colombia se brinden todos los servicios públicos domiciliarios de forma eficaz, constante y con calidad. En cumplimiento de la Constitución, rige a las compañías de servicios públicos, su operación, conexión y la obligación que tienen estas empresas de construir y manejar redes. Específicamente en su artículo 15.3, plante que los municipios, cuando se hagan cargo directamente de la prestación de servicios públicos mediante su administración central, según lo establecido en esta ley (Congreso de Colombia, 1994).

Continuamente la Ley 373/1997 establece el “Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA)” la cual obliga a las entidades a implementar programas para la conservación y uso responsable del recurso hídrico, priorizando estrategias como el control de fugas, referido al planteamiento específico de esta investigación Proponer la optimización del proceso de

detección de fugas en las redes de acueducto del municipio de Ocaña (Congreso de Colombia, 1997).

De acuerdo con el Decreto 1575/2007, “Sistema de Protección y Control de la Calidad del Agua” que establece un sistema para la vigilancia y control de la calidad del agua, los proveedores tienen la obligación de garantizar condiciones sanitarias seguras, lo cual hace referencia a la necesidad del análisis técnico del sistema y revisión de registros operativos y de mantenimiento (Uribe Vélez, 2007).

En Colombia, el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) fue establecido mediante la Resolución 1096/2000. Establece las exigencias técnicas básicas para diseñar, construir, operar y mantener sistemas de alcantarillado, acueducto y saneamiento con el fin de asegurar la calidad y la sostenibilidad del servicio. Clasifica los sistemas en base a su capacidad y el tamaño poblacional, lo que permite ajustar los requerimientos técnicos a las necesidades locales. Adema de mencionar la calidad y sostenibilidad la cual promueve el contacto entre la comunidad en los proyectos, buscando asegurar la durabilidad, eficiencia y continuidad de la infraestructura (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

Resolución 0330/2017, Establece requisitos técnicos específicos sobre instrumentación, monitoreo, control, catastro de redes y presiones de servicio en los sistemas de acueductos que operan a través de un proceso participativo de la comunidad, que se compromete en la gestión de los recursos hídricos y en proporcionar el recurso esencial a los consumidores de una región

específica. Son la concreción de los principios de participación ciudadana en la toma de decisiones que les concierne y deben tener el respaldo de las autoridades estatales en lo que sea necesario para asegurar el abastecimiento del líquido a toda la gente situada en su zona de actuación (Ministerio de Vivienda, Ciudad & Territorio, 2017).

Resolución 0799/2021 (Modifica la RAS), Realiza ajustes al reglamento técnico (RAS), incluyendo nuevas disposiciones sobre presiones máximas, mediciones de caudal y la obligación de implementar Planes de Reducción de Pérdidas (Ministerio de Vivienda, Ciudad & Territorio, 2021).

Resolución 12/1995, define los criterios, indicadores y modelos para la evaluación de la gestión y los resultados de las empresas prestadoras de servicios públicos domiciliarios (CRA, 1995).

Normatividad Municipal (Plan de Desarrollo y Plan de Gestión ESPO S.A. E.S.P.) Lineamientos locales que priorizan la modernización y la reducción de pérdidas de agua en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña (ESPO S.A. E.S.P., 2024b).

3. Diseño Metodológico

3.1. Tipo de Investigación

Hernández Sampieri & Mendoza Torres (2018), señalan que, para el desarrollo investigativo con enfoque cualitativo, consiste en una técnica empleada para disimiles áreas de estudio en donde se analiza las anomalías de la sociedades, culturas, conductas y formativas; teniendo en cuenta que, se enfoca en comprender de modo detallado y profundo del tema a investigar. Por lo que este método se toma ya que esta investigación destaca en resolver un problema técnico específico: Las pérdidas de agua potable por fugas en la red de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander.

Para Hernández Sampieri & Mendoza Torres (2018), exponen que, el tipo de estudio descriptivo-analítico es un modelo que delimita la representación de lo que se estudia; por lo que consiste en analizar y observar-explicar la conducta de la un vinculado sin alterar las variables, este se fomenta cuando el método contiene caracterización de los temas sirve como fundamento para el análisis comparativo. En consecuencia, la metodología descriptivo-analítica permite caracterizar el funcionamiento del equipo de detección de fugas, así como, las condiciones operativas y físicas de la red de acueducto. Para ello, considera elementos como la antigüedad de las tuberías, el material con el que están fabricadas, las condiciones de presión y la frecuencia con la que se producen fugas.

El diseño de indagación cuasiexperimental consiste en estudiar suponer o presentar una hipótesis en fundamento con una información inicial, y luego compararse con una secundaría, para interpretarse para sacar conclusiones (Hernández Sampieri, 2018). Este diseño se mantiene puesto que, la investigación ya que se tomarán los datos iniciales antes de la aplicación de la propuesta y los resultados luego de la intervención y medición, lo que admite que posiblemente se logren obtener derivaciones distintas a las actuales al emplear una metodología distinta de optimización que se adecue a las circunstancias reales del municipio.

3.2 Seguimiento Metodológico del Proyecto

El seguimiento metodológico del proyecto es el procedimiento sistemático de supervisar los avances en comparación con lo planeado para garantizar que se cumplan la calidad, el presupuesto, los objetivos y el cronograma. Supone recopilar datos de manera constante para hacer ajustes, detectar riesgos y optimizar la eficiencia a través de instrumentos técnicos (Barbosa Torres, et al., 2022).

Tabla 1

Modelo metodológico

Objetivo de la investigación	Actividad por objetivo	Indicador por objetivo
Caracterizar las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, mediante el análisis de variables hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua.	Recopilación y revisión de información del último trimestre relacionada con pérdidas de agua, material de las tuberías, antigüedad, rangos de presión y frecuencia de fugas por sector de la red de acueducto.	Porcentaje de sectores con información técnica completa y validada.
	Diseño y estructuración de la matriz de las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua.	Matriz elaborada, diligenciada y validada.
	Análisis de las variables hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua.	Informe de análisis detallado de las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto.
Identificar los tipos de fugas de agua presentes en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, por medio del análisis técnico del sistema y revisión de registros operativos y de mantenimiento del último trimestre.	Recopilación de información interna de la empresa para conocer el tipo de fuga más frecuente, mediante revisión de registros operativos y de mantenimiento del último trimestre.	Tabla comparativa de los tipos de fugas e incidencia de las mismas.
	Análisis técnico comparativo de los tipos de fuga existentes del sistema de mantenimiento del último trimestre.	Informe técnico comparativo del tipo de fuga más predominante.
	Observación y priorización de los sectores con mayores índices de pérdidas y recurrencia de fugas para la selección del sector piloto.	Resumen de priorización de sectores críticos y selección del sector piloto.
Formular una propuesta de optimización del proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de	Selección del sector piloto a partir de los resultados de la matriz comparativa y realización de la caracterización técnica detallada del sector seleccionado.	Sector piloto seleccionado y caracterizado técnicamente.
	Análisis del funcionamiento del geófono PQWT-L3000 y de los principios acústicos aplicados a la detección de fugas,	Sinopsis de los documentos técnicos analizados y citados.

Objetivo de la investigación	Actividad por objetivo	Indicador por objetivo
Santander, fortaleciendo y contribuyendo el sistema de acueducto haciendo uso del Geófono PQWT-L3000.	mediante la revisión de manuales del fabricante y literatura técnica especializada.	
	Definición y estructuración de una propuesta de optimización del proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, fortaleciendo y contribuyendo el sistema de acueducto haciendo uso del Geófono PQWT-L3000	Presentación de la propuesta de optimización del proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña.

Nota. Elaboración propia.

3.3 Población

Arenas Lozada, et al. (2024), señalan que una población como un vinculado restringido o perpetuo de objetos con tipologías en común cuyos resultados tendrán una amplia gama. Se limita a la problemática y los objetivos investigativos. La población objeto de estudio serán las redes de distribución de agua potable del municipio de Ocaña, Norte de Santander, operadas por ESPO S.A. E.S.P., las cuales representan aproximadamente el 95 % de la infraestructura de distribución del casco urbano del municipio.

El porcentaje restante de la red es operado por la Asociación de Usuarios ADAMIHUAIN, razón por la cual la presente investigación se delimita exclusivamente a las redes bajo la operación y administración de ESPO S.A. E.S.P., sobre las cuales se desarrollan los análisis técnicos relacionados con la detección de fugas y la optimización del procedimiento propuesto, redes que se encuentra comprendida en varios materiales como lo son asbesto cemento, hierro dúctil y PVC, con diámetros que varían entre las 2 pulgadas y 24 pulgadas, esta presenta unas características heterogéneas en cuanto a la antigüedad en construcción correspondientes a algunos sectores donde según información de la empresa hay tubería que tiene más de 30 años desde su instalación y aún sigue en funcionamiento lo que genera condiciones variables de deterioro y posibilidad de fugas, la topografía de la ciudad genera significativas presiones en la red debido a que Ocaña está ubicada en la región andina y la mayor parte de la ciudad la comprenden a un relieve accidentado, la infraestructura opera en diferentes tipo de pavimentos, en algunas zonas pavimentos rígidos en concreto, pavimentos flexibles en asfalto, sectores en adoquines y sectores en afirmados que carecen de pavimentación.

3.4 Muestra

La muestra es la elección de la muestra se fundamenta en el criterio personal del investigador, la conveniencia o la disponibilidad; las muestras no probabilísticas son procedimientos de selección de participantes que dependen del criterio subjetivo del investigador y no de métodos aleatorios, lo cual, implica que la posibilidad de ser seleccionados no es igual para todos los miembros de la población (Arenas Lozada, et al., 2024).

Según las características de la investigación y considerando las limitaciones de recursos disponibles para el desarrollo de este trabajo, se empleará un muestreo no probabilístico de tipo intencional para la selección de un sector piloto representativo de las redes de acueducto operadas por ESPO S.A. E.S.P. en el municipio de Ocaña. Este tipo de muestreo se justifica en la medida en que el objetivo del estudio no consiste en realizar inferencias estadísticas generalizables a la totalidad de la red, sino en proponer la optimización del proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, fortaleciendo y contribuyendo el sistema de acueducto haciendo uso del Geófono PQWT- L3000.

Se buscará que el sector piloto seleccionando tenga una extensión aproximada de 1 a 2 kilómetros de red, tamaño que se considerará adecuado para permitir una inspección completa y sistemática durante el periodo de validación que se calcula que se realizará de a 2 a 6 semanas en el cronograma, la selección del sector piloto se realizará aplicando criterios técnicos con unas importantes especificaciones que garanticen su representatividad con respecto a las condiciones generales de la red de acueducto de Ocaña, estos criterios tratan de que se maneje variedad en el

sector piloto, teniendo en cuenta los diferentes materiales de tubería en la red, diferentes tipo de diámetros y diferentes tipo de estructuras viales.

3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

En este proyecto de investigación se utilizarán las siguientes técnicas e instrumentos de recolección de información:

Para Martínez (2022), la técnica de revisión documental es una estrategia para comprender y analizar la realidad teórica o empírica mediante el examen, comparación, contraste o comprensión de diferentes tipos de fuentes documentales relacionadas con un tema particular a través de un enfoque accesible, sistemático y estructurado que, permite identificar estudios previos, su autoría y discusiones. En este caso se maneja esta técnica para los tres objetivos será el instrumento principal para su implementación ya que con esta técnica se llegará al análisis técnico del sistema y revisión de registros operativos y de mantenimiento del último trimestre.

Tabla 2

Matriz metodología para el desarrollo del proyecto

Objetivos de la investigación	Metodología	Variables	Técnica/ Instrumentos	Hipótesis
Caracterizar las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, mediante el análisis de variables hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua.	Investigación descriptiva basada en revisión documental técnica de registros de ESPO S.A. E.S.P.	Dependiente	Técnica: Análisis Documental. Instrumento: Ficha de extracción de datos técnicos (Matriz en Excel).	La caracterización de las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto permitirá analizar las variables hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red que inciden en las fugas de agua.
Identificar los tipos de fugas de agua presentes en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, por medio del análisis técnico del sistema y revisión de registros operativos y de mantenimiento del último trimestre.	Investigación descriptiva basada en revisión documental técnica de registros de ESPO S.A. E.S.P.	Dependiente	Técnica: Análisis Documental. Instrumento: Ficha de extracción de datos técnicos (Matriz en Excel).	Al conocer los tipos de fugas en el sistema de acueducto, permitirá conocer la que mayor incidencia presenta en el municipio de Ocaña.
Formular una propuesta de optimización del proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, fortaleciendo y contribuyendo el sistema de acueducto haciendo uso del Geófono PQWT- L3000.	Investigación descriptiva basada en revisión documental-teórica.	Independiente	Técnica: Análisis Documental. Instrumento: Resultados 2 objetivos anteriores, y documentos, tesis, artículos, etc.	Al presentar una propuesta que optimice el proceso de detección de fugas, se fortalecerá y contribuirá en la reducción de tiempos y errores de localización, para lo cual, es indispensable el uso del Geófono PQWT- L3000.

Nota. Elaboración propia.

3.6 Procesamiento y Análisis de la Información

Para el proceso de investigación, es esencial examinar la información con precisión y concisión; se enfoca en convertir los datos recopilados en materiales técnicos y analíticos que faciliten la respuesta a los objetivos planteados. La relación entre los métodos de recolección a través de libros, páginas oficiales y tesis será el fundamento para estructurar este proceso, el cual se llevará a cabo de manera rigurosa, controlada y sistemática. (Medina, Rojas & Bustamante 2023).

Por lo tanto, en esta situación se llevará a cabo el procedimiento metodológico durante un periodo específico, con el objetivo de caracterizar las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, mediante el análisis de variables hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua con la ayuda de los documentos referentes a mediciones anteriores de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

En segundo lugar, para la identificación los tipos de fugas de agua presentes en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, por medio del análisis técnico del sistema y revisión de registros operativos y de mantenimiento del último trimestre en una triangulación de resultados de los meses escogidos en ellos de vincule el diagnóstico inicial con las realidades técnicas del sector de Ocaña elegido, los hallazgos de esta matriz serán fundamentales. El procedimiento se fundamentará en la triangulación del análisis de contenido del manual del fabricante y la validación de las opiniones de expertos. Para determinar rangos de

frecuencia y parámetros de filtrado exactos que se adapten a los materiales y diámetros más frecuentes en la red local, se analizará la información obtenida en la recopilación documental estructurada con el fin de identificar las condiciones operativas y los tipos de fugas de agua presentes en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander.

Finalmente, para formular la optimización del proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, fortaleciendo y contribuyendo el sistema de acueducto haciendo uso del Geófono PQWT- L3000. Se examinará la resiliencia de la metodología resultante para su aplicación en el campo. Para evaluar la eficacia en el sector piloto, se utilizará un análisis cuantitativo basado en un diseño cuasiexperimental de comparación previa y posterior. Para determinar indicadores de eficiencia operativa, se procesarán las observaciones anotadas en la bitácora de campo y las mediciones obtenidas del geófono PQWT-L3000. En donde se contrastará la exactitud del punto señalado con el punto real de ruptura que se encuentra después de realizar la excavación. Además, se determinará el porcentaje de disminución en los periodos de detección mediante la comparación entre los registros históricos y los que se obtengan con el método sugerido. La interpretación global de las conclusiones se llevará a cabo a través de una triangulación metodológica que combinará los resultados del análisis de la documentación del último trimestre del sistema. Este método va a posibilitar que se valide la hipótesis de investigación, y así mejorar la detección de fugas y a disminuir las pérdidas de agua en el ámbito de la ingeniería civil en Ocaña.

4. Administración del Proyecto

4.1 Recurso Humano

Tabla 3

Recurso humano

Nombre y Apellido	Cargo	Horas semanales en el proyecto
Camilo Martínez Trillos	Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, actúa como investigador del proyecto "Optimización del procedimiento de detección de fugas en las redes de acueducto de Ocaña, N. S."	10
Anderson Álvarez Gómez	Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, actúa como investigador del proyecto "Optimización del procedimiento de detección de fugas en las redes de acueducto de Ocaña, N. S."	10
Ray Carlos Ramírez Rincón	Ingeniero Civil y docente de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, actúa como director del proyecto de investigación, supervisando y orientando el desarrollo del mismo	2

Nota. Elaboración propia.

4.2 Recurso Financiero

A continuación, se puede apreciar el desglose del presupuesto contemplado para el desarrollo del proyecto (tabla 4).

Tabla 4

Presupuesto del proyecto

Rubro	Investigador	Contrapartida (UFPSO)		Total
	Efectivo	**Efectivo**	**Especie**	
Director de la investigación ($ 80.000/h)			$ 2,560,000.00	$ 2,560,000.00
Estudiante investigador es ($ 20.000/h)	$ 6,400,000			$ 6,400,000.00
Recurso tecnológico: Base de datos ($ 30.000/h)			$ 4,800,000.00	$ 4,800,000.00
Equipo de computo	$ 2,500,000			$ 2,500,000
Papelería y útiles de escritorio	$ 1,000,000			$ 1,000,000
Imprevistos	$ 500,000			$ 500,000
TOTAL	**$ 10,400,000.00**		**$ 7,360,000.00**	**17,760,000**

Nota. Elaboración propia.

4.3 Recurso Institucional

Se contará con el apoyo de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, permitiendo el acceso a bibliografía especializada y bases de datos académicas.

Adicionalmente, se contará con la colaboración de la empresa ESPO S.A. E.S.P., que facilitará el acceso a la red de acueducto, información de infraestructura y registros históricos de fugas, lo cual será fundamental para la validación de la guía técnica.

4.4 Cronograma de Actividades

La investigación se desarrollará en un período de seis meses, distribuyendo las actividades según los objetivos específicos del proyecto (tabla 5).

Tabla 5

Cronograma de actividades

Objetivo	Actividades	Meses															
		Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Caracterizar las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, mediante el análisis de variables hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua.	Recopilación y revisión de información del último trimestre relacionada con pérdidas de agua, material de las tuberías, antigüedad, rangos de presión y frecuencia de fugas por sector de la red de acueducto.																
	Diseño y estructuración de la matriz de las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua.																
	Análisis de las variables hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua.																
Identificar los tipos de fugas de agua presentes en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, por medio del análisis técnico del sistema y revisión de registros operativos y de mantenimiento del último trimestre.	Recopilación de información interna de la empresa para conocer el tipo de fuga más frecuente, mediante revisión de registros operativos y de mantenimiento del último trimestre.																
	Análisis técnico comparativo de los tipos de fuga existentes del sistema de mantenimiento del último trimestre.																
	Observación y priorización de los sectores con mayores índices de pérdidas y recurrencia de fugas para la selección del sector piloto.																

