

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL GEÓFONO EN LA DETECCIÓN NO DESTRUCTIVA DE FUGAS EN REDES HIDROSANITARIAS URBANAS

Autor 1 Juan Sebastián Sabogal Rodríguez¹

Tutor Diana Mylena Zambrano Velasquez²

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
juan.rodriguezsab@usantotomas.edu.co

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
diana.zambrano@usta.edu.co

Resumen

El presente trabajo evalúa el desempeño del geófono como herramienta de diagnóstico no destructivo en la detección de fugas en redes hidrosanitarias urbanas, a partir del análisis de once (11) casos reales en condiciones de campo, bajo un enfoque de patología de la construcción. La investigación se desarrolla mediante una metodología de carácter aplicado e interpretativo, en la cual se analiza el comportamiento del método en función de variables como la claridad de la señal, la precisión de localización, la presencia de interferencias, el tipo de entorno y el criterio del operador.

Los resultados evidencian que el desempeño del geófono no es uniforme, sino que depende directamente de las condiciones del entorno y de las características del sistema evaluado. En escenarios favorables, como espacios interiores y superficies rígidas, el método permite alcanzar altos niveles de precisión, mientras que en entornos exteriores o con materiales heterogéneos su efectividad disminuye debido a fenómenos de atenuación e interferencia.

La evaluación mediante una matriz semicuantitativa permitió clasificar el desempeño del método en tres niveles, evidenciando un comportamiento alto en el 18,2 % de los casos y medio en el 81,8 %, sin registrarse desempeños bajos. Estos resultados confirman que, aunque el geófono no garantiza una localización exacta en todos los escenarios, constituye una herramienta útil dentro del proceso diagnóstico, especialmente cuando se integra con otras técnicas y con la interpretación del contexto constructivo.

Se concluye que el geófono debe ser entendido como parte de un sistema de diagnóstico integral, en el cual la experiencia del operador, la información previa y la selección adecuada de métodos son determinantes para reducir la incertidumbre y optimizar la toma de decisiones en campo, en coherencia con los principios de la patología de la construcción.

Palabras clave:

Geófono; Detección acústica de fugas; Redes hidrosanitarias urbanas; Métodos no destructivos; Patología de la construcción; Diagnóstico técnico

1. Introducción

La detección de fugas en redes hidrosanitarias urbanas constituye un desafío técnico relevante dentro del mantenimiento y la gestión de infraestructuras, debido a la dificultad de localizar pérdidas de agua sin recurrir a intervenciones invasivas que puedan afectar el sistema constructivo. Estas fugas no solo generan impactos económicos asociados al consumo no controlado, sino que también pueden derivar en patologías constructivas como humedades, deterioro de acabados, afectaciones estructurales y alteraciones en las condiciones de servicio de las edificaciones.

En este contexto, el uso de técnicas de inspección no destructiva ha adquirido un papel fundamental, al permitir aproximaciones diagnósticas orientadas a minimizar la intervención sobre el sistema. Entre estas técnicas, el geófono se ha consolidado como una herramienta ampliamente utilizada en campo para la detección de fugas en redes presurizadas, debido a su versatilidad operativa y su capacidad para identificar señales acústicas asociadas al flujo de agua en condiciones de pérdida.

Sin embargo, a pesar de su uso extendido, la aplicación del geófono suele estar condicionada por la experiencia del operador y por las características del entorno, tales como el tipo de material de la tubería, la profundidad de instalación, la presencia de interferencias y las condiciones del medio circundante. Estos factores introducen niveles de incertidumbre en la interpretación de las señales y dificultan la evaluación objetiva de su desempeño.

Desde la perspectiva de la patología de la construcción, la detección de fugas no debe entenderse únicamente como un proceso de localización puntual, sino como parte de un diagnóstico integral que articula la observación de manifestaciones, el análisis del comportamiento hidráulico del sistema y la aplicación de técnicas instrumentales. En este sentido, el geófono se integra dentro de un proceso diagnóstico progresivo orientado a la reducción de la incertidumbre.