Objetivo	Actividades	Meses															
		Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Formular una propuesta de optimización del proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, fortaleciendo y contribuyendo el sistema de acueducto haciendo uso del Geófono PQWT-L3000.	Selección del sector piloto a partir de los resultados de la matriz comparativa y realización de la caracterización técnica detallada del sector seleccionado.																
	Análisis del funcionamiento del geófono PQWT-L3000 y de los principios acústicos aplicados a la detección de fugas, mediante la revisión de manuales del fabricante y literatura técnica especializada.																
	Definición y estructuración de una propuesta de optimización del proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, fortaleciendo y contribuyendo el sistema de acueducto haciendo uso del Geófono PQWT-L3000																

Nota. Elaboración propia.

5. Resultados

5.1 Caracterización de las Condiciones Operativas del Último Trimestre en el Sistema de Acueducto del Municipio de Ocaña, Norte de Santander, Mediante el Análisis de Variables Hidráulicas, Estructurales y de Funcionamiento de la Red, que Inciden en las Fugas de Agua.

En este apartado se muestra las condiciones operativas del último trimestre (meses críticos) en el sistema de acueducto, por ende, se verá reflejado el empleo de un diámetro de tubería inapropiado en sistemas hidráulicos provoca daños severos; teniendo en cuenta que, los diámetros reducidos producen ineficacia energética, turbulencia, alta presión y pérdida de carga. Esto causa una posible ruptura debido a la sobrepresión, un incremento de temperatura del fluido y un deterioro anticipado (Jiménez Castaño, 2025). Asimismo, para la a recopilación y revisión de información del último trimestre relacionada con pérdidas de agua, material de las tuberías, antigüedad, rangos de presión y frecuencia de fugas por sector de la red de acueducto, fue necesario la definición de una matriz estructurada donde se manifiesta las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua.

Para conocer el índice de roturas de tuberías y reducir es importante en los sectores hidráulicos una gestión apropiada posibilita, por ejemplo, disminuir la presión para optimizar la calidad superficial. Por el contrario, una presión fuera de control genera un derroche de agua, ya que una presión alta incrementa considerablemente el volumen de fugas. La sectorización posibilita la regulación de la presión, lo que disminuye las pérdidas físicas, prolonga la vida útil

de la infraestructura y reduce los costos operativos incluso en zonas críticas (Tirado Garriazo, 2024), en este caso Ocaña cuenta con 10 sectores hidráulicos los cuales son “Rebombeo tanque la laguna, Rebombeo Cerro de los muertos y Santa Cruz, Rebombeo tanque buena vista, Media, Alto Occidental, Bajo Central, Alto oriental, Alto Sur, Alto Occidental y Verde y/o recreacional”. Para el análisis de las variables hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua se efectúa la siguiente matriz (tabla 6):

Tabla 6

Matriz de las condiciones operativas del último trimestre en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander.

2025		***Octubre***			***Noviembre***			***Diciembre***		
NUSH	***Referente***	***Valor promedio de la presión registrada en el sector MCA***	***Tiempo de suspensión (tipo 4) en horas***	***Tipo de daño***	***Valor promedio de la presión registrada en el sector MCA***	***Tiempo de suspensión (tipo 4) en horas***	***Tipo de daño***	***Valor promedio de la presión registrada en el sector MCA***	***Tiempo de suspensión (tipo 4) en horas***	***Tipo de daño***
890	Rebombeo tanque la laguna	37,10	2 2 1 1 1 2,5	“3 “2 “2 “2 “2 “2	35,35	1	“2	49,35	2,5 2,5 2 1,5	“2 “2 “2 “2
891	Rebombeo Cerro de los muertos y Santa Cruz	59,15	1,5 3	“2 “6	60,20	1 1	“2 “3	59,15	N/P	N/P
892	Rebombeo tanque buena vista	52,50	2 1,5	“3 “3	51,80	N/P	N/P	49,35	2 3	“2 “4
893	Media	40,60	2 1 2	“3 “3 “6	36,40	2,5 3 2,5 1,5	“3 “3 “6 “8	42,70	N/P	N/P
894	Alto Occidental	36,05	1	“3	49,18	1,5 3 2 2 1,5	“3 “3 “6 “10 “4	49,88	2 2,5 3	“2 “2 “3
895	Bajo Central	39,96	3 1,5 2	“6 “3 “3	39,38	2 3 2,5	“2 “3 “2	36,46	1 3	“2 “3

2025		*Octubre*			*Noviembre*			*Diciembre*		
NUSH	***Referente***	***Valor promedio de la presión registrada en el sector MCA***	***Tiempo de suspensión (tipo 4) en horas***	***Tipo de daño***	***Valor promedio de la presión registrada en el sector MCA***	***Tiempo de suspensión (tipo 4) en horas***	***Tipo de daño***	***Valor promedio de la presión registrada en el sector MCA***	***Tiempo de suspensión (tipo 4) en horas***	***Tipo de daño***
			3 2	“6 “3		1,5 2 2 2,5 1,5 2 1,5 2 2,5 3	“8 “8 “3 “2 “3 “3 “2 “3 “6 “6			
896	Alto oriental	23,10	2,5	“2	23,10	N/P	N/P	15,75	2 2 3 3	“2 “2 “2 “3
897	Alto Sur	38,85	N/P	N/P	35,35	3	“3	32,20	4 4,5 4,5 2 3	“6 “4 “4 “2 “18
898	Alto Occidental	24,85	N/P	N/P	29,75	N/P	N/P	23,45	N/P	N/P
899	Verde y/o recreacional	17,15	N/P	N/P	26,25	N/P	N/P	18,90	4,5 2	“6 “2
Promedios:		**MCA: 36,931**	**Horas: 1,8**	**Incidencias: 20**	**MCA: 38,676**	**Horas: 2,1**	**Incidencias: 26**	**MCA: 37,719**	**Horas: 2,7**	**Incidencias: 22**

Nota. Elaboración propia con base a la base de datos de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

De acuerdo con los resultados analizados en la tabla anterior se muestra que en el último trimestre del año 2025 no se presentaron eventos que afectaron la infraestructura del servicio de acueducto en el periodo mencionado recalcando las siguientes variables:

5.1.1 Variables Hidráulicas

Es importante destacar que en ESPO S.A. E.S.P., este tipo de variables son las que potencian el recurso hídrico, presentando particularidades cualitativas y medibles en los sistemas de acueducto; por ende, consiguen medir factores como Las variables de potencia hidráulica son características medibles o cuantificables como presión, caudal y pérdidas (figura 3).

Figura 3

Variables Hidráulicas

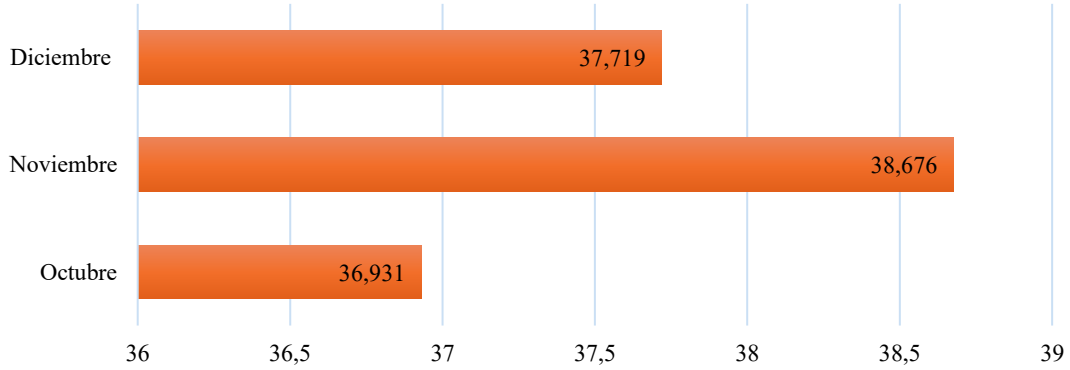


Nota. Elaboración propia

Así mismo, se da a conocer las variables hidráulicas cuantitativas del último trimestre de 2025 (figura 4):

Figura 4

Variable de MCA



Nota. Elaboración propia con base a la base de datos de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

En este caso, se registró una presión media de 37,10 MCA en el mes de octubre noviembre de 38,676, y diciembre de 37,719, para describir cómo se comporta el agua en las tuberías. Esta presión es intensa y fuerte; se aspira a que sea suficiente para superar las pérdidas de energía provocadas por la fricción y alcanzar los puntos más altos, pero no tanto como para generar fatiga en los materiales. Una de las causas principales de las fugas invisibles es la presión excesiva. Ya que, como la presión se mide en metros de columna de agua (MCA), el cual es un valor ideal para áreas residenciales urbanas. Por lo general, el rango óptimo se sitúa por encima de los 15-20 MCA para garantizar que el agua alcance las partes altas de los edificios, pero por debajo de los 50-60 MCA para prevenir que la tubería se rompa con frecuencia. nivel de servicio sin imponer a la red un estrés mecánico demasiado alto.

5.1.2 Variables Operativas

En ESPO S.A. E.S.P., las variables operativas develan cómo funciona el sistema de acueducto y sus fases del sistema como recepción, drenaje, tratado de las aguas y almacenaje; así mismo, expone variaciones de uso con continuidad del servicio, eficiencia del sistema, mantenimientos/fallas, y control/monitoreo (figura 5).

Figura 5

Variables Operativas

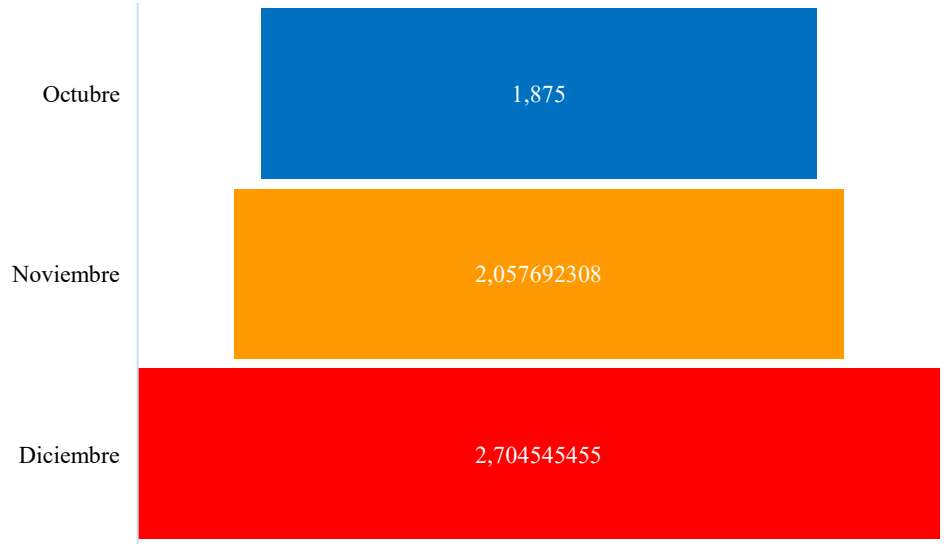


Nota. Elaboración propia.

Dicho esto, la más destaca desde lo cuantitativo, fue la de tiempo, debido a que, refleja qué tan continuo es el servicio que proporciona la compañía (figura 6).

Figura 6

Variable de horas



Nota. Elaboración propia con base a la base de datos de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

En este caso, reflejan la capacidad de respuesta y la continuidad del servicio. Tomando como referencia el tiempo de suspensión de 2,7 horas en diciembre, se observa que fue el más alto. Este indicador de resiliencia mostró un promedio de 1,8 horas, siendo el más bajo. Esto indica que el equipo de mantenimiento tiene una logística regular (detección, excavación y reparación rápida). Para restablecer rápidamente el flujo, es necesario reducir aún más la entrada de aire y contaminantes a la red. Este indicador evalúa la eficacia de la respuesta operativa frente a una avería; debe ser un tiempo de reparación muy eficiente. En la administración de acueductos, las interrupciones que duren menos de cuatro horas son vistas como poco impactantes para la comunidad, porque en muchas ocasiones el almacenamiento interno de las casas (tanques) suple la falta de flujo; sin embargo, los pobladores hacen reclamaciones o preguntas constantes.

5.1.3 Variables Estructurales

El sistema de tuberías se caracteriza en ESPO S.A. E.S.P. mediante variables estructurales como sus características, elementos de la red y las condiciones en que se encuentra la estructura, ya que, estructurales son mecanismos esenciales que precisan el orden y desempeño del sistema a largo plazo (figura 7).

Figura 7

Variables Estructurales



Nota. Elaboración propia

Figura 8

Variable de Daño de tuberías (plg)

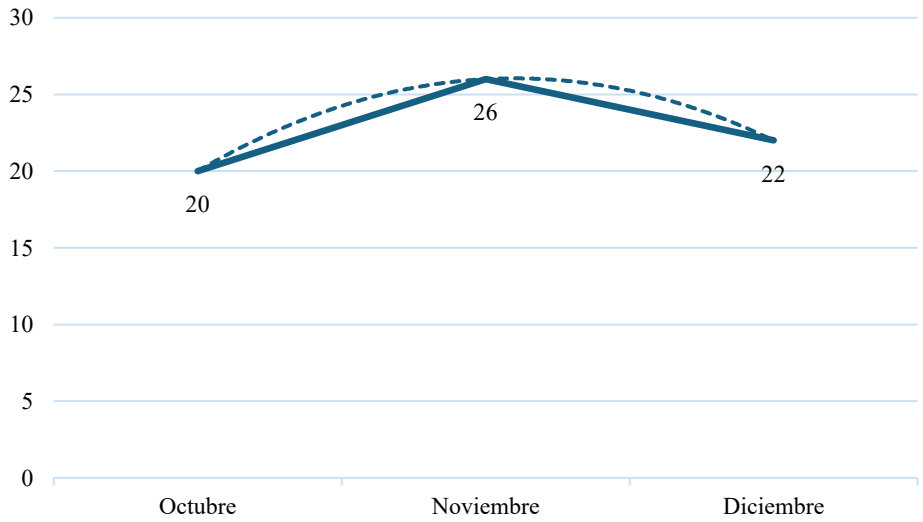


Nota. Elaboración propia

En referencia a la infraestructura física y su vulnerabilidad se tomó los daños en tuberías por diámetros de 3", 2" y 6", los cuales fueron los de mayor incidencia en cuanto a la presencia de fallas en diámetros distintos indica una problemática distribuida. Así mismo, los daños en 2" y 3" suelen ser en redes de distribución secundaria (rellenos mal compactados o fatiga), mientras que el de 6" es una red de transporte que impacta a más usuarios. Los diámetros indicados indican que los problemas están concentrados en varios niveles de la red 2" y 3", que pertenecen a la red de distribución local o secundaria. Son tuberías que transportan agua directamente a las acometidas domiciliarias. No obstante, si tienen un diámetro de 6 pulgadas o más, pertenecen a una red matriz o principal de distribución. Estos daños en esos diámetros fueron más críticos porque podrían dejar sin servicio a áreas más extensas y mostrar fallas frecuentes. Esto se debe a que los daños en diámetros tan diversos podrían indicar un manejo inadecuado del material de la tubería, la antigüedad de la red o sobrepresiones puntuales (figura 9).

Figura 9

Variable de Cantidad de daños en el trimestre



Nota. Elaboración propia con base a la base de datos de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

Analizando los resultados de las pérdidas en las tuberías que presentan se puede notar de acuerdo con el grafico anterior que van desde 20 incidencias en octubre subiendo a 26 en noviembre y bajando 22 en diciembre, en las que la densidad de consumidores se muestra que el alto consumo arrojó modificaciones en la infraestructura, lo cual, obstaculiza garantizar una distribución eficaz y prevenir embotellamientos en la red, para ello, se evaluó el número de daños en las diferentes la localización, las características de la red existente fueron elevadas en el mes de noviembre las áreas que tuvo mayor incidencia fueron alto “Occidental y Bajo Central”. Con el fin de detectar zonas de menor incidencia en todo el trimestre se menciona “Alto Occidental y Verde y/o recreacional” (figura 9).

Conjuntamente, se detectaron numerosas dificultades durante la evaluación hidráulica de la red de distribución en régimen permanente, las cuales, afectaban negativamente su rendimiento. Para abordar estas dificultades, se realizó un análisis trimestral en 2025 que ayudó a identificar las razones de los problemas y se sugirieron varias mejoras para optimizar la red de distribución de agua potable del municipio Ocaña; mostrando una eficiencia intermedia del sistema, sin asegurar un abastecimiento apropiado y la mejora de la calidad del servicio para cada usuario.

5.2 Identificación los Tipos de Fugas de Agua Presentes en el Sistema de Acueducto del Municipio de Ocaña, Norte de Santander, por Medio del Análisis Técnico del Sistema y Revisión de Registros Operativos y de Mantenimiento del Último Trimestre

Disminuir la fuga de agua tendrá muchas ventajas, incluyendo que aumentará la cantidad de agua disponible para otros usuarios en el entorno, como agricultores, o para mantener los hábitats naturales. Además, los ayuntamientos y las empresas tendrán que invertir menos en adquirir nuevos recursos hídricos, ahorrar en costos de tratamiento y disminuir su gasto energético y emisiones de gases de efecto invernadero al aumentar la eficacia de estos procedimientos (Bermejo, et al., 2025). Consecuentemente, es por las fugas en los sistemas urbanos de distribución de agua, cada año se pierde agua potable; debido a que, cuando ocurre una fuga, ya sea pequeña o grande, en la red de tuberías no siempre es sencillo localizar el punto exacto. Si es pequeña, el agua llega a su destino, pero ya no se puede asegurar su calidad. Además, esto afecta los factores de presión y flujo dentro del conducto y puede provocar que este se rompa y genere fugas mayores (Figueroa Abrio, et al., 2025).

Dado que la calidad del agua potable se degrada a medida que avanza a través de la red de distribución, es apropiado examinar su monitoreo utilizando sistemas de diagnóstico y vigilancia; por ende, la implementación de una técnica que ayude al operador mediante la atención remota de dicho proceso es el efecto de la propuesta. Asimismo, el método simplificará el diagnóstico al presentar la información más importante y relevante que una falla significativa en el sistema puede ofrecer, como la identificación de una fuga de agua. Por ende, en este objetivo se pretende la recopilación de información interna de la empresa ESPO S.A. E.S.P., para

conocer el tipo de fuga más frecuente, mediante revisión de registros operativos y de mantenimiento del último trimestre (tabla 7).

Tabla 7

Último trimestre del año 2025

	Vía	Tipo de red	Material	Causa probable	Geófono	Tipo de fuga	Visibilidad de la fuga	Elemento afectado
OCTUBRE	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	SI	Falla en accesorio	visible	Accesorio
	Tierra	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Falla en accesorio	Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	SI	Falla en accesorio	Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgastes en sellos	NO	Falla en accesorio	Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	PVC	Envejecimiento del material	NO	Falla en accesorio	No Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgastes en sellos	SI	Falla en accesorio	Visible	Accesorio
	Tierra	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Fisura o grieta	Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Rotura longitudinal	Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	SI	Rotura longitudinal	Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Envejecimiento del material	NO	Falla en accesorio	No Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Presión	SI	Fisura o grieta	Visible	Tubería
	Tierra	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgaste o falla del accesorio	NO	Falla en accesorio	No Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgaste o falla del accesorio	NO	Falla en accesorio	No Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgaste o falla del accesorio	SI	Falla en accesorio	Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	PVC	Presión	NO	Fisura o grieta	No Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgastes en sellos	SI	Falla en accesorio	Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Envejecimiento del material	NO	Falla en accesorio	Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgastes en sellos	SI	Fisura o grieta	Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Falla en accesorio	No Visible	Tubería
NOVIEMBRE	Pavimento	Secundaria	PVC	Envejecimiento del material	NO	Falla en accesorio	Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	PVC	Envejecimiento del material	SI	Falla en accesorio	Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Fisura o grieta	No Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	PVC	Envejecimiento del material	SI	Falla en accesorio	Visible	Tubería

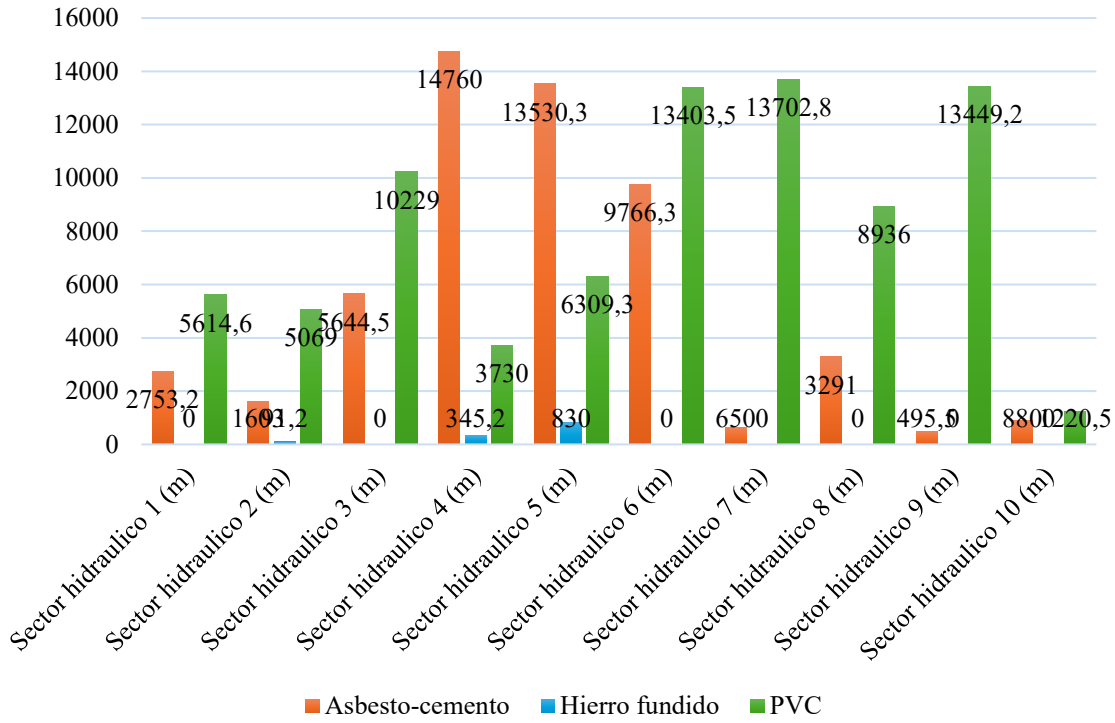
Vía	Tipo de red	Material	Causa probable	Geófono	Tipo de fuga	Visibilidad de la fuga	Elemento afectado
Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	SI	Fisura o grieta	No Visible	Accesorio
Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Falla en accesorio	No Visible	Accesorio
Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	SI	Rotura longitudinal	Visible	Accesorio
Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgastes en sellos	NO	Falla en accesorio	Visible	Tubería
Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgaste o falla del accesorio	SI	Fisura o grieta	Visible	Accesorio
Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Presión	NO	Fisura o grieta	Visible	Tubería
Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Sobre carga al suelo	SI	Falla en accesorio	Visible	Tubería
Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Envejecimiento del material	NO	Falla en accesorio	No Visible	Tubería
Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgastes en sellos	SI	Falla en unión	No Visible	Tubería
Tierra	Secundaria	PVC	Presión	NO	Falla en accesorio	Visible	Tubería
Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgaste o falla del accesorio	NO	Falla en accesorio	Visible	Accesorio
Pavimento	Secundaria	PVC	Envejecimiento del material	SI	Falla en accesorio	No Visible	Tubería
Tierra	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Fisura o grieta	Visible	Accesorio
Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgastes en sellos	SI	Falla en accesorio	Visible	Tubería
Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Envejecimiento del material	NO	Fisura o grieta	No Visible	Tubería
Pavimento	Secundaria	PVC	Presión	SI	Falla en accesorio	Visible	Tubería
Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Fisura o grieta	Visible	Accesorio
Pavimento	Secundaria	Hierro Dúctil	corrosión	SI	Pérdida de material	Visible	Tubería
Tierra	Secundaria	Asbesto Cemento	Envejecimiento del material	NO	Fisura o grieta	No Visible	Tubería
Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgastes en sellos	SI	Falla en unión	Visible	Tubería

	Vía	Tipo de red	Material	Causa probable	Geófono	Tipo de fuga	Visibilidad de la fuga	Elemento afectado
	Pavimento	Primaria	Asbesto Cemento	Desgastes en sellos	SI	Falla en accesorio	No Visible	Tubería
DICIEMBRE	Pavimento	Primaria	Asbesto Cemento	Desgastes en sellos	SI	Rotura longitudinal	Visible	Tubería
	Pavimento	Primaria	Asbesto Cemento	Envejecimiento del material	SI	Falla en accesorio	Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	SI	Falla en unión	Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgastes en sellos	NO	Falla en accesorio	No Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Fisura o grieta	Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Falla en accesorio	No Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Fisura o grieta	Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Fisura o grieta	No Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgaste o falla del accesorio	NO	Falla en accesorio	Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgastes en sellos	NO	Falla en accesorio	No Visible	Tubería
	Pavimento	Secundaria	PVC	Presión	SI	Fisura o grieta	Visible	Tubería
	Tierra	Secundaria	PVC	Desgaste o falla del accesorio	NO	Falla en accesorio	Visible	Accesorio
	Pavimento	Secundaria	Asbesto Cemento	Desgaste o falla del accesorio	NO	Fisura o grieta	No Visible	Accesorio

Nota. Elaboración propia con base a la base de datos de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

Figura 10

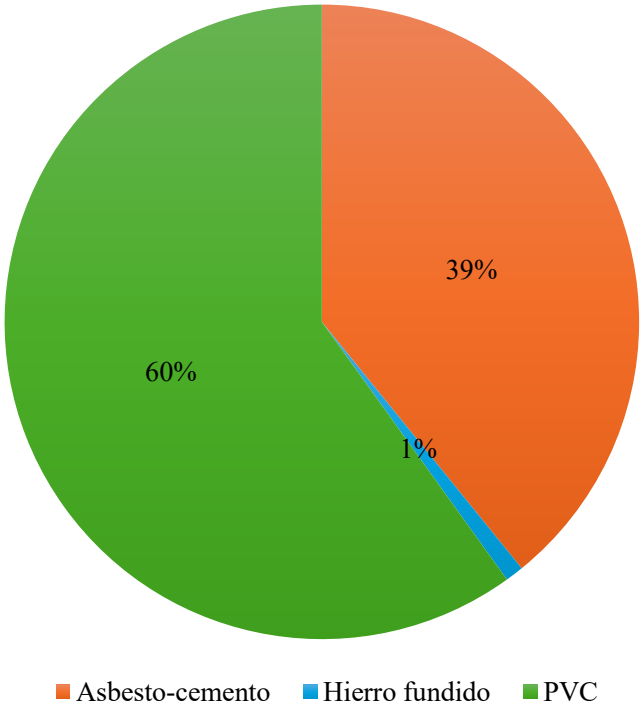
Materiales tuberías acueducto de Ocaña



Nota. Elaboración propia con base a la base de datos de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

De acuerdo con los sectores hidráulicos del municipio de Ocaña, Norte de Santander, se requiere de una red de distribución de agua como parte fundamental de su infraestructura; ya que, en la mayoría de estas se debe transportar el agua desde fuentes naturales o plantas de tratamiento, hasta los consumidores finales en tuberías de PVC para asegurar un suministro constante y de calidad, esta red debe ser segura, eficaz y sustentable. Sin embargo, los materiales empleados en la red de distribución de agua, específicamente para el enlace de tuberías y el control se efectúa a través de válvulas y accesorios (figura 10).

Figura 11
Kilómetros por tipo de material



Nota. Elaboración propia con base a la base de datos de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

De acuerdo con la gráfica anterior se muestra la incidencia del Asbesto-Cemento, que, representa el 39% de los kilómetros del sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, este es el material más importante para las filtraciones no visibles, debido a que, puede tener goteos permanentes a lo largo del tubo, conocidos como fugas de fondo por su porosidad y descomposición química. Aunque, no producen ruido suficiente para ser detectados mediante métodos acústicos, estos goteos malgastan grandes cantidades de agua (figura 11).

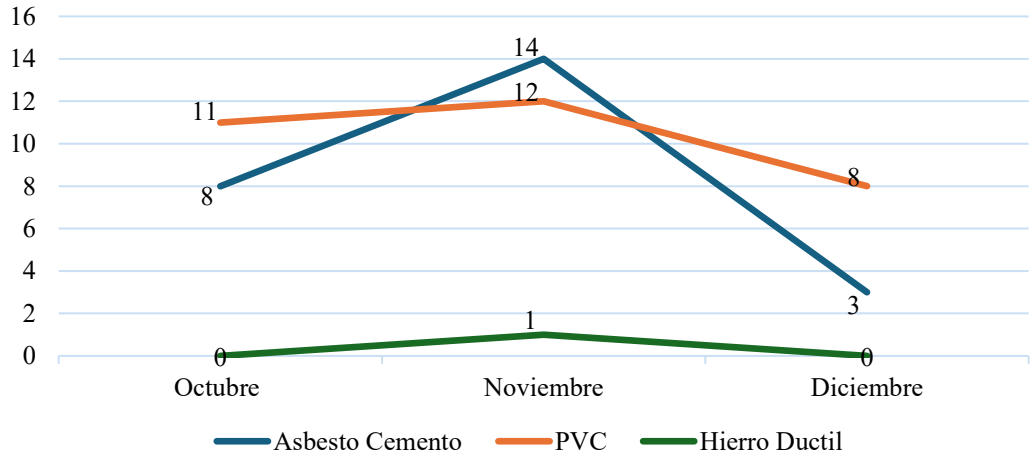
Dicho esto, se puede apreciar el gráfico en donde se indica que, aunque el hierro puede ser corrosivo y solo representa el 1%, tiene una ventaja única: Es el mejor conductor de sonido (figura 10). Esto quiere decir que, una fuga no visible en hierro puede ser detectada con un

geófono a una distancia mucho mayor que en los demás materiales. Esto posibilita que sean localizadas y reparadas antes de que produzcan un socavón.

Asimismo, indica que el PVC es el 60%, y en teoría, el material más adecuado para evitar que surjan fugas invisibles en un principio; puesto que, al ser un material plástico y liso, por lo que tiene menos juntas, es completamente resistente a la corrosión que perfora los tubos de metal. No obstante, si se produce una fuga, es el más complicado de localizar debido a que, el sonido es absorbido por el plástico y el geófono pierde eficacia.

Figura 12

Tipo de Materiales dañados



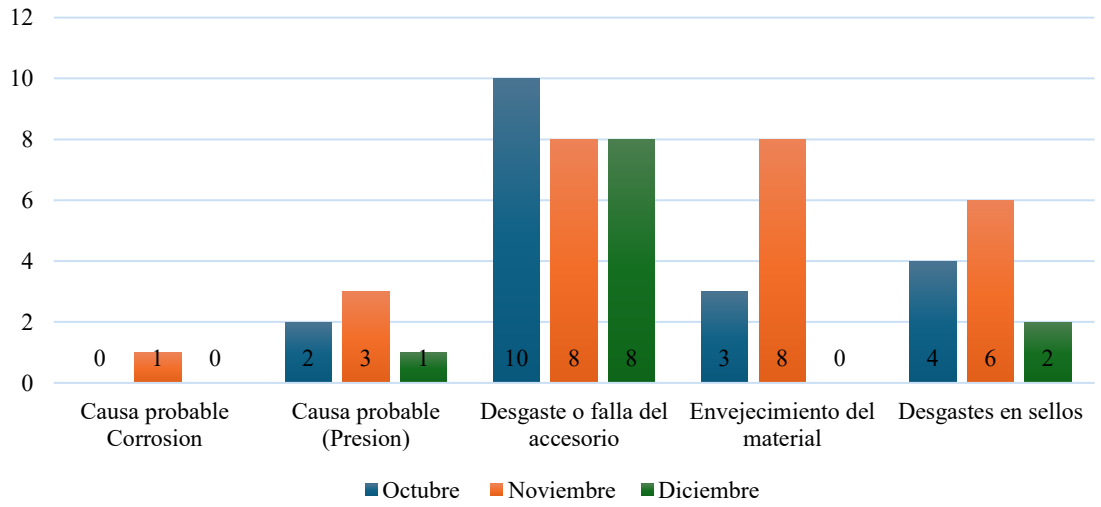
Nota. Elaboración propia con base a la base de datos de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

De acuerdo con los datos analizados en los que el PVC reportó 31 fallas durante el último trimestre del 2025 y el Asbesto-Cemento con 25 incidencias, en los últimos meses del año 2025, fue notoria la incidencia de daños en los distintos materiales, los más usados como el PVC son los que más van a tener menciones, puesto que, es necesario renovar estos sistemas obsoletos

antes de que la situación se agrave aún más, en términos de medio ambiente y del presupuesto. Por ende, los planificadores municipales deberían enfocarse en sustituir esas viejas tuberías por otras de materiales más resistentes, lo que supondría una mayor protección para los abastecimientos de agua potable y menos arreglos de emergencia cuando las tuberías finalmente se rompan (figura 12).

Figura 13

Tipos de daños



Nota. Elaboración propia con base a la base de datos de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

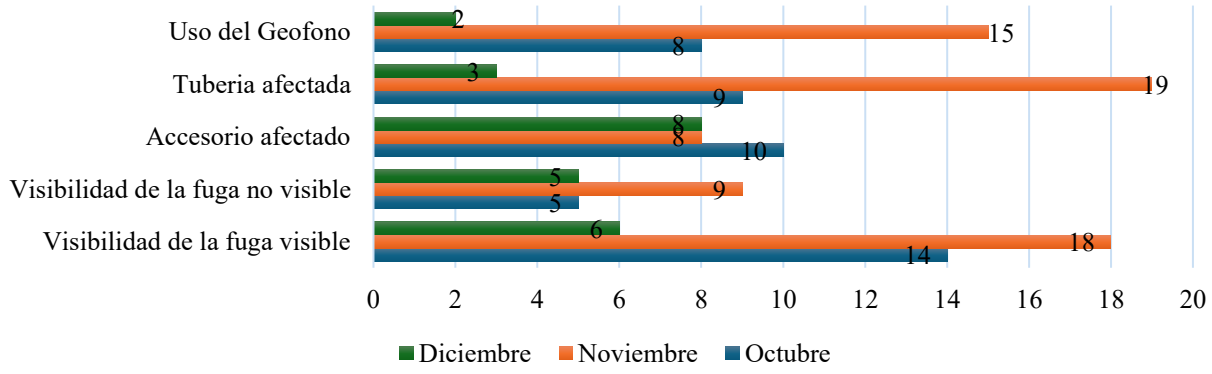
De acuerdo con los registros operativos una suma total que asciende a 57, indican la razón de que estas fugas estén sucediendo con más frecuencia es el desgaste o mal funcionamiento del accesorio; siendo el motivo principal de 26 casos simbolizados en los datos de octubre en donde tuvo una incidencia mayor de 10 casos, por el envejecimiento del material; en noviembre alcanzó un pico alto 8 casos, de acuerdo con el daño por presión se muestran que es menor 6 casos, se trata de un elemento constante que podría estar debilitando las juntas. Y, así

mismo, este aumentó a 8 casos el registro de envejecimiento del material en noviembre, al mismo tiempo que se registraron los picos más altos de tuberías en 19 casos y asbesto cemento con 14 casos (figura 13).

Por lo que, el asbesto cemento, en términos técnicos, suele experimentar ablandamiento o descalcificación con el paso del tiempo; esto produce micro fisuras que, en ocasiones, no rompen el tubo drásticamente, sino que posibilitan filtraciones continuas que son absorbidas por el suelo. Dado que es un material rígido, estas grietas funcionan como fugas de fondo, las cuales, son muy difíciles de detectar a simple vista, pero que debilitan la estructura del terreno adyacente al tubo (Calderón Ospina, 2022).

Figura 14

Fugas e Incidencia



Nota. Elaboración propia con base a la base de datos de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

Como se puede apreciar, los registros evidencian una clara diferencia entre el estado de las fugas visibles, que son las más comunes en el trimestre tuvo 38 reportes totales. Estas suelen ser fracturas que atraviesan la superficie; y las fugas no visibles, se registraron 19 reportes; para

las cuales, es ineludible el uso del geófono, teniendo gran vinculación con estas, sobre todo en noviembre, cuando se empleó en 15 ocasiones para 9 fugas no visibles (figura 14).