El presente trabajo tiene como propósito evaluar el desempeño del geófono en la detección no destructiva de fugas en redes hidrosanitarias urbanas, a partir del análisis de casos reales en condiciones de campo. Para ello, se plantea un enfoque de evaluación basado en la integración de criterios como la precisión de localización, la claridad de la señal, la confiabilidad operativa y el aporte diagnóstico del método.

A través de este enfoque, se busca identificar las condiciones bajo las cuales el geófono presenta un mejor desempeño, así como establecer su alcance y limitaciones dentro del diagnóstico de patologías asociadas a redes hidráulicas.

2. Planteamiento del problema

La detección de fugas en redes hidrosanitarias urbanas presenta una alta complejidad técnica, debido a la dificultad de localizar pérdidas de agua en sistemas enterrados o confinados sin recurrir a intervenciones destructivas. Esta problemática genera incertidumbre en los procesos de diagnóstico y, en muchos casos, conduce a excavaciones innecesarias, incremento en costos de reparación y afectaciones adicionales en los elementos constructivos. A nivel global, las pérdidas de agua en redes de distribución representan un desafío significativo para la gestión eficiente del recurso hídrico, con impactos tanto económicos como operativos (Liemberger & Wyatt, 2019; Puust et al., 2010).

En la práctica profesional, el geófono se ha consolidado como una de las herramientas más utilizadas para la localización de fugas en redes presurizadas, debido a su facilidad de implementación y a su capacidad para identificar señales acústicas asociadas al flujo de agua en condiciones de pérdida. Sin embargo, su desempeño se encuentra condicionado por múltiples factores, entre los que se incluyen las características del entorno, el tipo de material de la tubería, la profundidad de instalación, la presencia de interferencias y la experiencia del operador (Hunaidi & Chu, 1999; Muggleton et al., 2002).

A pesar de su uso extendido, la aplicación del geófono se basa en gran medida en criterios empíricos, lo que dificulta establecer parámetros objetivos para evaluar su efectividad en diferentes escenarios. Esta situación limita la posibilidad de estandarizar su uso y de integrarlo de manera estructurada dentro de procesos de diagnóstico técnico. En este sentido, estudios recientes destacan la necesidad de incorporar enfoques sistemáticos que permitan evaluar y comparar el desempeño de los métodos de detección de fugas en condiciones reales de operación (Wu et al., 2020; Adedeji et al., 2017).

Desde la perspectiva de la patología de la construcción, esta problemática adquiere mayor relevancia, ya que la detección de fugas no debe entenderse únicamente como un proceso de localización puntual, sino como parte de un diagnóstico integral orientado a identificar el origen de las fallas y minimizar la intervención sobre el sistema.

En este contexto, surge la necesidad de evaluar el desempeño del geófono bajo condiciones reales de campo, mediante criterios que permitan integrar variables técnicas, operativas y de interpretación, con el fin de establecer su alcance, limitaciones y aporte dentro del proceso diagnóstico.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño del geófono como herramienta de diagnóstico no destructivo en la detección de fugas en redes hidrosanitarias urbanas, a partir del análisis de casos reales en condiciones de campo, desde un enfoque de patología de la construcción.

3.2 Objetivos Específicos

- Analizar el comportamiento del geófono en diferentes condiciones de entorno, incluyendo espacios interiores y exteriores, variaciones en materiales y presencia de interferencias.
- Identificar los factores que afectan la precisión de localización, la claridad de la señal y la confiabilidad operativa del método en escenarios reales.
- Evaluar el aporte del geófono dentro del proceso diagnóstico, considerando su capacidad tanto para localizar fugas como para orientar o descartar hipótesis.
- Establecer criterios técnicos para la interpretación del desempeño del geófono, mediante el uso de una matriz semicuantitativa que permita evaluar su comportamiento en función de variables de campo y condiciones del entorno.
- Proponer lineamientos para el uso del geófono dentro de un enfoque de diagnóstico progresivo orientado a la mínima intervención, en coherencia con los principios de la patología de la construcción.