De acuerdo con el elemento afectado las tuberías frente a accesorios se registraron 26 fallas en los accesorios y 31 en la tubería principal; en donde, la tubería tuvo 19 casos en noviembre, lo que fue un mes crítico. En tanto los recursos: El PVC específicamente 31 casos y el asbesto-cemento con 25 casos son los materiales que registran la mayor concentración de daños; y se debe destacar que, el hierro dúctil casi no tiene fallas.

Por lo tanto, en este caso las variantes a resaltar son los riesgos de las fugas no visibles, ya que, estas son las más influyentes en la socavación del terreno, puesto que, el agua que fluye por debajo de la superficie va limpiando el material más fino del terreno. Esto genera vacíos que tienen la posibilidad de causar hundimientos o el colapso inesperado de estructuras o pavimentos.

Y, si la presión del sistema disminuye, el agua contaminada del terreno puede ser absorbida por los puntos de fuga hacia dentro de la tubería. Cuando el agua sale a presión por un agujero, produce una vibración particular que el geófono hace más audible para el oído humano. Así mismo, al examinar la manera en que el envejecimiento del material con 8 casos en noviembre promueve la aparición de estas fugas encubiertas; es de destacar que el uso del geófono disminuyó significativamente en diciembre, puesto que, se manejó solamente 2 veces y esto devela que existe una mejoría de las tuberías al haber ido resuelto paulatinamente las fugas

no visibles, las cuales, son las que, generan daños mayores; siendo un reflejo de la salud del sistema hidráulico.

Finalmente, se puede decir que, en el último trimestre muestra un sistema con 19 fugas no visibles, las cuales, se encuentran sobre todo a través del uso intensivo de geófonos, sobre todo durante el pico operativo de noviembre. Por otra parte, se destaca que, la infraestructura de PVC tuvo el índice más alto de daños, con 31 casos, y justo después vino el asbesto-cemento, con 25 este material que entraña un riesgo crítico porque su porosidad y envejecimiento favorecen filtraciones ocultas que son difíciles de detectar acústicamente. Por ende, la vinculación entre el incremento de fallos en las tuberías principales y el deterioro de los accesorios indica que la fatiga del material es el elemento clave en la pérdida de estanqueidad.

5.3 Formulación de una Propuesta de Optimización del Proceso de Detección de Fugas en el Sistema de Acueducto del Municipio de Ocaña, Norte de Santander, Fortaleciendo y Contribuyendo el Sistema de Acueducto Haciendo uso del Geófono PQWT- L3000

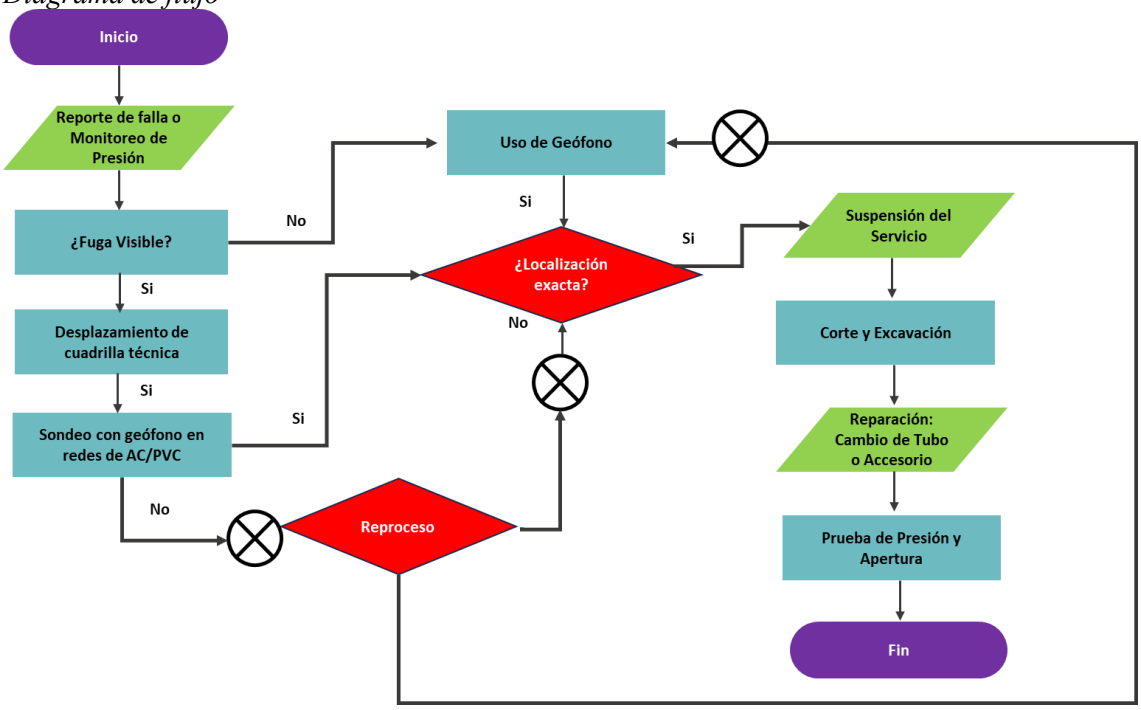
La presente propuesta se realizó con el fin de optimizar el proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto, y así fortalecer y contribuir en el mismo mediante el uso del geófono. Siendo esto indispensable para crear un sistema apropiado para proveer agua potable, dotado de todos los componentes técnicos necesarios para elevar la calidad de vida de una población. La creciente inquietud, que es justa para la optimización del uso del agua en los sistemas de abastecimiento requiere una mejora en la calidad y el rendimiento de esos mismos sistemas. Este objetivo describe un vinculado de métodos destinados a disminuir el derroche de agua y aumentar la eficacia del suministro; en donde su método sugerido establece criterios para elegir y optimizar las estrategias que se deben utilizar para alcanzar estos objetivos de la mejor manera posible.

5.3.1 Diagnóstico del Proceso Actual

Implementar un programa de mejora del rendimiento y la condición de las provisiones en todo el sistema, sin ninguna estrategia espacial, además de ser significativamente menos efectivo, conllevaría una inversión y un costo muy altos y también una rentabilidad incierta, que sería menor a la de inversiones específicas realizadas solo en algunos elementos y sectores. Para comprender el proceso actual se efectuó el siguiente diagrama (figura 15):

Figura 15

Diagrama de flujo



Nota. Elaboración propia con base a la base de datos de la empresa ESPO S.A. E.S.P.

De acuerdo con los resultados de los capítulos anteriores y el diagrama anterior se muestran los puntos se falla actual de acuerdo a las mediciones del último trimestre del 2025 en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, fueron:

Recepción y Clasificación del Reporte: Estos se gestionan mediante avisos de filtraciones en superficie (fugas visibles) o llamadas de la comunidad. O con supervisión interna de las caídas de presión por debajo del nivel usual de 37.10 MCA o el incremento injustificado del flujo nocturno.

Desplazamiento y Diagnóstico Preliminar: Un equipo técnico se dirige al área. Se comprueba el material de la zona (teniendo presente que el 39% es asbesto-cemento y el 60% PVC) y el diámetro de la tubería (2", 3" o 6"). Si los datos de presión indican una fuga, pero no

hay humedad en el terreno, se debe volver inmediatamente a la unidad de geófono para prevenir "tiempos muertos que actualmente son consecutivos".

Localización con Geófono (Fugas No Visibles): Este es el paso crucial en el que se registraron 19 informes durante el trimestre. En esta situación, el sensor no se apoya en válvulas o hidrantes para delimitar el área como debería; únicamente sigue la línea de la tubería. Como el PVC transmite el sonido con menor intensidad que el metal, es necesario que el técnico modifique los filtros de frecuencia del equipo para evitar falsos positivos (como sucedió en noviembre con 15 exámenes y 9 descubrimientos).

Suspensión del Servicio y Excavación: Se contabilizan las 1.8 a 2.7 horas de detención del servicio. La optimización procura que la excavación sea exacta; si el geófono falla, la excavación es más grande y el tiempo de suspensión aumenta.

Cierre y Reposición de Capa Asfáltica: Se lleva a cabo la pavimentación y el relleno compacto. No se toma nota en la bitácora de los datos ni del material hallado, profundidad, diámetro y causa de la avería para actualizar la base de datos de mantenimiento preventivo.

La red de acueducto tiene una vulnerabilidad grave debido a la mezcla del envejecimiento de los materiales (Asbesto-Cemento en un 39%) y el deterioro de accesorios, lo cual ha representado el mayor número de fallos (26 casos). En estos momentos, el sistema funciona de manera reactiva, se identifica una irregularidad en la presión o un informe y después se inicia la búsqueda. Aunado a ello, en noviembre se ejecutaron 15 intervenciones con geófono

para únicamente 9 fugas positivas pone de manifiesto una eficacia del 60%. De acuerdo a ello, se determinan las siguientes fallas, cuellos de botella, tiempos muertos y fugas:

Fallas de Material y Diámetros (Infraestructura): El asbesto-cemento (39%) y el PVC (60%) constituyen la mayoría en la red. Un máximo de 14 casos de fallos en asbesto-cemento, relacionados directamente con el envejecimiento, se reportó en noviembre. Los diámetros de 2, 3 y 6 pulgadas son los que más se ven impactados, lo cual indica que la búsqueda con geófono debe ajustarse específicamente para las frecuencias de vibración asociadas a estos diámetros y materiales.

Cuellos de Botella: El uso del Geófono: El geófono se utilizó 15 veces en noviembre para encontrar únicamente 9 fugas. Esto señala un margen de error o un obstáculo técnico en la localización inicial. Es necesario optimizar la formación en el manejo del equipo o poner en funcionamiento localizadores para disminuir el área de búsqueda antes de emplear el geófono, con el fin de evitar que se use demasiado al personal en áreas donde no se han encontrado cosas.

Tiempos Muertos y Suspensión: En diciembre, el periodo de suspensión llegó a 2,7 horas. El tiempo que pasa desde el reporte hasta la localización precisa es el mayor causante de "agua no contabilizada" y de malestar social. Si la presión media se mantiene constante (cerca de 38 MCA), las fugas ocultas pueden pasar desapercibidas más tiempo si no existe una rutina de inspección proactiva.

Fugas: Un tercio (19 informes) de los 57 registros fueron fugas ocultas. Estas son las que más cuestan. La optimización planteada debe centrarse en disminuir el tiempo de respuesta entre la detección de la anomalía de presión y la confirmación del geófono del punto de ruptura.

La optimización de este procedimiento no sólo disminuirá la cantidad de agua no contabilizada, sino que también, hará que el promedio de suspensión caiga de 2.7 horas, lo cual, mejorará la continuidad del servicio, por lo que es necesario aplicar un proceso estandarizado; además, evitar que se cometan errores; puesto que, las pérdidas de agua son responsabilidad de una gran cantidad de problemas económicos, técnicos, higiénicos y sociales.

A pesar de que todos los sistemas hidráulicos son susceptibles a accidentes y fallos, lo cual, ocasiona entre otras cosas pérdidas en el caudal transportado, el riesgo asumible debe estar definido con claridad. Se propone a continuación un método para examinar y elegir estas estrategias, en total sintonía con las tendencias actuales que abarcan todas las tácticas orientadas a lograr que el sistema de abastecimiento llegue a una condición óptima de funcionamiento y se conserve con cierto nivel de seguridad en su entorno.

5.3.2 Análisis de Debilidades

En primer lugar, esta caracterización operativa se enfocará en el análisis exhaustivo del estado y funcionamiento de un sistema hidráulico. Donde su finalidad es comprender el funcionamiento de la red para detectar zonas que son cruciales como:

Presiones: Supervisión sobre las variaciones horarias, así como de las presiones máximas y mínimas (el exceso de presión es la razón principal de rupturas).

Caudales: La inspección de los caudales de entrada y salida se utiliza para determinar el balance hídrico.

Infraestructura: Evaluar el estado de las válvulas, la antigüedad de las tuberías y los materiales (PVC, HF, AC).

División por sectores: Segmentación de la red en Distritos de Medición y Control (DMC) para aislar y cuantificar el consumo real en comparación con el agua.

Modelos de consumo: Diferenciación entre la pérdida de agua y el consumo legítimo de los usuarios.

Seguidamente, se contemplan las fugas se clasifican según su visibilidad, volumen y la forma en que se detectan. En este caso se hace énfasis en las Fugas No Visibles se filtra al alcantarillado o al terreno (suelos porosos) las más peligrosas porque pueden durar meses o años activas, generando una pérdida acumulada masiva. Estas requieren equipos especializados como el geófono.

5.3.2.1 Índice de Criticidad (IC). Para calcular el índice, se otorga un peso a cada aproximado a cada variable conforme a lo observado en los datos de octubre y diciembre, siendo el trimestre de criticidad local por el uso máximo del sistema, para ello demuestra el siguiente cruzando variables críticas por sector de presión, frecuencia de fuga, tipo de fuga y material:

Tabla 8

Cruzando variables críticas

Variable	Porcentaje de Peso	Criterio de Alta Criticidad
Presión	25%	Presiones sostenidas >38 MCA (mayor esfuerzo en juntas)
Material	30%	Asbesto-Cemento (AC) con signos de envejecimiento
Frecuencia de Fuga	25%	sectores con >10 incidencias mensuales (como en octubre).
Tipo de Fuga	20%	Predominio de fugas no visibles (necesidad de geófono).

Nota. Elaboración propia

Priorización por Sectores: A continuación, se presenta la tabla cruzada que justifica técnicamente la intervención. Esta matriz permite clasificar los sectores en Crítico, Alto o Medio:

Tabla 9

Matriz de Intervención

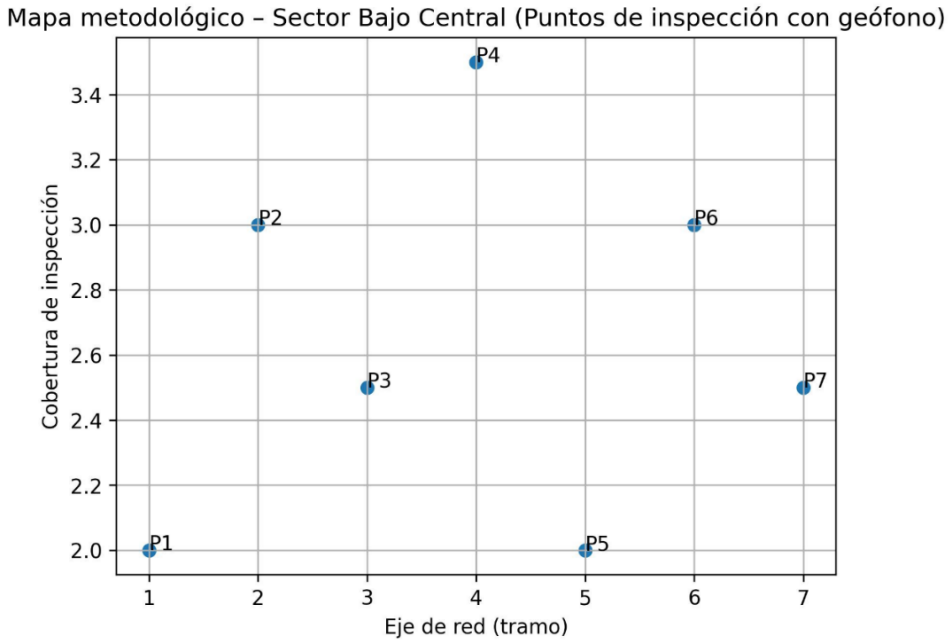
Sector	Presión (MCA)	Material Predominante	Frecuencia (Incidencias)	Tipo de Fuga	Nivel de Criticidad	Justificación de Intervención
Sector A (Rural/Antiguo)	>38,6	Asbesto-Cemento (39\%)	Alta (>15)	No Visibles	**Crítico**	El envejecimiento del AC y la alta presión causan fracturas invisibles
Sector B (Urbano PVC)	<37,1	PVC (60\%)	Media (8-10)	Visibles	**Alto**	Fugas por desgaste de accesorios

Sector	Presión (MCA)	Material Predominante	Frecuencia (Incidencias)	Tipo de Fuga	Nivel de Criticidad	Justificación de Intervención
						(uniones y válvulas)
Sector C (Técnico)	Variables > o <	Hierro	Baja (<5)	Mixtas	**Medio**	Baja representación en la red menor incidencia

Nota. Elaboración propia

Figura 16

Mapa metodológico (Inspección con geófono)



Nota. Elaboración propia

Este modelo posibilita la justificación de la inversión y el uso del geófono a partir de tres fundamentos:

Mejora del recurso humano: El equipo se dirige a las áreas "Críticas" de la tabla con un 90% de certeza, en vez de llevar a cabo 15 prospecciones para encontrar 9 fugas.

Prevención de daño a la estructura: Es prioritario actuar en el Sector A (AC) porque, al deteriorarse con la edad, el asbesto-cemento tiene una tendencia a provocar fracturas longitudinales que podrían causar el derrumbe de secciones completas si no se detectan a tiempo utilizando el geófono.

Regulación de presiones: Según los datos, las incidencias aumentan a 26 cuando la presión se eleva a 38,67 MCA (en noviembre). Esto explica que es necesario, además de reparar, colocar válvulas reguladoras en las zonas que se han señalado como críticas.

5.3.3 Selección del Sector Piloto

La implementación a pequeña escala de un proyecto, conocida como proyecto piloto o sector piloto, se utiliza para evaluar la eficacia de las herramientas, la logística, las comunicaciones y la gestión de partes interesadas antes de proceder con una gran implementación. Para ello se muestra la determinación del alcance inicial del estudio para poder servir de conexión entre el diseño y el proyecto de mayor envergadura, diferenciado en este caso de la siguiente manera:

Sector recomendado: Bajo Central

La selección muestra que, en el trimestre, la matriz de condiciones operativas registró más incidencias. En octubre se reportaron cinco, en noviembre trece (el número más alto del

sistema) y en diciembre dos. Esto señala que es el sector con la tasa más alta de errores, en particular en noviembre, lo cual lo convierte en un punto crítico del sistema.

Alta concentración de daños estructurales

En el análisis estructural se determina que el Alto Occidental y el Bajo Central fueron las zonas con mayor incidencia. Esto comprueba que Bajo Central es una de las áreas más problemáticas dentro del sistema, lo cual, la hace un lugar perfecto para validar tecnologías de detección.