4. Marco Teórico Y Conceptual

4.1 Fugas en redes hidrosanitarias: origen, manifestación y detección

Las fugas en redes hidrosanitarias corresponden a pérdidas no controladas de agua asociadas a fallas en la integridad del sistema, originadas por deterioro de materiales, deficiencias constructivas, variaciones de presión o asentamientos del terreno. En redes presurizadas, estas fallas generan un flujo turbulento en el punto de escape, produciendo emisiones acústicas que se transmiten a través de la tubería y del medio circundante, base para su detección mediante técnicas acústicas (Hunaidi & Chu, 1999; Wu et al., 2020)

Desde el punto de vista de su manifestación, las fugas no siempre se evidencian en el punto exacto del daño, sino que pueden aparecer como humedades, acumulaciones de agua o alteraciones en el entorno superficial, generando una disociación entre la ubicación real de la falla y su expresión visible (Puust et al., 2010). Estudios recientes destacan que esta variabilidad en la manifestación está fuertemente influenciada por las condiciones del entorno y del sistema (Adedeji et al., 2017).

En este sentido, la detección de fugas debe entenderse como parte de un proceso diagnóstico que integra la interpretación de estas manifestaciones con el análisis del comportamiento hidráulico del sistema.

4.2 Fundamento del geófono

El funcionamiento del geófono se basa en la detección de vibraciones mecánicas generadas por la propagación de ondas acústicas a través de distintos medios. En redes hidrosanitarias, estas vibraciones se originan por el flujo de agua a presión a través de discontinuidades en la tubería, generando señales que se transmiten principalmente como ondas longitudinales en medios rígidos, conservando mayor energía y definición (Li et al., 2021; Gao et al., 2022).

La propagación de la señal depende de las propiedades del medio, como densidad, rigidez y condiciones de confinamiento. En materiales como el concreto o el metal, la transmisión es más eficiente; sin embargo, pueden presentarse fenómenos de reflexión y superposición de ondas en puntos de discontinuidad, como uniones o cambios de dirección, generando múltiples trayectorias de propagación (Muggleton et al., 2002).

En particular, en tuberías metálicas, estos efectos pueden intensificarse, produciendo interferencias asociadas a la superposición de señales directas y reflejadas, lo que genera múltiples picos acústicos y desplazamientos aparentes del punto de máxima intensidad, evidenciando la complejidad del campo acústico en estos medios (Feng & Cheng, 2026).

De manera complementaria, en sistemas con transiciones entre materiales disímiles, como uniones metálico-plásticas, se presentan cambios en la impedancia acústica que generan fenómenos de atenuación, dispersión y modificación del contenido frecuencial de la señal (Felix et al., 2026).

Adicionalmente, factores como la presión del sistema, la profundidad de la red y la heterogeneidad del entorno influyen en la respuesta acústica, afectando la claridad y precisión de la señal y exigiendo interpretación técnica por parte del operador (Zhang et al., 2020; Wu et al., 2023)

4.3 Métodos no destructivos aplicados a la detección de fugas

La detección de fugas en redes hidrosanitarias puede abordarse mediante diversas técnicas no destructivas, fundamentadas en principios acústicos, electromagnéticos, térmicos y de trazado de flujo. La efectividad de estos métodos depende de las condiciones del entorno, el tipo de red y la naturaleza de la fuga, por lo que su aplicación se realiza de manera complementaria dentro de un proceso diagnóstico (Wu et al., 2020).

Tabla 1. Métodos no destructivos para detección de fugas fuente elaboración propia con base en Daniels (2004), Maldague (2001), IAEA (2009), Colombo et al. (2009), Valero et al. (2015) y Martini et al. (2017)

Método	Principio	Ventajas	Limitaciones	Referencia
Geófono	Detección acústica puntual	Alta versatilidad, fácil implementación	Dependencia del operador, interferencias	Martini et al. (2017)
Cámara acústica	Visualización de fuentes sonoras (beamforming)	Identificación rápida y visual de fugas	Alto costo, menor efectividad en interiores confinados	Valero et al. (2015)
Correlador acústico	Análisis de tiempo de señal	Alta precisión en tramos definidos	Requiere accesos y tramos lineales	Gao et al. (2005)
GPR (Radar de penetración)	Ondas electromagnéticas	Identificación de trazados y anomalías	Sensible a humedad y tipo de suelo	Daniels (2004)
Termografía	Variaciones térmicas	Útil en gradientes de temperatura	Limitado en condiciones homogéneas	Maldague (2001)
Trazadores (gas/colorante)	Flujo inducido	Alta sensibilidad	Logística compleja, invasivo	IAEA (2009)
CCTV (inspección visual)	Observación directa	Diagnóstico interno detallado	Aplicable solo en redes accesibles	Colombo et al. (2009)