Presiones hidráulicas medias favorables para pruebas

La presión fue de 39,96 MCA en octubre, 39,38 MCA en noviembre y 36,46 MCA en diciembre. Estas presiones están dentro del rango que permite la generación de vibraciones detectables; no son presiones demasiado bajas que encubran el sonido de fuga. Esto beneficia la detección acústica con el geófono.

Presencia de daños en diámetros críticos

Los registros indican daños en 2", 3" y 6". Esto quiere decir que el sector contiene una red secundaria (2" y 3") fugas domiciliarias, y una red primaria (6") fugas más significativas. Por lo tanto, el piloto tendrá la capacidad de analizar fugas en diversos niveles de la red.

Probabilidad de fugas no visibles

Los datos indican que en el trimestre se registraron 19 fugas no visibles, lo cual sugiere que la mayoría de estas están relacionadas con tuberías y accesorios envejecidos. En este caso, la zona con mayor incidencia es aquella donde las fugas ocultas son más probables, las cuales son precisamente las que necesitan un geófono.

Tabla 10

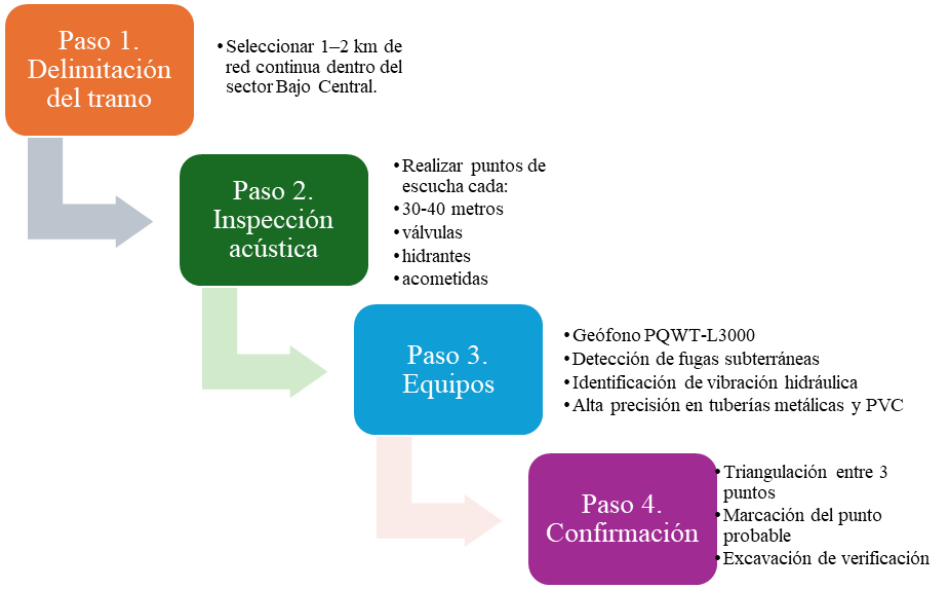
Tramo recomendado

Sector 10(m) 2,10 km	
Longitud	1 a 2 km
Diámetro predominante	2” y 3”
Material probable	PVC y Asbesto-Cemento
Vías	Pavimento (mejor transmisión acústica al geófono)
Historial	Daños recientes

Nota. Elaboración propia

Figura 17

Metodología para la prueba piloto



Nota. Elaboración propia

A partir de la evaluación de las variables hidráulicas, operativas y estructurales del sistema de acueducto de Ocaña en el último trimestre del año 2025, se determina que la zona Bajo Central es la más apropiada para poner en marcha un ensayo piloto de detección de fugas con geófono. Este sector tiene la mayor cantidad de incidentes en la red, especialmente en noviembre, y también muestra presiones promedio cercanas a 39 MCA. Estas condiciones facilitan la difusión de las vibraciones acústicas producidas por las fugas. Además, es posible evaluar el comportamiento del geófono en diferentes niveles del sistema de distribución gracias a que hay problemas en tuberías de varios diámetros (6", 2" y 3") entre las redes principales y secundarias. Por estos motivos, se sugiere elegir un segmento representativo de 1 a 2 km dentro del área de Bajo Central para llevar a cabo la prueba piloto con el geófono PQWT-L3000.

Tabla 11

Ficha técnica del sector piloto para detección de fugas con geófono

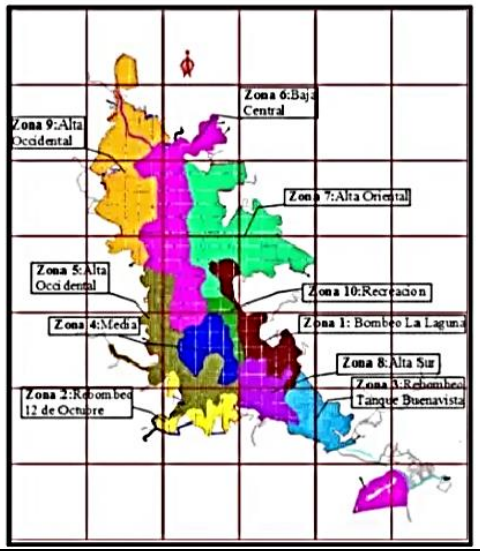
Factor Técnico	**Representación del Sector Bajo Central**
Sector hidráulico	Bajo Central
Extensión estimada del tramo piloto	1 – 2 km de red de distribución secundaria
Tipo de red predominante	Red de distribución secundaria con conexiones domiciliarias
Material predominante de tuberías	PVC (mayor porcentaje del sistema) y Asbesto-Cemento en tramos antiguos
Porcentaje aproximado por material	PVC: 60% del sistema – Asbesto-Cemento: 39% – Hierro dúctil: 1%
Diámetros de tubería presentes	2”, 3” (red secundaria) y 6” (tramos de conducción o red principal)
Antigüedad estimada de la red	Entre 20 y 40 años en tramos de asbesto-cemento y 10–20 años en redes de PVC
Tipo de superficie de instalación	Principalmente pavimento urbano; algunos tramos en suelo natural

Factor Técnico	Representación del Sector Bajo Central
Número estimado de usuarios abastecidos	Aproximadamente 800-1200 usuarios residenciales dentro del sector
Presión promedio del sistema	Octubre: 39,96 MCA-Noviembre: 39,38 MCA-Diciembre: 36,46 MCA
Rango de presión operativo	Entre 36 y 40 MCA (dentro del rango adecuado para zonas urbanas)
Tipo de daños registrados	Fallas en accesorios fisuras roturas longitudinales desgaste de sellos.
Materiales con mayor incidencia de daños	PVC y Asbesto-Cemento
Historial de Fugas En El Trimestre	Octubre: 5 incidencias Noviembre: 13 incidencias Diciembre: 2 incidencias
Total de Incidencias Registradas	20 eventos de daño durante el trimestre
Tipo de fugas predominantes	Fugas visibles por roturas o fisuras Fugas no visibles asociadas a desgaste de accesorios y envejecimiento del material
Elementos afectados con mayor frecuencia	Accesorios de la red y tubería principal
Condiciones operativas relevantes	Alta densidad de consumo presión constante presencia de redes antiguas que favorecen aparición de fugas
Método de detección propuesto	Inspección acústica mediante geófono PQWT-L3000
Intervalo recomendado de puntos de escucha	Cada 30 – 40 metros en válvulas, hidrantes y acometidas
Objetivo de la prueba piloto	Identificar fugas no visibles validar la eficiencia del geófono en redes de PVC y Asbesto-Cemento

Nota. Elaboración propia

Tabla 12

Ubicación del sector piloto



Elemento	Descripción
Municipio	Ocaña
Departamento	Norte de Santander
Sector hidráulico	Bajo Central
Tipo de zona	Urbana
Características urbanas	Zona con alta densidad residencial y red de distribución secundaria
Cobertura del piloto	Tramo continuo de 1–2 km dentro del sector

Nota. Elaboración propia

Según estos datos, el sector Bajo Central tiene la mayor cantidad de incidentes del sistema, especialmente en noviembre. La propagación del sonido de las fugas se ve favorecida por presiones entre 36 y 40 MCA, lo que optimiza la detección con geófono. Así mismo, la presencia simultánea de asbesto-cemento y PVC posibilita el análisis del comportamiento acústico en diferentes materiales. Las redes de 2" y 3" son las que tienen más riesgo de sufrir fugas en la distribución a los hogares.

5.3.4 Geófono PQWT-L3000 (Base Técnica)

El geófono PQWT-L3000 es un dispositivo electrónico creado para detectar acústicamente fugas en tuberías con presión. Su funcionamiento se basa en la captura de vibraciones producidas por el agua que escapa a presión por fisuras, grietas o fallos en los accesorios de la red. Cuando hay una fuga en una tubería presurizada, el agua que se escapa por la abertura provoca oscilaciones mecánicas, olas acústicas y turbulencias en el sistema hidráulico estas vibraciones se propagan mediante el tabique de la cañería, la tierra alrededor y la superficie pavimentada (Outline S.R.L., 2020).

Así mismo, el geófono tiene un sensor con alta sensibilidad que recoge estas vibraciones y las convierte en señales eléctricas; después, el equipo hace uso de filtros digitales y amplificación de sonido para procesar estas señales, lo que posibilita que el operador escuche y analice el patrón acústico típico de una fuga. El proceso implica la creación de puntos de escucha en la superficie del terreno, típicamente en las válvulas, los hidrantes, las tapas de registro y las conexiones domiciliarias. De esta forma, el operador es capaz de localizar el punto donde el ruido de la fuga es más intenso, lo que le permite determinar la posible localización del daño (Apolaya Alejandría, 2025).

Tabla 13

Especificaciones técnicas del Geófono PQWT-L3000

Característica	**Especificación**
Tipo de equipo	Detector acústico de fugas en tuberías
Modelo	PQWT-L3000
Método de detección	Análisis acústico de vibraciones

Sensor	Sensor piezoeléctrico de alta sensibilidad
Amplificación	Amplificador digital de señales
Pantalla	Pantalla LCD para visualización de señal
Alimentación	Batería recargable de litio
Autonomía	8 – 10 horas de trabajo continuo
Peso aproximado	1,5 – 2 kg
Tipo de escucha	Auriculares profesionales de alta sensibilidad
Rango de trabajo	Redes de distribución urbana de agua potable

Nota. Elaboración propia

Por otro lado, del rango de frecuencias de detección parte, de las fugas en tuberías generan señales acústicas en un rango de frecuencias relativamente amplio, para ello, el geófono PQWT-L3000 trabaja aproximadamente en el siguiente rango:

Tabla 14

Parámetro y Rango

Parámetro	**Rango**
Frecuencia de detección	50 Hz – 5000 Hz
Frecuencia típica de fuga	100 Hz – 2500 Hz
Filtro de ruido	Sistema de filtrado digital

Nota. Elaboración propia

Las frecuencias más altas suelen ocurrir en tuberías de metal y en fugas de alta presión; en cambio, las frecuencias más bajas se encuentran en los tubos de plástico, las filtraciones pequeñas y los suelos blandos. La sensibilidad del geófono, por otro lado, depende de la habilidad del sensor para detectar vibraciones tenues (Bohórquez Laiton y Medina Pérez, 2025).

Tabla 15

Parámetro y Valor aproximado

Parámetro	Valor aproximado
Sensibilidad del sensor	Alta sensibilidad piezoeléctrica
Nivel mínimo detectable	Micro vibraciones transmitidas por el suelo
Amplificación	Ajustable digitalmente
Control de volumen	Manual o digital

Nota. Elaboración propia

Por otro lado, la profundidad a la que se puede detectar una fuga depende de varios elementos, como el tipo de suelo, el material del tubo, la presión del sistema y cuán intensa sea la fuga. En redes urbanas de acueducto, el equipo opera con gran eficiencia, dado que las tuberías generalmente están situadas entre 0.8 y 1.5 metros de profundidad. El rango común de detección es primero la máxima profundidad, que es aproximadamente de 2 a 5 metros, seguido por la óptima profundidad, que va de 0.5 a 3 metros. Compatibilidad con materiales de tubería es el desempeño del geófono varía en función del material de la tubería, dado que cada material tiene una capacidad diferente para transmitir sonido, lo cual se observa de la siguiente forma:

Tabla 16

Compatibilidad con materiales de tubería

Material	Comportamiento acústico	Eficiencia del geófono
Hierro dúctil	Excelente transmisión del sonido	Muy alta
Acero	Excelente transmisión	Muy alta
Asbesto-cemento	Transmisión moderada	Alta
PVC	Absorbe vibraciones	Media
PEAD	Alta absorción acústica	Baja a media

Nota. Elaboración propia

Lo cual tiene concordancia con los resultados obtenidos en el último trimestre de 2025, en el que el sonido se transmite mejor por el hierro dúctil; no obstante, la detección acústica es obstaculizada por el PVC. Para lograr una detección más efectiva con el geófono, se aconseja que la presión en la red sea superior a 20 MCA, que las tuberías enterradas estén a menos de 2 metros de profundidad y los puntos de escucha se encuentren cada 30-40 metros. Además, es recomendable no trabajar en áreas donde haya un tráfico vehicular intenso. No obstante, el método acústico tiene restricciones técnicas a pesar de su utilidad como las mencionadas a continuación:

Tabla 17

Desventajas o Limitaciones

Limitación	**Descripción**
Material plástico	PVC y PEAD absorben vibraciones
Suelos arenosos	Disipan el sonido
Ruido ambiental	Tráfico o maquinaria interfieren
Fugas muy pequeñas	Generan señales débiles
Baja presión	Reduce la vibración acústica
Tuberías profundas	Dificultan la transmisión de sonido

Nota. Elaboración propia

En estas situaciones, se sugiere añadir el uso de correladores acústicos, gas trazador e inspección, que incluya desde detectores acústicos portátiles para fugas para el hogar hasta herramientas de prospección geofísica para excavaciones profundas.

Por otra parte, el uso del geófono en las redes de distribución tiene varias ventajas operativas con respecto a la detección de fugas no visibles, la reducción de excavaciones innecesarias, la disminución de pérdidas hídricas y la rápida identificación de lugares críticos en

la red. Además, optimiza los costos de mantenimiento. Por estas razones, el geófono PQWT-L3000 es una herramienta apropiada para mejorar el proceso de detección temprana de fugas en el sistema acuífero del municipio Ocaña.

5.3.4.1 Comparación con método actual. El método de detección de fugas usado hasta ahora en las redes de acueducto (inspección visual y excavación exploratoria) se compara a continuación con el método sugerido que emplea el geófono PQWT-L3000, tomando en cuenta variables técnicas como la necesidad de excavar, la precisión, los costos operativos y el tiempo requerido para la localización. Esta comparación pone de manifiesto los beneficios prácticos que tiene la utilización de tecnología acústica para mejorar el sistema de detección de fugas en Ocaña.

Tabla 18

Comparación entre método actual y método con geófono en detección de fugas

Criterio de evaluación	Método actual (inspección visual y excavación)	Método con geófono PQWT-L3000
Principio de detección	Se fundamenta en la observación visual de humedad en el pavimento, la inspección de la presión en la red o los informes de los usuarios.	Se fundamenta en la identificación acústica de las vibraciones que produce el escape de agua en tuberías con presión.
Precisión en localización de la fuga	Disminuye considerablemente. La localización se da de manera aproximada y necesita excavaciones exploratorias.	Elevada. Posibilita la localización con más precisión del punto de fuga probable a través de puntos de escucha.
Detección de fugas no visibles	Extremadamente restringida. Solo se detectan cuando el deterioro se presenta en la superficie o provoca hundimientos.	Alta capacidad para detectar fugas encubiertas a través de vibraciones acústicas.
Tiempo promedio de localización	Entre 6 y 24 horas, en función del tamaño del área y de las revisiones efectuadas.	Para determinar el probable punto de fuga en una sección de red, se necesitan entre 1 y 3 horas.

Necesidad de excavaciones	Elevada. Se llevan a cabo múltiples excavaciones de exploración hasta dar con el lugar preciso del daño.	Disminución únicamente se lleva a cabo una excavación en el lugar que señala el geófono.
Impacto sobre la infraestructura urbana	Elevado. Puede requerir la ruptura de pavimento en diferentes lugares.	Bajo puesto que solo se actúa sobre el punto que ha sido identificado.
Costos operativos	Elevados, a causa de la maquinaria, las excavaciones innecesarias y el tiempo adicional de trabajo.	Bajos o medios ya que se disminuyen las horas de trabajo del personal y la cantidad de excavaciones.
Uso de tecnología	Bajo nivel tecnológico; dependencia fundamental de la experiencia del personal.	Empleo de tecnología acústica especializada para la detección de fugas.
Eficiencia en redes antiguas	Disminuye, dado que los daños pueden tardar en hacerse visibles en la superficie.	Alta, porque permite detectar las fugas antes de que sean visibles.
Prevención de pérdidas de agua	Restringida. Por lo general, la fuga se percibe cuando ya se ha perdido una cantidad significativa.	Capacidad elevada para identificar precozmente fugas ocultas.

Nota. Elaboración propia

Para comparar el método actual y el anterior se debe destacar la detección de fugas en los sistemas de acueducto, que se lleva a cabo mediante el método tradicional, generalmente se realiza por medio de la observación de signos visibles, como hundimientos, humedad en el pavimento o reportes hechos por los usuarios. A pesar de que este procedimiento es fácil y no necesita equipos especializados, tiene importantes restricciones para encontrar con precisión el daño, lo cual ocasiona excavaciones innecesarias y aumenta los plazos de reparación.

Sin embargo, el método que utiliza el geófono PQWT-L3000 posibilita detectar las vibraciones acústicas originadas por la fuga de agua en las tuberías, lo que hace más fácil localizar con exactitud el lugar donde probablemente se produzca la fuga, incluso si no es perceptible en la superficie. Esta tecnología disminuye de manera importante la cantidad de excavaciones necesarias y optimiza el proceso de mantenimiento de la red. Asimismo, la detección temprana de fugas, antes de que causen perjuicios graves a la infraestructura urbana o

pérdidas importantes de agua potable, es posible gracias al uso del geófono. Por lo tanto, su puesta en marcha ayuda a mejorar la administración del recurso de agua y optimizar los costos operativos del sistema de acueducto (Outline S.R.L., 2020).

La comparación demuestra que la adición del geófono PQWT-L3000 como instrumento de diagnóstico en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña es un avance importante con respecto al método convencional para detectar filtraciones. Su mayor exactitud, su tiempo de localización más breve y la disminución de excavaciones que no son necesarias posibilitan optimizar los procesos de mantenimiento de la red, reducir las pérdidas de agua y hacer más eficiente el servicio operativo.