4.4 Diagnóstico desde la patología de la construcción

El diagnóstico de fugas en redes hidrosanitarias, desde el enfoque de la patología de la construcción, no debe entenderse como la simple localización de un punto de pérdida, sino como la identificación de un proceso de deterioro dentro de un sistema constructivo e hidráulico. En este sentido, las fugas constituyen una manifestación que puede estar asociada a fallas en materiales, condiciones de instalación, presiones de servicio o envejecimiento de los elementos que conforman la red (Flores-Colen & de Brito, 2019).

A diferencia de los enfoques tradicionales centrados en la intervención directa, la patología de la construcción propone un análisis progresivo basado en la observación de síntomas, la identificación de causas y la evaluación de sus efectos sobre el sistema. Este enfoque resulta especialmente relevante en edificaciones existentes, donde las condiciones reales difieren de los modelos de diseño y donde la información disponible suele ser limitada o incompleta.

En este contexto, herramientas como el geófono se integran dentro de un proceso diagnóstico más amplio, en el cual la señal acústica constituye únicamente una evidencia parcial que debe ser interpretada en conjunto con otras manifestaciones, tales como humedades, fisuras, eflorescencias o deterioro de acabados. Esta correlación permite reducir la incertidumbre y orientar la toma de decisiones en campo (Gao et al., 2022).

Asimismo, el enfoque patológico promueve el principio de mínima intervención, en el cual el objetivo no es únicamente reparar el daño, sino hacerlo con el menor impacto posible sobre el sistema existente. Esto implica la necesidad de delimitar con precisión las zonas afectadas y de seleccionar adecuadamente las técnicas de diagnóstico, priorizando aquellas que permitan obtener información sin generar afectaciones adicionales.

Finalmente, el diagnóstico desde la patología de la construcción reconoce la importancia del contexto, la experiencia del operador y la integración de diferentes herramientas como elementos fundamentales para comprender el comportamiento del sistema. En este sentido, la detección de fugas deja de ser un proceso aislado y se convierte en un ejercicio de interpretación técnica orientado a la comprensión del fenómeno constructivo en su conjunto.

4.5 Proceso diagnóstico aplicado a la detección de fugas

El diagnóstico de fugas en redes hidrosanitarias se desarrolla como un proceso progresivo que integra la observación de manifestaciones, el análisis del comportamiento del sistema y la aplicación de técnicas no destructivas. Este proceso inicia con la identificación de indicios como humedades, variaciones en el consumo o alteraciones en el entorno, seguido de la formulación de hipótesis que son contrastadas mediante herramientas de auscultación como el geófono.

La secuencia diagnóstica responde a una lógica iterativa en la que la información obtenida permite ajustar la interpretación y reducir la incertidumbre. En este contexto, la integración de métodos y el criterio técnico del operador resultan fundamentales para delimitar zonas de intervención, optimizando la precisión y minimizando la afectación sobre el sistema constructivo (ISO 13822, 2010).

4.6 Normatividad y regulación aplicable en el contexto colombiano

n el contexto colombiano, la detección de fugas en redes hidrosanitarias se realiza principalmente en edificaciones existentes, donde la variabilidad de los sistemas, las modificaciones no documentadas y la limitada disponibilidad de información técnica incrementan la incertidumbre del diagnóstico. Estas condiciones son comparables a otros entornos latinoamericanos, donde factores como el ruido ambiental, la profundidad de las redes y la falta de registros afectan la aplicación de métodos acústicos (Orna & Montero-Yancha, 2024).

El marco normativo está definido por la NTC 1500, que establece criterios de diseño e instalación de redes hidráulicas (ICONTEC, 2016); la NSR-10, que condiciona aspectos estructurales relacionados con la intervención (AIS, 2010); y el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), que orienta la operación del sistema (Ministerio de Vivienda, 2017). Aunque estas normas no abordan directamente la detección acústica, definen el contexto técnico del sistema evaluado.

En este escenario, el geófono se posiciona como una herramienta clave cuya efectividad depende de la interpretación del operador y de su integración con estrategias de diagnóstico progresivo (Li et al., 2021; Gao et al., 2022).

5. Metodología

5.1 Enfoque de la investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque aplicado de carácter técnico, orientado a la evaluación del desempeño del geófono en la detección de fugas en redes hidrosanitarias en condiciones reales de campo. El estudio adopta un enfoque cualitativo–interpretativo con apoyo en elementos de análisis semicuantitativo, considerando la naturaleza del fenómeno evaluado y la influencia de variables operativas y del entorno en la obtención de resultados (Creswell, 2014).

5.2 Tipo y alcance del estudio

El trabajo corresponde a un estudio de tipo descriptivo–analítico, basado en la revisión y análisis de casos reales de detección de fugas. Se busca identificar patrones de comportamiento, condiciones de desempeño y factores que influyen en la efectividad del método en escenarios reales, a partir de la interpretación técnica de la información obtenida en campo.

5.3 Unidad de análisis

La unidad de análisis corresponde a casos reales de detección de fugas en redes hidrosanitarias urbanas, evaluados mediante inspección acústica con geófono. Estos casos incluyen tanto escenarios interiores como exteriores, con variabilidad en condiciones de entorno, materiales y manifestaciones de la fuga.

Por razones de confidencialidad y protección de datos, la información se presenta de manera anonimizada, extrayendo únicamente los elementos técnicos relevantes para el análisis académico.

5.4 Variables de evaluación

Para el análisis del desempeño del geófono, se definieron las siguientes variables:

- Precisión de localización: cercanía entre el punto estimado y el punto real de la fuga.
- Claridad de la señal: nivel de diferenciación de la señal acústica respecto al ruido de fondo.
- Interferencias: presencia de factores externos que afectan la lectura del equipo.
- Confiabilidad operativa: consistencia del resultado en función de las condiciones del entorno.
- Aporte diagnóstico: capacidad del método para orientar o descartar hipótesis.

Estas variables permiten estructurar un análisis integrado del desempeño del método en condiciones reales de aplicación.

5.5 . Procedimiento metodológico

El proceso metodológico se desarrolló en las siguientes etapas:

- Recolección de información: identificación y documentación de casos reales.
- Inspección en campo: aplicación del geófono bajo condiciones reales de operación.
- Registro de hallazgos: identificación de señales, zonas de interés y manifestaciones.

- Verificación: contraste mediante intervención física, cuando fue posible.
- Análisis: evaluación del desempeño en función de las variables definidas.

Este procedimiento responde a una lógica progresiva e iterativa, en la que la interpretación técnica constituye un elemento fundamental.

5.6 . Enfoque de análisis

El análisis se realiza mediante un enfoque comparativo entre casos, incorporando un criterio semicuantitativo que permite clasificar el desempeño del geófono en niveles relativos sin perder el componente interpretativo. Este enfoque reconoce que la detección de fugas en campo no responde a un comportamiento estrictamente determinístico, sino a un proceso condicionado por múltiples variables, en el cual el criterio del operador juega un papel clave (Adedeji et al., 2017).

5.7 . Matriz de evaluación del desempeño del geófono

Con el fin de estructurar el análisis de los casos de estudio, se diseñó una matriz de evaluación semicuantitativa que integra las variables definidas y permite establecer una valoración comparativa del desempeño del geófono en diferentes condiciones de operación.

Tabla 2 Matriz de evaluación semicuantitativa fuente elaboración propia

Caso	Entorno	Superficie	Precisión (0-2)	Señal (0-2)	Interferencias (0-2)*	Confiabilidad (0-2)	Aporte diagnóstico (0-2)	Puntaje total (0-10)
Caso 1	Exterior	Concreto	2	2	1	2	2	9
Caso 2	Exterior	Zona verde	1	0	2	1	1	5
Caso 3	Interior	Baldosa	2	1	1	2	2	8
...	...	...	...	...	...	...	...	...