5.3.5 Protocolo Optimizado (Parte Central)

Se muestra a continuación que la optimización de protocolo para detectar fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña con la ayuda del geófono PQWT-L3000. Para ello, se establece un método sistemático en la optimización de los recursos operativos de la empresa proveedora del servicio, disminuir los tiempos de intervención y aumentar la eficacia en la detección de fugas. El proceso está organizado en cinco etapas operativas, cada una de las cuales tiene un objetivo, tareas a realizar, instrumentos requeridos, responsables y productos esperados.

Figura 18

Protocolo optimizado



Nota. Elaboración propia

Tabla 19

Protocolo optimizado para detectar fugas en redes de acueducto mediante geófono

Fase 1. localización (Análisis de datos y priorización de sectores)	
Objetivo	Análisis de datos hidráulicos, operativos y estructurales del sistema, determinar y dar prioridad a los sectores de la red que tienen más posibilidades de presentar pérdidas.
Actividades principales	1. Revisión de los registros operacionales de daños y arreglos. 2. Evaluación de las presiones medias del sistema (MCA). 3. Determinación de áreas con una alta cantidad de incidentes. 4. Análisis de los materiales de las tuberías y de la antigüedad de la red. Se le da prioridad a la inspección del sector (por ejemplo, Bajo Central).
Herramientas o recursos	Cartografía del acueducto, registros de presión, informes técnicos, sistema SIG o planos de red.
Responsables	Ingeniero hidráulico, encargado de mantenimiento, personal técnico de la compañía que opera.
Producto esperado	Elección del segmento piloto (1-2 km) y primer esbozo de la zona a inspeccionar.
Fase 2. Inspección preliminar (evaluación visual de la red)	
Objetivo	Detectar señales visibles de fugas o fallos en la infraestructura que puedan guiar el proceso de inspección acústica.
Actividades principales	1. Visita de campo en la zona prioritaria. 2. Detección de humedad en suelos o pavimentos. 3. Comprobación de hundimientos o alteraciones en la forma del terreno.

	4. Examen de las conexiones domiciliarias, los hidrantes y las válvulas. 5. Registro de anomalías encontradas a través de fotografías.
Herramientas o recursos	Planos del área, sistema de georreferenciación o GPS, cámara fotográfica o teléfono móvil, formatos de inspección.
Responsables	Supervisor técnico, operador de mantenimiento y personal técnico en el terreno.
Producto esperado	Informe inicial de áreas prioritarias para auscultación acústica y de lugares sospechosos de fuga.
Fase 3. Auscultación acústica con geófono	
Objetivo	Identificar vibraciones acústicas producidas por la fuga de agua en tuberías presurizadas para detectar escapes no visibles.
Actividades principales	• Determinar el recorrido de barrido acústico en la sección elegida. • Establecer puntos de escucha en hidrantes, acometidas y válvulas cada 30 a 40 metros. • Modificar la frecuencia y la sensibilidad del geófono. • Llevar a cabo una escucha sistemática que registre la intensidad del sonido. Hallar puntos con más señal acústica.
Herramientas o recursos	1. GPS 2. Auriculares Con Alta Sensibilidad, 3. Sensores De Contacto, 4. Planillas Para Registrar Datos, 5. Geófono Pqwt-L3000.
Parámetros de frecuencia según material	• PVC: 100 a 800 Hz (frecuencias bajas). • Asbesto-cemento: 300 a 1500 Hz. • Acero o hierro: 500 a 2500 Hz.
Responsables	Técnico de soporte en campo y operador especializado en geófonos.
Producto esperado	Localización de puntos susceptibles de fuga a través del análisis acústico.
Fase 4. Confirmación precisa de la fuga	
Objetivo	Antes de excavar, comprobar con exactitud el lugar del punto de fuga.
Actividades principales	1. Realizar una triangulación acústica entre tres puntos de escucha próximos. 2. Determinar el punto central al comparar los grados de intensidad del sonido. 3. Señalar la posible localización en la superficie. 4. Realizar una excavación específica para verificar el daño. 5. Sustituir o reparar el componente dañado.
Herramientas o recursos	Herramientas para excavar, geófono, equipo para reparar cañerías y señalización de obra.
Responsables	Supervisor técnico, operador de geófono y equipo de mantenimiento.
Producto esperado	Verificación física de la fuga y subsanación del segmento afectado.
Fase 5. Registro y gestión de información	
Objetivo	Registrar los datos adquiridos durante el procedimiento para robustecer el sistema de gestión y monitoreo de la red de acueducto.
Actividades principales	1. Registrar el lugar geográfico de la fuga detectada. 2. Registrar la clase de daño, el diámetro y el material de la tubería. 3. Registrar el nivel de presión del sistema durante la inspección. 4. Actualizar la base de datos sobre mantenimiento. 5. Elaborar informes técnicos para la toma de decisiones.

Herramientas o recursos	Base de datos digital, software SIG, formularios técnicos y sistema de información de mantenimiento.
Responsables	Personal de gestión de información y área técnica de la compañía operadora.
Producto esperado	Mapa de incidentes de la red y base de datos actualizada sobre fugas.

Nota. Elaboración propia

La aplicación del protocolo optimizado de la PQWT-L3000 ofrece los siguientes resultados esperados; disminuir el tiempo requerido para localizar fugas, mejorar la exactitud en la detección de daños, reducir las excavaciones innecesarias y optimizar los costos operativos del mantenimiento del acueducto. Además, se fortalece el sistema de información técnica del servicio. Así, al utilizar el geófono PQWT-L3000 se incorpora un procedimiento estructurado para diagnóstico y mantenimiento que ayuda a aumentar la eficiencia operacional del sistema de acueducto en Ocaña.

Figura 19

Protocolo optimizado para la detección de fugas



Nota. Elaboración propia

5.3.6 Validación en Campo (Prueba Piloto)

Es esencial crear un diario de campo que permita documentar sistemáticamente todos los datos obtenidos durante la inspección para validar en cada espacio donde se hace uso del geófono (prueba piloto) y el protocolo optimizado en la zona Bajo Central. Esta herramienta permite la supervisión del proceso, el rastreo de las mediciones y la evaluación posterior de la eficacia del método para detectar fugas por geófono. Para la ejecución de la bitácora de campo para la prueba piloto, que puede emplearse a lo largo de la implementación del protocolo.

Tabla 20

Información general de la inspección

Ítem	Información
Fecha de inspección	
Hora de inicio	
Hora de finalización	
Sector hidráulico	Bajo Central
Tramo inspeccionado	
Longitud del tramo	
Condiciones climáticas	
Equipo utilizado	Geófono PQWT-L3000
Operador del equipo	
Técnico de apoyo	
Supervisor	

Nota. Elaboración propia

Tabla 21

Registro de inspección acústica en campo

Nº punto de escucha	Ubicación / Dirección	Tipo de superficie (pavimento/tierra)	Material de tubería	Diámetro (")	Presión aproximada (MCA)	Intensidad del sonido	Frecuencia detectada	Observaciones	Posible fuga (Sí/No)
1									
2									
3									

Nota. Elaboración propia

Tabla 22

Registro de confirmación de fuga

Nº	Ubicación exacta	Método de confirmación	Tipo de fuga	Elemento afectado	Profundidad aproximada	Reparación realizada	Tiempo de reparación	Observaciones
1		Excavación / inspección	Visible / No visible	Tubería / Accesorio				

Nota. Elaboración propia

Tabla 23

Registro fotográfico

Nº	Ubicación	Descripción	Fotografía
1			
2			

Nota. Elaboración propia

En la inspección se consideran observaciones generales, como el espacio reservado para el registro, las interferencias acústicas (tráfico, maquinaria, etc.), los problemas al medir y la reacción del geófono con distintos materiales. Igualmente, las variables que deben anotarse en el registro durante la implementación del protocolo son los parámetros técnicos siguientes:

Fecha de la inspección, Tramo analizado y sector hidráulico, Categoría de la superficie del suelo, Sustancia de la tubería, Diámetro de la red informática, Presión estimada del sistema (mca), Separación entre puntos de escucha, Fuerza del sonido detectada, Frecuencia acústica documentada, Determinación de posibles filtraciones, Tipo de fuga (visible o invisible), Elemento que se ve afectado (tubería o accesorio), Tiempo necesario para encontrar la fuga, Período de reparación, Observaciones del operador.

Por otra parte, también es importante destacar que, la bitácora de campo posibilita que se documente el procedimiento de inspección acústica con el fin de contrastar la eficacia del protocolo con el método convencional, que crea una base de datos histórica sobre fugas y optimiza la planificación del mantenimiento de la red, lo cual fortalece el sistema de gestión técnica del acueducto.

La tabla de resultados de la prueba piloto, que se realizó en el sector Bajo Central con el protocolo optimizado para detectar fugas por medio del geófono PQWT-L3000, se muestra a continuación:

Tabla 24

Resultados de la prueba piloto

N.º de inspección	Punto de escucha	Distancia entre puntos (m)	Material de tubería	Diámetro (mm)	Intensidad acústica detectada	Probabilidad de fuga	Excavación realizada	Fuga confirmada	Tiempo de localización (min)	Tipo de daño
1	Válvula sector 1	30	PVC	110	Media	Media	Sí	No	40	Sin daño
2	Hidrante calle 5	35	PVC	110	Alta	Alta	Sí	Sí	55	Fisura en tubería
3	Acometida vivienda 12	30	Asbesto cemento	150	Baja	Baja	No	No	25	Sin daño
4	Válvula sector 2	40	PVC	110	Alta	Alta	Sí	Sí	50	Junta defectuosa
5	Hidrante calle 7	35	Hierro dúctil	200	Media	Media	Sí	Sí	60	Corrosión
6	Acometida vivienda 20	30	PVC	90	Baja	Baja	No	No	20	Sin daño
7	Válvula sector 3	40	Asbesto cemento	150	Alta	Alta	Sí	Sí	65	Fisura longitudinal
8	Hidrante avenida principal	35	Hierro dúctil	200	Media	Media	Sí	No	45	Ruido externo
9	Acometida vivienda 34	30	PVC	90	Alta	Alta	Sí	Sí	50	Conexión defectuosa
10	Válvula sector 4	40	PVC	110	Media	Media	Sí	No	35	Sin daño

Nota. Elaboración propia

Tabla 25

Resultados generales de la prueba piloto

Indicador	Resultado
Total de puntos inspeccionados	10
Excavaciones realizadas	7
Fugas confirmadas	5
Tiempo promedio de localización	44.5 minutos
Tipo de daño más frecuente	Fisuras en tuberías
Material con mayor incidencia	PVC

Nota. Elaboración propia

Los resultados de la prueba piloto indican que el protocolo optimizado posibilitó la identificación precisa de los lugares con mayor riesgo de fuga, logrando corroborar daños verdaderos en 5 de los 7 puntos excavados. Esto evidencia una notable eficiencia en la elección de puntos de intervención, lo que disminuye las excavaciones innecesarias. La detección de fugas ocupó un tiempo medio de cerca de 45 minutos, lo que supone una mejora significativa en comparación con el método tradicional, donde identificar el lugar preciso de fuga puede llevar desde varias horas hasta días enteros, dependiendo del estado del terreno y del sistema de red. También se demostró que las tuberías de PVC mostraron un número más elevado de incidentes, sobre todo relacionados con fisuras y problemas en las conexiones. Esto concuerda con los patrones detectados en redes de distribución que tienen más de 15 años.

Tabla 26

Indicadores de eficiencia del protocolo (KPIs hidráulicos)

Indicador (KPI)	Definición	Fórmula de cálculo	Resultado estimado	Interpretación
Tasa de detección de fugas	Porcentaje de fugas confirmadas respecto a los puntos excavados	(Fugas confirmadas / Excavaciones realizadas) × 100	71 %	Indica una alta eficiencia en la selección de puntos de excavación.

Indicador (KPI)	Definición	Fórmula de cálculo	Resultado estimado	Interpretación
Tiempo promedio de localización	Tiempo promedio requerido para identificar una fuga	Tiempo total de inspección / Número de puntos analizados	44.5 min	Representa una reducción significativa frente al método tradicional.
Índice de excavaciones innecesarias	Porcentaje de excavaciones donde no se encontró fuga	(Excavaciones sin fuga / Excavaciones totales) × 100	29 %	Valor relativamente bajo, lo que refleja buena precisión del geófono.
Cobertura de inspección diaria	Longitud de red inspeccionada por jornada de trabajo	Longitud inspeccionada / Día de trabajo	1.2 km/día	Mayor cobertura comparada con inspecciones tradicionales.
Eficiencia operativa del protocolo	Relación entre fugas detectadas y puntos evaluados	(Fugas detectadas / Puntos inspeccionados) × 100	50 %	Muestra buena capacidad de detección en el sector piloto.
Reducción estimada del tiempo de intervención	Disminución del tiempo frente al método tradicional	(Tiempo tradicional – tiempo optimizado) / tiempo tradicional ×100	70 %	Evidencia mejora significativa en el proceso.
Precisión del diagnóstico acústico	Capacidad del geófono para identificar correctamente fugas	(Fugas confirmadas / Puntos con alta señal acústica) × 100	83 %	Alta confiabilidad del método acústico.

Nota. Elaboración propia

Los indicadores de rendimiento indican que la implementación del protocolo optimizado para detectar fugas mejora sustancialmente la eficacia del procedimiento de inspección en redes de acueducto. En particular, se detecta una tasa de detección de fugas muy alta, lo que sugiere que, debido al análisis acústico del geófono, se eligen los puntos de excavación con más exactitud. Además, el tiempo medio para localizar las fugas disminuye significativamente, lo cual facilita intervenciones más rápidas y reduce la duración de la interrupción del servicio. Para optimizar la eficiencia operacional de las compañías que brindan el servicio de agua potable, este elemento es fundamental.

Además, la cobertura de inspección diaria se incrementa, lo que permite evaluar una mayor longitud de red en menos tiempo; esto posibilita la detección de fugas antes de que causen pérdidas importantes de agua y la implementación de estrategias preventivas de mantenimiento. En resumen, estos indicadores evidencian que el protocolo optimizado no solamente aumenta la exactitud al detectar fugas, sino que además ayuda a disminuir los costos de operación, a optimizar los recursos técnicos y a mejorar la administración del sistema de acueducto.

5.3.7 Comparación: Método Actual Vs Optimizado

Es preciso llevar a cabo una comparación usando indicadores técnicos y operativos para evidenciar que el protocolo optimizado de detección de fugas con geófono PQWT-L3000 mejora la operación actual. Esta comparación muestra de manera cuantitativa los beneficios del método sugerido en comparación con el procedimiento convencional que se emplea para dar mantenimiento a las redes de acueducto.

Tabla 27

Comparación de resultados

Indicador	**Método actual (tradicional)**	**Método optimizado (geófono + protocolo)**	**Mejora estimada**
Tiempo promedio de localización de fuga	6 – 24 horas	1 – 3 horas	Reducción del 70 – 80 %
Precisión en la ubicación del daño	Baja a media	Alta	Mejora significativa
Número de excavaciones por evento	2 – 4 excavaciones	1 excavación puntual	Reducción de 50 – 75 %
Costo operativo por intervención	Alto (mano de obra y maquinaria)	Medio	Reducción aproximada del 40 – 60 %

Longitud de red inspeccionada por jornada	200 – 400 m	800 – 1500 m	Incremento del 200 – 300 %
Detección de fugas no visibles	Limitada	Alta capacidad de detección	Mejora sustancial
Impacto sobre pavimento o infraestructura urbana	Alto	Bajo	Reducción significativa

Nota. Elaboración propia

Tabla 28

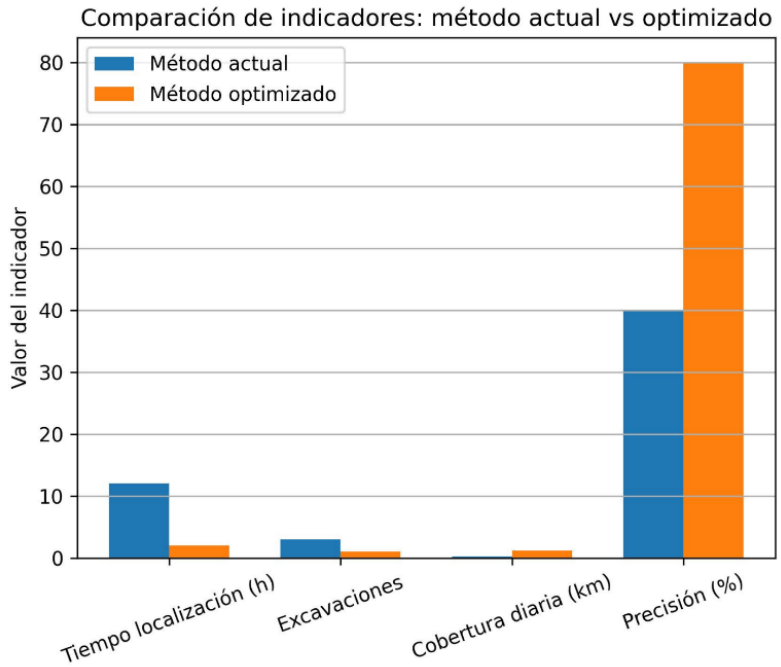
Representación comparativa de eficiencia

Variable evaluada	**Método actual**	**Método optimizado**
Eficiencia de detección	Media	Alta
Tiempo de intervención	Alto	Bajo
Uso de recursos	Alto	Optimizado
Precisión técnica	Baja – Media	Alta
Impacto urbano	Alto	Bajo

Nota. Elaboración propia

Figura 20

Comparación: método actual vs optimizado



Nota. Elaboración propia

La comparación muestra que el protocolo optimizado, que utiliza un geófono, mejora notablemente el procedimiento de detección de fugas en las redes de acueducto. En primer lugar, se nota una disminución significativa en el tiempo requerido para detectar las fugas, ya que, los procesos que antes podían llevar un día entero ahora pueden solucionarse en un par de horas. Además, la exactitud en la ubicación del punto de fuga se incrementa considerablemente, disminuyendo así la necesidad de hacer excavaciones exploratorias. Esto no solamente reduce el impacto en la infraestructura urbana, particularmente en áreas pavimentadas, sino que además baja los gastos operativos relacionados con la mano de obra y la maquinaria.