La variable "interferencias" se evalúa de forma inversa, donde un valor de 2 corresponde a baja interferencia y un valor de 0 a alta interferencia.

5.8 Criterios e interpretación de la escala semicuantitativa

La evaluación del desempeño del geófono se realiza mediante un enfoque semicuantitativo, utilizando una escala de tres niveles (0-2) que permite integrar la naturaleza interpretativa del fenómeno acústico con la necesidad de establecer criterios técnicos comparables. Esta escala se aplica de forma

independiente a las variables definidas: precisión de localización, claridad de la señal, interferencias, confiabilidad operativa y aporte diagnóstico.

La adopción de este rango responde a que la detección de fugas en condiciones reales de campo no es un proceso determinístico, sino el resultado de la interacción entre el equipo, el entorno y el criterio del operador. En este contexto, la utilización de una escala reducida permite disminuir la ambigüedad en la clasificación y facilitar la identificación de patrones de comportamiento, sin pretender una exactitud matemática que no es consistente con la variabilidad de los escenarios evaluados.

El valor de 2 (desempeño alto) se asigna cuando el método permite una localización efectiva que habilita una intervención puntual, generalmente dentro de un rango de hasta 1,0 m respecto al punto real de la falla. No obstante, este umbral debe interpretarse de manera contextual, ya que en entornos interiores y superficies rígidas es posible alcanzar niveles de precisión superiores, mientras que en medios heterogéneos o exteriores este margen puede ampliarse debido a fenómenos de atenuación y dispersión de la señal. El valor de 1 (desempeño medio) indica que el geófono permite sectorizar o delimitar una zona de interés, reduciendo la incertidumbre y orientando la inspección progresiva. Por su parte, el valor de 0 (desempeño bajo) corresponde a escenarios donde la señal no permite establecer una relación confiable con el daño, debido a condiciones como baja presión, alta profundidad o interferencias significativas.

En el caso de la variable interferencias, la escala se aplica de forma inversa, de modo que un valor de 2 representa condiciones favorables de lectura y un valor de 0 condiciones críticas. A partir de la sumatoria de las variables evaluadas, se establecen rangos de interpretación global: alto (8–10), medio (5–7) y bajo (0–4), lo que permite integrar el comportamiento del método y apoyar la toma de decisiones en función de su capacidad resolutive en cada contexto.

6. Resultados

6.1 Presentación general de los casos

Se analizaron casos reales de detección de fugas en redes hidrosanitarias, evaluados mediante inspección acústica con geófono en condiciones reales de campo. Los casos incluyen escenarios tanto interiores como exteriores, con variabilidad en tipo de superficie, condiciones del entorno y forma de manifestación de la fuga, lo que permitió abordar el análisis desde diferentes contextos operativos.

Con el fin de optimizar la estructura del documento y mantener el enfoque en el análisis de resultados, la descripción detallada de los casos se presenta en el Anexo A, donde se consolidan los aspectos técnicos, hallazgos y condiciones particulares de cada situación evaluada. No obstante, a continuación se presenta una síntesis descriptiva de los casos, la cual permite contextualizar las condiciones bajo las cuales se evaluó el desempeño del geófono.

Tabla 3 Síntesis descriptiva de los casos de estudio fuente elaboración propia

Caso	Tipo de entorno	Tipo de red	Condición de lectura	Resultado del geófono	Nivel de precisión	Observación clave
1	Superficie rígida (andén)	Presurizada PVC	Favorable	Localización directa	Alta	Punto visible ≠ punto real
2	Zona verde saturada	Presurizada PVC	Desfavorable	Orientación general	Baja	Presencia de falsos positivos
3	Entrepiso / sótano	No presurizada	No concluyente	Descarte de fuga	N/A	Diagnóstico hacia desagüe
4	Sótano con humedad	No presurizada	No concluyente	Descarte de fuga	N/A	Posible nivel freático
5	Interior controlado	Presurizada mixta	Favorable	Localización directa	Alta	Fallas en empates
6	Placa con vacío (calceón)	Presurizada galvanizada	Interferencia media	Localización ajustada	Media	Eco afecta precisión
7	Entorno estructural complejo	Presurizada PVC	Compleja	Sectorización	Media	Interferencia estructural
8	Interior (fuga intermitente)	Presurizada PVC	Condicionada	Localización directa	Media	Depende de operación
9	Edificación (evento pluvial)	No presurizada	No aplicable	No se usa	N/A	Diagnóstico previo clave
10	Red extensa	Presurizada	Limitada	Orientación parcial	Baja	Requiere métodos complementarios
11	Zona verde con múltiples redes	Presurizada PVC	Desfavorable	Sectorización	Baja	No discrimina tubería

6.2 Resultados de la matriz de evaluación

A continuación, se presentan los resultados consolidados de la evaluación semicuantitativa aplicada a los casos analizados, de acuerdo con las variables definidas en la metodología. La matriz permite sintetizar el desempeño del geófono en función de las condiciones de entorno, tipo de superficie y características operativas de cada caso, facilitando la comparación entre escenarios.

Los puntajes obtenidos reflejan la interacción entre variables como la precisión de localización, la claridad de la señal, el nivel de interferencias, la confiabilidad operativa y el aporte diagnóstico del método. En este sentido, los resultados no deben interpretarse únicamente en términos de localización directa de la fuga, sino también en función del valor que aporta el geófono en la orientación del diagnóstico, la delimitación de zonas de análisis y el descarte de posibles escenarios.

Tabla 4 Resultados de la matriz de evaluación semicuantitativa fuente elaboración propia

Caso	Entorno	Superficie	Precisión (0-2)	Señal (0-2)	Interferencias (0-2)*	Confiabilidad (0-2)	Aporte diagnóstico (0-2)	Puntaje total (0-10)
1	Exterior	Concreto	2	2	2	2	2	10
2	Exterior	Zona verde	1	1	0	1	2	5
3	Interior	Baldosa	0	0	1	1	2	4
4	Exterior	Concreto	0	0	1	1	2	4
5	Interior	Baldosa	2	2	2	2	2	10
6	Exterior	Concreto	1	1	1	1	2	6
7	Interior	Baldosa	1	1	0	1	2	5
8	Exterior	Concreto	2	1	1	1	2	7
9	Exterior	Zona verde	0	0	2	1	2	5
10	Exterior	Zona verde	1	1	1	1	2	6
11	Exterior	Zona verde	1	1	0	1	2	5

**La variable "interferencias" se evalúa de forma inversa, donde un valor de 2 corresponde a baja interferencia y un valor de 0 a alta interferencia.*

Los resultados obtenidos serán analizados en el capítulo siguiente, en el cual se profundiza en la interpretación del desempeño del geófono en función de las condiciones de operación

6.3 Diagnóstico desde la patología de la construcción

El proceso de diagnóstico de fugas en redes hidrosanitarias debe abordarse desde la perspectiva de la patología de la construcción, entendiendo que la fuga no constituye un evento aislado, sino la manifestación de un proceso de deterioro asociado a múltiples factores, tales como las condiciones de servicio, el envejecimiento de los materiales y posibles deficiencias en la instalación. En este sentido, el análisis no debe limitarse a la localización del punto de falla, sino que debe orientarse a la comprensión integral del sistema y de las causas que originan la patología.

Desde esta perspectiva, la detección mediante geófono se integra como una herramienta dentro de un proceso diagnóstico progresivo, en el cual la interpretación de la señal acústica debe complementarse con la observación de manifestaciones físicas, como humedades, eflorescencias o deterioro de acabados. Este enfoque permite correlacionar la información obtenida en campo con el comportamiento del sistema, reduciendo la incertidumbre y evitando intervenciones innecesarias, en coherencia con los principios de propagación acústica en tuberías y diagnóstico técnico en redes hidráulicas (Muggleton et al., 2002; Li et al., 2021).

Adicionalmente, el uso de técnicas de diagnóstico no destructivo se enmarca dentro del principio de mínima intervención, el cual establece la necesidad de preservar la integridad del sistema durante el proceso de evaluación. Este criterio ha sido ampliamente reconocido como una práctica fundamental para garantizar la sostenibilidad de las intervenciones y evitar afectaciones adicionales en los elementos constructivos (Paranoá, 2025).