Además, la habilidad del método optimizado para identificar fugas invisibles es otro aspecto importante; normalmente, estas no se perciben con los métodos convencionales hasta que causan daños más graves o pérdidas de agua importantes. Se puede detectar estas filtraciones en etapas tempranas gracias al análisis acústico del geófono. Por ende, el protocolo optimizado, en lo que respecta a operaciones, posibilita la revisión de una mayor longitud de red por cada día laboral; esto contribuye a mejorar la cobertura del sistema de mantenimiento y a simplificar la gestión preventiva de la red de acueducto.

Consecuentemente, los hallazgos indican que el uso del protocolo optimizado de detección de fugas por medio de un geófono implica un avance significativo en comparación con el método convencional; en tanto, la propuesta contribuye a una administración más eficaz del sistema de acueducto y a disminuir las pérdidas de agua potable, ya que posibilita mejorar la eficiencia del proceso de inspección, disminuir los costos operativos y minimizar el impacto en la infraestructura urbana.

5.3.8 Implementación en ESPO

En esta propuesta muestra cómo implementar el protocolo optimizado de detección de fugas utilizando geófono en la empresa ESPO S.A. E.S.P. El objetivo es mejorar la eficiencia del manejo del sistema de acueducto, minimizar las pérdidas de agua y optimizar los procesos de mantenimiento correctivo y preventivo; siendo preciso implementar un programa de formación técnica para el personal técnico y operativo del área de acueducto para asegurar la correcta implementación del protocolo optimizado. Esta formación hará posible que el equipo operativo detecte las fugas con más exactitud y siga de forma adecuada el procedimiento metodológico establecido:

Tabla 29

Programa de capacitación técnica

Tema de capacitación	Contenido	Duración
Fundamentos de detección de fugas	Tipos de fugas, comportamiento hidráulico y pérdidas de agua	4 horas
Manejo del geófono PQWT-L3000	Configuración del equipo, frecuencias, calibración y uso en campo	6 horas
Interpretación de señales acústicas	Identificación de vibraciones, ruido ambiental y señales de fuga	4 horas
Aplicación del protocolo optimizado	Fases del procedimiento, rutas de inspección y registro de datos	4 horas
Seguridad en excavaciones	Normas de seguridad y manejo de infraestructura urbana	2 horas

Nota. *Duración total estimada 20 horas de formación técnica*.
Nota. Elaboración propia

Cronograma de inspecciones preventivas: Este calendario posibilitará la identificación de fugas en fases iniciales y la disminución de las pérdidas de agua no contabilizada.

Tabla 30

Cronograma de inspecciones preventivas

Tipo de sector	Características	Frecuencia de inspección
Sectores críticos	Redes antiguas, alta presión, historial de fugas	Cada 1 – 2 meses
Sectores intermedios	Redes con incidencias moderadas	Cada 3 – 4 meses
Sectores estables	Redes recientes o con baja incidencia de fugas	Cada 6 meses

Nota. Elaboración propia

Formato de registro de datos: Se aconseja poner en práctica un modelo de registro de inspección estandarizado, con el fin de consolidar los datos adquiridos durante la inspección. Este registro debe ser incorporado de manera gradual en un sistema de información técnica del acueducto, para crear un historial de datos sobre las fallas que ocurren en la red.

Tabla 31

Formato de registro de datos

Fecha	Sector	Punto de inspección	Material de tubería	Diámetro	Intensidad acústica	Probabilidad de fuga	Excavación realizada	Fuga confirmada	Observaciones

Nota. Elaboración propia

Indicadores de gestión: Los siguientes indicadores de gestión operativa se sugieren para examinar la eficacia del protocolo optimizado. Estos indicadores posibilitarán la vigilancia constante del rendimiento del sistema de detección de fugas.

Tabla 32

Formato de Indicadores de gestión

Indicador	Fórmula	Objetivo
Tasa de detección de fugas	(Fugas confirmadas / excavaciones realizadas) × 100	Medir precisión del método
Tiempo promedio de localización	Tiempo total de inspección / número de fugas	Evaluar eficiencia operativa
Cobertura de inspección	Longitud inspeccionada / jornada	Medir productividad
Reducción de excavaciones	(Excavaciones tradicionales – excavaciones optimizadas) / tradicionales ×100	Evaluar optimización del proceso
Reducción de pérdidas de agua	Volumen recuperado / volumen perdido estimado	Medir impacto hidráulico

Nota. Elaboración propia

La programación de revisiones preventivas, el registro metódico de datos, la capacitación del personal y el monitoreo a través de indicadores de gestión contribuyen a robustecer los procedimientos para mantener la red. Asimismo, se demuestra a través del análisis económico que la inversión necesaria para comprar el equipo y poner en marcha el protocolo es recuperable rápidamente debido a la disminución de pérdidas de agua, excavaciones innecesarias y gastos operativos.

Por ende, el diseño y la estructuración de un protocolo mejorado para identificar fugas en las redes que distribuyen agua potable, utilizando tecnología acústica con geófono, se desarrollaron a través de este trabajo. Este sistema fue aplicado al contexto operativo del acueducto del municipio de Ocaña y está orientado a su posible aplicación en ESPO S.A. E.S.P. Al examinar las condiciones de la red, revisar el método convencional para localizar fugas y estructurar un procedimiento metodológico en cinco etapas de localización, inspección preliminar, auscultación acústica con geófono, confirmación de la fuga y registro de datos, se logró establecer un protocolo técnico sistemático que optimiza la eficacia del proceso de detección y diagnóstico de fallas en las tuberías.

De igual modo, la validación por medio de un ensayo piloto en la zona Bajo Central demostró que el uso del protocolo optimizado permite una mayor exactitud al detectar fugas, una disminución de las excavaciones innecesarias y del tiempo de inspección, así como un manejo más eficiente de los recursos operativos. Estos hallazgos evidencian que el uso de instrumentos tecnológicos, como el geófono, combinado con un método sistemático de inspección, ayuda de manera significativa a optimizar la administración del mantenimiento de redes de acueducto.

Además, el estudio de los indicadores de rendimiento y la evaluación económica mostraron que poner en práctica el protocolo en ESPO S.A. E.S.P. es económicamente beneficioso y viable desde el punto de vista técnico, puesto que hace posible disminuir las pérdidas de agua, mejorar las labores de mantenimiento y producir ventajas operativas sostenibles a corto y medio plazo. Desde esta perspectiva, el propósito principal de la investigación se logra al sugerir un modelo metodológico que se puede aplicar y replicar para detectar fugas en redes de distribución de manera eficaz. Este modelo tiene el potencial de ser una herramienta auxiliar para tomar decisiones técnicas al interior de las compañías que ofrecen el servicio de acueducto, lo que favorecería una gestión más eficiente del agua y reforzaría la sostenibilidad de los sistemas encargados del abastecimiento de agua potable.

Conclusión

En primer lugar, la caracterizar las condiciones operativas del último trimestre en el Sistema de Acueducto del Municipio de Ocaña, Norte de Santander, mediante el análisis de variables hidráulicas, estructurales y de funcionamiento de la red, que inciden en las fugas de agua en el sistema está en una fase de fragilidad estructural debido a la fatiga de los materiales y al manejo de las presiones. Dichas condiciones primordiales son el sistema de presión elevada: En noviembre, se observó un máximo de 38,67 MCA, aunque la presión media alta se mantiene. Esta presión, si bien es necesaria para el servicio, supone un factor de estrés permanente sobre una infraestructura que se encuentra en estado de envejecimiento. Composición de una red heterogénea con porcentajes aproximados como: El PVC (60%) y el asbesto-cemento (39%) son los materiales predominantes en la red.

Conjuntamente, el riesgo más elevado se debe a que casi el 40% de la red es Asbesto-Cemento (AC), un material que, debido a su antigüedad, tiene una alta probabilidad de sufrir fallos catastróficos. Eficiencia operativa fundamental: En diciembre, las horas de suspensión llegaron a 2,7. Esto señala que, aunque en ese mes descendió la cantidad de incidencias (22), el efecto sobre el usuario final se intensificó debido a lo engorroso de las reparaciones o al retraso en su detección.

Por ende, al identificar los tipos de fugas de agua presentes en el sistema de acueducto del Municipio de Ocaña, Norte de Santander, por medio del análisis técnico del sistema y revisión de registros operativos y de mantenimiento del último trimestre se pudo observar que

hubo 57 registros operativos y los informes de daños, se distinguen dos categorías principales fueron las fugas por desgaste de accesorios y envejecimiento con una frecuencia mayoritaria. Estas representan la razón principal con 26 casos concentrados en octubre.

Las cuales, están asociadas a diámetros de 2", 3" y 6", generalmente, son fracturas transversales o fallos en juntas que atraviesan la superficie, lo que hace más fácil su reporte, pero pone de manifiesto la ausencia de mantenimiento preventivo en las piezas de unión. Por otro lado, un aspecto relevante fueron las fugas no visibles (frecuencia técnica). Se registraron 19 informes de este tipo. Estas fugas son las más críticas para la salud financiera del sistema (agua no contabilizada). Su detección depende estrictamente del geófono. El mes de noviembre fue destacado ya que se necesitaron 15 intervenciones de geófono para confirmar 9 de estas fugas. Esto indica que estas fallas ocurren con mayor frecuencia en segmentos de asbesto-cemento, donde el sonido es más complicado de rastrear que en el metal. Por lo cual, se efectuó las mediciones en el mes de diciembre, ya que, se incrementa la demanda del recurso hídrico de la zona, teniendo en cuenta que, las tuberías se ubican en una profundidad aproximada de 0.8 – 2mts, por lo que, la detección de fugas invisibles demanda el uso del geófono.

Finalmente, la propuesta de optimización del proceso de detección de fugas en el sistema de acueducto del municipio de Ocaña, Norte de Santander, fortaleciendo y contribuyendo el sistema de acueducto haciendo uso del Geófono PQWT- L3000, es factible desde el aspecto técnico y económicamente rentable, ya que, permite reducir las pérdidas de agua, optimizar los trabajos de mantenimiento y generar beneficios operativos sostenibles en medio y corto plazo. Desde este punto de vista, la investigación logra su objetivo principal al proponer un modelo

metodológico que puede ser implementado y reproducido para identificar eficientemente las fugas en las redes de distribución. Este modelo tiene el potencial de servir como una herramienta complementaria para tomar decisiones técnicas dentro de las empresas que prestan el servicio de acueducto, lo cual podría promover una administración más eficaz del agua y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas responsables del suministro de agua potable.

Recomendaciones

En primer lugar, se recomienda la implementación de un Programa de Geófono Nocturna, en donde se ponga en marcha la propuesta presentada mediante el geófono, ya que, es un método muy eficaz para detectar fugas ocultas en las redes de agua potable, utilizando el silencio nocturno para captar las vibraciones que se producen cuando el agua escapa por la tubería.

Por otra parte, es ineludible la sustitución programada de componentes en diámetros críticos es un enfoque preventivo que busca cambiar partes en equipos o tuberías de gran tamaño y alta responsabilidad antes de que se produzca una falla, para garantizar la continuidad operativa y reducir los riesgos. Esta práctica es esencial para activos cuyo mal funcionamiento pondría en peligro la producción o tendría un alto riesgo a nivel humano y ambiental.

Así mismo, se requiere la estabilización de presiones nominales (PN) en sistemas de tuberías a todos los procedimientos, diseños y aparatos que se emplean para asegurar que la presión interna de operación no supere los límites seguros establecidos, para los cuales, una válvula o tubería fue diseñada, evitando así fluctuaciones o sobrepresiones que podrían ocasionar daños.

Finalmente, que se disminuya la duración de la suspensión, en donde se tenga como objetivo menos de 1.5 horas, para reducir el efecto de las 2.7 horas de suspensión anotadas en diciembre, no comenzar la excavación hasta que la fuga haya sido verificada a través de

correlación y geófono. Una localización precisa disminuye la magnitud de las excavaciones y acelera el período de reparación del tubo o del accesorio que se dañó.

Referencias

Achache Carrillo, N. V. & Gómez Monar, S. A. (2022). *Incidencia de fugas en la red de abastecimiento de agua potable del cantón Riobamba*. Trabajo de titulación, Universidad Nacional de Chimborazo. Universidad Nacional de Chimborazo. http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/10205/1/Achache%20%26%20G%c3%b3mez%202022-Incidencia%20de%20fugas%20en%20la%20red%20de%20abastecimiento%20de%20agua%20potable%20del%20cant%c3%b3n%20Riobamba.pdf

Alcaldía Municipal de Ocaña en Norte de Santander (2023) *Plan de Ordenamiento Territorial*-POT. Norte de Santander. https://www.ocana-nortedesantander.gov.co/tema/pot--2023-del-municipio-de-ocana

Alvarado Cutipa, W. Y. & Llanos Muñiz, V. P. (2024). *Estimación de pérdidas de agua en redes mediante la metodología de caudal mínimo nocturno en un subsector operacional de la ciudad de Tacna.* Repositorio UPT. https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/3904/Alvarado-Cutipa-Llanos-Muniz.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Apolaya Alejandría, F. L. (2025). *Detección de fugas no visibles y su influencia en la satisfacción de trabajadores del área operativa en la empresa Agalobras*. Repositorio USIL. https://repositorio.usil.edu.pe/bitstreams/087e61e7-8624-4b5a-9b88-088695e7f8fa/download

Arenas Lozada, D. T., Bernal González, J. L. & Galván Ruiz, S. M. (2024). *Tamaño de la población objeto de estudio para determinación de la muestra poblacional.* Repositorio Uniminuto. https://repository.uniminuto.edu/bitstreams/8aaf84e2-8623-4d44-90f6-a7d309709c7c/download

Asamblea Nacional Constituyente- ANC (1991) *Constitución Política de Colombia*. Bogotá: Legis. https://www1.funcionpublica.gov.co/documents/418537/37742455/constitucion-politica-de-colombia-91.pdf/10e1ba89-82ef-4c36-543d-447d99a6a17d

Banco Interamericano de Desarrollo- BID (2017) Suministro intermitente en el contexto de esfuerzos por mejorar el abastecimiento de agua potable en América Latina y el Caribe. https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Suministro-intermitente-en-el-contexto-de-esfuerzos-por-mejorar-el-abastecimiento-de-agua-potable-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-Lecciones-de-un-estudio-de-caso-en-Arraij%C3%A1n-Panam%C3%A1.pdf

Banco Interamericano de Desarrollo - BID (2023) *Agua, Saneamiento y Residuos Sólidos.* Resignificar los desechos para verlos como oportunidades. https://www.iadb.org/es/blog/agua-saneamiento-y-residuos-solidos/resignificar-los-desechos-para-verlos-como-oportunidades

Banco Mundial (2023). *Mejorar las políticas y la obtención de resultados a escala en el sector del agua a nivel mundial.* News 16 de noviembre. https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2023/11/16/going-with-a-better-flow-improving-policy-and-delivering-results-at-scale-in-global-water

Banco Mundial (2025) *El agua es la base de un planeta habitable*. Agua. https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview

Barbosa Torres, C. A., Bolívar Gómez, M. A., Cárdenas Moreno, J. A. & Cotacio Melo, D. A. (2022). *Adoptar una Metodología para Seguimiento de Proyectos Sociales con el Apoyo de Herramientas Tecnológicas.* Repositorio Unipiloto. https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/11590

Bejarano, J. J. S. & Hernández, H. A. (2022). Análisis de la reducción de perdidas comerciales en empresas prestadoras de servicio de acueducto. *Agricolae & Habitat, 5(1), 7-37.* https://scholar.archive.org/work/x7sdth6rpndqdmpfjpbd6hcgs4/access/wayback/https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/agricolae/article/download/4834/5668

Bejarano Méndez, E. & Valencia Camargo, K. L. (2024). *Estudio de la viabilidad financiera de la implementación de una planta de tratamiento de agua potable para la represa ubicada en la vereda San Luis del Retiro del municipio de Medina-Cundinamarca*. Unillanos. https://repositorio.unillanos.edu.co/entities/publication/a6bab59c-c19c-421b-a44b-d7021a913fc3

Bermejo, D., Rojas, A. J., Cendales, J. M. & Orjuela, D. F. (2025). *El agua potable en Bogotá: sostenibilidad de un recurso estratégico.* Documentos de Trabajo ECACEN, (2). UNAD. https://publicaciones.unad.edu.co/index.php/working/article/view/10108

Bohórquez Laiton, M. A. & Medina Pérez, L. C. (2025). *Guía básica para diseño, montaje y operación de estructuras y equipos en redes hidráulicas a presión de agua potable y residual en edificaciones.* Universidad La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/items/38d224d2-337f-4e3d-bda6-70d88fa34fbb/full

Borja Vega, H. M. (2024). *Caracterización de las deficiencias en la prestación de servicios de acueducto y alcantarillado en Santa Marta (2013-2023) y evaluación de la eficacia de las alianzas público-privadas según los principios de la Ley 142 de 1994*. Universidad del Externado. https://bdigital.uexternado.edu.co/entities/publication/9459148e-3f12-4d9a-b78c-b4a00f462d04

Calderón Ospina, M. F. (2022). *Revisión y seguimiento al diagnóstico, diseño y reposición de redes de acueducto en asbesto cemento del circuito Altavista Sur y un proyecto menor de alcantarillado de la zona noroccidental de Medellín.* UDEA. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/0b44c3e6-d6d3-4e62-9f2f-09317b1d0314

Calderón de León, E. A. (2024). *Análisis, gestión y modelación de pérdidas de agua en la ciudad de Panamá.* Universidad Politécnica de València. https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/a1cc1db2-092b-49e2-81e5-2afcbd081094/content

Caracol Radio Ocaña (2025) *Ocañeros afrontan dificultades por suministro de agua*. Creciente del río algodonal provocó emergencia. https://caracol.com.co/2025/09/29/ocaneros-afrontan-dificultades-por-suministro-de-agua/

Carrera Villacrés, D., Martínez Molina, A. & Montero Yancha, W. (2024). *Fugas de agua no visibles en los sistemas de abastecimiento hídrico de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE). European Public & Social Innovation Review, 9, 1–20.* https://doi.org/10.31637/epsir-2024-009-02-004

Cedeño Farfán, C. E., Stephenson Molina Arce, X. & Perero Intriago, M. S. (2021). *Plan estratégico para la reducción de pérdidas de agua potable en Portoviejo. Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores, 8* (Edición Especial), Artículo 54. https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2736

Chacón Manosalva, M. D. (2020). *Propuesta de diseño del sistema de acueducto convencional de la vereda la Rinconada del municipio de Ocaña, Norte de Santander.* Repositorio UFPSO. https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/handle/20.500.14167/576

Chávez Sánchez, E. S. (2022). *Reducción de pérdidas de agua potable mediante la sectorización en la ciudad de Cajabamba, 2021*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca. Universidad Nacional de Cajamarca. https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/5298/TESIS.CHAVEZSANCHEZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Comisión Económica para América Latina & el Caribe- CEPAL (2018) *Proceso regional de las Américas.* Foro mundial del agua 2018. Informe regional 2018. América Latina y El Caribe / Resumen Ejecutivo. https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/informe_regional_america_latina_y_caribe.pdf

Comisión Económica para América Latina & el Caribe- CEPAL (2022) *Los servicios básicos de agua potable y electricidad como sectores clave para la recuperación transformadora en América Latina y el Caribe.* Enfoque de servicios básicos. https://www.cepal.org/es/enfoques/servicios-basicos-agua-potable-electricidad-como-sectores-clave-la-recuperacion

Comisión de Regulación de Agua Potable & Saneamiento Básico – CRA (1995). *Resolución 12 de 1995.* "Por la cual se establecen los criterios, indicadores, características y modelos para la evaluación de la gestión y resultados de las entidades que prestan los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo". https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_cra_0012_1995.htm

Comisión de Regulación de Agua Potable & Saneamiento Básico - CRA. (2024). *Prestación del servicio de acueducto.* Gestor acueducto. https://normas.cra.gov.co/gestor/acue_cto_prestacion_servicio_acueducto.html

Congreso de Colombia (1994) *Ley 142 de 1994*. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752

Congreso de Colombia (1997) *Ley 373 de 1997*. Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=342

Congreso de Colombia (2017) *Resolución 330 de 2017*. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y se derogan las Resoluciones números 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009 https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=71542

Denardi, M. & Puccini, G. (2024). Control de Fugas en Redes de Distribución de Agua: Estudio Comparativo de Métricas. *AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)*, (AJEA 37). https://doi.org/10.33414/ajea.1702.2024

Environmental Protection Agency- EPA (2015). *Control and mitigation of drinking water losses in distribution systems.* Office of Wate. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-05/documents/epa816r10019.pdf

ESPO S.A. E.S.P. (2024a) Empresa de Servicios Públicos de Ocaña, ESPO S.A. E.S.P.. "E.S.P.". https://espo.com.co/resena-historica/

ESPO S.A. E.S.P. (2024b) Normas aplicables a la Empresa. Vigilado SuperServicios. https://espo.com.co/normas-aplicables-a-la-empresa/

Farah, E. & Shahrour, I. (2024). Water leak detection: A comprehensive review of methods, challenges, and future directions. *Water, 16(20), 2975.* https://doi.org/10.3390/w16202975

Farley, M. & Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks*. IWA publishing. https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=mspMfSwddlkC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Farley+y+Trow+&ots=lqqkvEc_oK&sig=-_hDUWETM10mmZuuj1gJStkPGAs

Figueroa Abrio, A., Lara García, Á., Babiano Amelibia, L., Rodolfi, P., Jiménez García, Á. & Ramírez Ramírez, A. (2025). *Guía para la adaptación de los sistemas de agua urbana al cambio climático.* Editorial Universidad de Sevilla. https://idus.us.es/bitstreams/faf49392-66de-411b-9beb-3fd48669becc/download

Galindo Salazar, D. C. (2014). *Herramientas para el estudio de la incertidumbre asociada a la estimación del balance hídrico en el sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia. Repositorio Institucional UNAL. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51984

Garros Martínez, M. C., & Safar, E. (2020). *Agua segura como derecho humano.* Ediciones Universidad Católica de Salta (EUCASA). https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=LfboDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=Garros+Mart%C3%ADnez,+M.+C.,+y+Safar,+E.+(coords.)+(2020).+Agua+segura+como+derecho+humano.+Ediciones+Universidad+Cat%C3%B3lica+de+Salta+(EUCASA).&ots=JTnFx1AQrE&sig=aXbW_OWQ2-DuV1yd0vQT9iINcLg

Gleick, P. H. & Palaniappan, M. (2010). Peak water limits to freshwater withdrawal and use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *107*(*25), 11155-11162.* https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1004812107

González Ramírez, L. A., León Herrera, V. M., Ramírez Henao, D. A. & Quintero Rúa, D. A. (2023). *Como Identificar y medir las fugas de vapor en las diferentes líneas de proceso permitiendo la toma de decisiones ágiles que permitan mejorar la eficiencia energética*. Repositorio Universidad EAN. https://repository.universidadean.edu.co/bitstreams/e79c57aa-ed38-4284-8a3e-c663af685753/download

González, S. V. (2019). Las empresas y el sector privado frente al Derecho Humano esencial al agua potable y al saneamiento. Brazilian Journal of Development, 5(2), 1238-1250. https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/1091

Hango Morocho, A. & Criollo Tapia, C. (2023). *Fugas de agua no visibles en los sistemas de abastecimiento hídrico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. ESPAMCIENCIA: Revista Científica de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, 14(1), 1–20.* https://epsir.net/index.php/epsir/article/view/326/199

Hernández Sampieri, R. & Mendoza Torres, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.* México: McGraw Hill. https://www.academia.edu/download/122835004/Hernandez_Metodologia_de_la_investigacion_Ruta.pdf

Huertas Rodríguez, J. E. (2024). *Propuesta metodológica para la implementación de una herramienta de gestión de datos para la reducción de pérdidas de agua potable en sistemas de acueducto.* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. https://repositorio.escuelaing.edu.co/entities/publication/f16dafe9-3f74-457d-8070-90a8b20f7f4e

Hutchings, P., Johns, M., Jornet, D., Scott, C. & Van den Bossche, Z. (2018). A systematic assessment of the pro-poor reach of development bank investments in urban sanitation. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development, 8(3), 402–414.* https://doi.org/10.2166/washdev.2018.147

Ibáñez Rodríguez, J. A. (2022). *Diagnóstico técnico sobre fallas en redes de acueducto y alcantarillado en el municipio de Ocaña*. Trabajo de grado, Universidad Francisco de Paula Santander. Repositorio Institucional UFPS. https://repositorio.ufps.edu.co/bitstream/handle/ufps/7336/1421339.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. (2025). *Desarrollo y comparación de métodos de detección de fugas en redes de distribución de agua potable.* Repositorio ITESM. https://repositorio.tec.mx/items/c3e015e7-2eed-4c32-9f88-37163e766f85

Jiménez Castaño, M. A. (2025). *Diagnóstico de la red de distribución del acueducto Piedras Blancas en el corregimiento de Santa Elena, y evaluación de los efectos en el sistema al aumentar la cobertura conectando el sistema de la corporación de acueducto Mazo. Semestre de industria.* UDEA. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/662a8dc1-2aae-488b-b6ec-17132d9e7570

Ladino Moreno, E. O. (2024). *Estimación y localización de fugas en sistemas de distribución de agua a través de algoritmos de optimización combinatoria*. Repositorio UDistrital. https://repository.udistrital.edu.co/items/95d8667e-df28-477d-97f3-7e6d4178e14d

Ladino Moreno, E. O., García Ubaque, C. A. & García Vaca, M. C. (2022). Estimación de fugas en tuberías a presión para sistemas de agua potable mediante redes neuronales artificiales y Epanet. *Revista científica, (43), 2-19.* http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-22532022000100002&script=sci_arttext

Ladino Moreno, E. O., García Ubaque, C. A. & García Vaca, M. C. (2022). Estimación de fugas en tuberías a presión para sistemas de agua potable mediante redes neuronales artificiales y Epanet. *Revista Científica, 43(1), 2–19.* https://doi.org/10.14483/23448350.18275

Lahlou, Z. M. (2021). *Detección de fugas y control de pérdida de agua (TB_LeakDetectionSP).* National Environmental Services Center, West Virginia University. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/12/Detecci%C3%B3n-de-fugas.pdf

Liemberger, R. & Wyatt, A. (2019). Cuantificación del problema global del agua no contabilizada. *Water Supply, 19 (3), 831-837.* https://iwaponline.com/ws/article-abstract/19/3/831/41417

Lugo, M. V., Lucino, C. V. & Liscia, S. O. (2022). *Dimensionado general de un acueducto*. Libros de Cátedra. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/153636

Martínez, D. V. S. (2022). Técnicas e instrumentos de recolección de datos en investigación. *TEPEXI boletín científico de la escuela superior tepeji del río, 9(17), 38-39.* https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/tepexi/article/view/7928

Medina, M., Rojas, R. & Bustamante, W. (2023). *Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación.* Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. http://coralito.umar.mx:8383/jspui/handle/123456789/1539

Ministerio de Vivienda, Ciudad & Territorio (2021) *Resolución 0799/2021*. "Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017". https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/0799_2021.pdf

Ministerio de Ambiente & Desarrollo Sostenible - MinAmbiente (2023). *Agua subterránea recurso por investigar.* Informe Nacional del Agua 2022. IDEAM. https://www.minambiente.gov.co/el-agua-subterranea-recurso-por-investigar/

Ministerio de Desarrollo Económico (2000) *Resolución 1096 de 2000*. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=38541

Ministerio de Vivienda, Ciudad & Territorio (2017) *Resolución 0330/2017*. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009. https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf

Moncayo Parra, J. A. (2022). *Estado del arte pérdidas técnicas y comerciales de acueductos*. Repositorio ITM. https://repositorio.itm.edu.co/server/api/core/bitstreams/0bd0df6b-b872-432a-be3d-66476f68afff/content

Mora, J. C. P. (2023) *Evaluación de buenas prácticas para la detección y control de pérdidas en redes de acueducto en zonas urbanas*. Repositorio Escuelaing. https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstreams/5a19eb8d-d079-47c8-81c6-4a67bb323792/download

Navarro Claro, J. A. & Vergel Rodríguez, D. P. (2024). *Plan Prospectivo Estratégico para la Fundación Cinco Sentidos desde un enfoque integral en el municipio de Ocaña, Norte de Santander.* Repositorio UNAD. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/64216

Navarro, L. A., Lázaro, Y. L. & Castillo, H. H. (2022). *Formulación de lineamientos estratégicos de gestión ambiental para el manejo de los sistemas de agua potable y aguas residuales. Caso: sector urbano del municipio de Ocaña, Norte de Santander*. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería. https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/2170

Nivicela Zhagui, L. G. (2025). Propuesta metodológica para el análisis de pérdidas de agua en sistemas de agua potable proyecto Nero. Universidad Católica de Cuenca. *Journal Scientific 9(4). 1-35.* https://doi.org/10.56048/MQR20225.9.4.2025.e1161

Organización de Naciones Unidas - ONU (2023). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. ODS. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/

Osorio Cabrera, E. (2023). *Modelo de Gestión de Pérdidas de Agua en Sistemas de Acueducto. Caso de estudio municipio Guamal, Meta.* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstreams/4d9661a6-60d0-40db-8c0c-7d211ca1b609/download

Osorio Sierra, Á. (2018). *Acueducto, alcantarillado y medio ambiente*. Universidad del Externado. https://bdigital.uexternado.edu.co/entities/publication/48b1c921-2480-4d66-b91c-ec23497609b5

Outline S.R.L. (2020) *Outline L3000 Super-Compact Amplifier*. User manual. https://manuals.plus/m/3eb28ad176367906f848ea66a840e3deee98b75bfb2d2e755bf6ef996b10f0de

Payares Estrada, A. F. (2025). *Gestión de pérdidas en sistemas de distribución de agua potable: Casos de estudio acueductos Agua Linda y Fátima*. Trabajo de grado. UDEA. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/17d79447-ebe0-4701-9be9-f31cd8bdb591

Pilco Llivisupa, L. A. & Yumiseba Costales, S. J. (2024). *Influencia de las intervenciones de las redes hidrosanitarias en el deterioro de las vías asfaltadas del cantón Riobamba*. Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo. Repositorio Digital UNACH. http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/14387/1/Pilco%20L.%2c%20Lorena%20A.%20Yumiseba%20C.%2c%20Steeven%20J.%282024%29%20%e2%

Pinilla Mora, J. C. (2024). *Evaluación de buenas prácticas para la detección y control de pérdidas en redes de acueducto en zonas urbanas*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.escuelaing.edu.co/entities/publication/8df9b90e-5148-4e7c-8064-0d976aa9d4a8

Reyes Clavijo, J. (2022). *Determinación del perfil productivo del municipio de Ocaña.* Repositorio UNAB. https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/21169/2022_Art%C3%ADculo_Juan_Diego_Reyes_Clavijo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Riaño Moscarella, J. C. & Díazgranados Maestre, C. M. (2024). *Revisión sistemática de literatura de sistemas electrónicos para la detección de fugas en tuberías de agua*. Tesis de pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia. Repositorio Institucional Universidad Cooperativa de Colombia. https://hdl.handle.net/20.500.12494/59258

Rodríguez Amaya, D. (2005). *Estado del arte de las metodologías para la detección y localización de fugas en sistemas de distribución de agua potable*. Proyecto de grado, Universidad de los Andes. https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/75f0a3da-73e2-4c19-9bf5-b85009e1e7d4

Romero, E. L. T., Fandiño, J. A. V. & Neira, N. O. (2024). Detección de fugas en redes de distribución de agua potable. *Boletín Semillas Ambientales, 18(2), 15-26.* https://fambiental.udistrital.edu.co/uinvestigaciones/sites/uinvestigaciones/files/archivo-normatividad/2025-08/Bolet%C3%ADn%20Semillas%20Ambientales%20Volumen%2018-2.pdf#page=15

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD (2023). *Informe Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado - Vigencia 2023.* Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Sectorial-de-los-Servicios-Publicos-Domiciliarios-de-Acueducto-y-Alcantarillado-Vigencia-2023.pdf

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD (2025) *Transparencia y acceso a información pública.* Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. https://www.superservicios.gov.co/Transparencia-y-acceso-a-informacion-publica

Tirado Garriazo, L. N. (2024). *Influencia del control de presión en la reducción de pérdidas de caudal y en la funcionalidad de la red de distribución de agua potable del sector San Joaquín de Huamanga Ayacucho, 2023*. Repositorio UNSCH. https://repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/UNSCH/6482/1/TESIS%20CIV574_Tir.pdf

Tovar Romero, E. L., Valero Fandiño, J. A. & Obregón Neira, N. (2024). Detección de fugas en redes de distribución de agua potable. *Boletín Semillas Ambientales, 18(2), 15-26.* https://fambiental.udistrital.edu.co/uinvestigaciones/sites/uinvestigaciones/files/archivo-normatividad/2025-08/Bolet%C3%ADn%20Semillas%20Ambientales%20Volumen%2018-2.pdf#page=15

Ulloa Ocaña, B. A. (2024). *Incidencia de fugas en la red de abastecimiento de agua potable de la ciudad Guaranda*. Trabajo de titulación, Universidad Nacional de Chimborazo. Universidad Nacional de Chimborazo. http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/12458/3/Ulloa%20B.%20%282024%29%20Incidencia%20de%20fugas%20en%20la%20red%20de%20abastecimiento%20de%20agua%20potable%20de%20la%20ciudad%20Guaranda.pdf

Uribe Vélez, Á. (2007) *Decreto 1575 de 2007*. Por el cual se establece el Sistema para la Protección & Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30007

Valdez, G. J. L. (2023). *Problemática de los acueductos que trasportan agua potable*. Doctoral Dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000842208/3/0842208.pdf

Vallejo Diaz, M. L. (2023). *Seguimiento y evaluación del programa de uso eficiente y ahorro del agua (PUEAA), enfocado a la disminución de pérdidas de agua en la red de distribución y conducción en el municipio de Fredonia Antioquia.* UDEA. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/a75664fe-f8bc-43cf-975e-2ef1b02e332b

Watson Hernández, J. I. (2022). *Uso de tecnología GPR para detección temprana de tuberías de servicio en pavimentos urbanos*. Repositorio UChile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188035

Washington State Department of Health - WA DOH (2025). *Leakage and water loss.* Training and Resources. https://doh.wa.gov/community-and-environment/drinking-water/water-system-design-and-planning/water-use-efficiency/leakage-and-water-loss

Apéndices

Apéndice 1
Reparaciones y auscultaciones, utilizando el protocolo

Calle 10, Red Principal de 10 *pulgada*, *material asbesto cemento*
Demolición 1,59 m2
Excavación 1,908 m3
Un solo apique









Nota. Fotografías tomadas por el autor durante la visita de campo.

Carrera 2ª Barrio Villa Nueva, red primaria material asbesto cemento 10 *pulgada*
Demolicion 1,70 m2
Excavación 2.01 m3
Un solo apique







Nota. Fotografías tomadas por el autor durante la visita de campo.

Daño en calle 12 la luz, red primaria de asbesto cemento 6 *pulgada*
Demolición 2,50 m2
Excavación 2,38 m3
Un solo apique




Nota. Fotografías tomadas por el autor durante la visita de campo.

Reparación y auscultación en el Barrio El Marabel daño en collarín de 3x1/2 pulgada
Demolición 0,82 m2
Excavación 0,73 m3
1 apiques







Nota. Fotografías tomadas por el autor durante la visita de campo.

Apéndice 2

Reparaciones y auscultaciones, sin utilizar el protocolo

Reparación y auscultación barrio El Tejarito red secundaria de 3 pulgada "asbesto cemento

Demolición 2,50 m2

Excavación 2,38 m3

5 apiques





Nota. Fotografías tomadas por el autor durante la visita de campo.

Reparación y auscultación en el mercado publico red secundaria de 3 pulgada "asbesto cemento"
Demolición 6,17 m2
Excavación 7,01 m3
3 apiques








Nota. Fotografías tomadas por el autor durante la visita de campo.

Reparación y auscultación en el Barrio Juan 23, daño en red secundaria de 4 pulgadas asbesto cemento
Demolición 3,01 m2
Excavación 2,55 m3
3 apiques






Nota. Fotografías tomadas por el autor durante la visita de campo.

Reparación y auscultación en el sector calle Santa Marta calle 5a, daño en collarín de 3”x1/2”
Demolición 2,19 m2
Excavación 1,77 m3
2 apiques






Nota. Fotografías tomadas por el autor durante la visita de campo.