En este contexto, el diagnóstico desde la patología de la construcción no solo permite identificar la ubicación de la fuga, sino también establecer criterios técnicos para la toma de decisiones, orientados a la intervención controlada, la optimización de recursos y la solución definitiva del problema, más allá de acciones correctivas puntuales.

7. Análisis y discusión

7.1 Relación entre efectividad y precisión del método

El análisis de los casos evaluados evidencia que la efectividad del geófono no se traduce necesariamente en una precisión puntual constante, sino que ambas variables están condicionadas por el entorno y las características del sistema. En escenarios favorables, especialmente en superficies rígidas y

espacios interiores, se observa una relación directa entre claridad de la señal y precisión de localización. Esto se refleja en casos como el Caso 3 y el Caso 7, donde se logró identificar con precisión el punto de fuga, alcanzando desempeños altos.

En contraste, en entornos exteriores o condiciones más heterogéneas, esta relación se vuelve variable. En casos como el Caso 2 y el Caso 10, el geófono permitió orientar la localización o descartar zonas, pero sin precisión puntual, debido a la atenuación de la señal y la presencia de interferencias.

Estos resultados indican que la efectividad del método no debe evaluarse únicamente por su precisión, sino por su capacidad de aportar al diagnóstico, reduciendo la incertidumbre y apoyando la toma de decisiones en campo.

7.2 Influencia del entorno y condiciones de la red

El análisis de los casos evidencia que el entorno constituye uno de los factores más determinantes en el desempeño del geófono. En condiciones interiores, caracterizadas por superficies rígidas y mayor confinamiento, la propagación de la señal acústica tiende a ser más eficiente, lo que se traduce en una mayor claridad y precisión en la localización. Por el contrario, en entornos exteriores, la heterogeneidad del suelo, la presencia de humedad y las interferencias ambientales generan dispersión y atenuación de la señal, reduciendo su calidad.

Adicionalmente, las condiciones propias de la red, como la profundidad de la tubería, el material y la configuración del sistema, influyen directamente en la forma en que la señal se transmite. En este sentido, se identifican patrones consistentes en varios casos evaluados. Por ejemplo, al igual que en el Caso 5, donde la profundidad de la red dificultó la lectura de la señal, en otros escenarios con condiciones similares se observó una reducción en la claridad, lo que confirma que la profundidad actúa como un factor de atenuación y modificación del contenido frecuencial.

Estos resultados confirman que el desempeño del geófono no depende únicamente del equipo, sino de la interacción entre el medio de propagación y las características del sistema, lo que refuerza la necesidad de un enfoque diagnóstico contextual.

7.3 Rol del operador en la interpretación de resultados

Los resultados obtenidos evidencian que el desempeño del geófono no depende únicamente de las condiciones físicas del entorno o de las características del equipo, sino también de la capacidad del operador para interpretar la señal en contexto. A diferencia de otros métodos más automatizados, el geófono requiere un proceso activo de lectura, en el cual la

experiencia en campo y el reconocimiento de patrones juegan un papel fundamental.

En varios de los casos analizados, la diferenciación entre una señal asociada a fuga y una interferencia externa no fue evidente a partir de la intensidad del sonido, sino de su comportamiento espacial y su relación con el sistema evaluado. Esto implica que la interpretación no se basa únicamente en valores absolutos, sino en la comparación entre puntos, la continuidad de la señal y la coherencia con las condiciones observadas.

En este sentido, el operador actúa como un elemento integrador dentro del proceso diagnóstico, donde la toma de decisiones se fundamenta en la combinación de información técnica, experiencia y lectura del entorno, lo que influye directamente en la efectividad del método.

7.4 . Falsos positivos y condiciones de incertidumbre

El análisis de los casos evidencia que la interpretación de la señal del geófono está sujeta a condiciones de incertidumbre inherentes al método, especialmente en escenarios donde el entorno altera la propagación acústica. En este contexto, los falsos positivos se presentan como uno de los principales desafíos, al generar señales que pueden asociarse a fugas sin corresponder necesariamente a una discontinuidad real en la red.

Estos fenómenos se relacionan directamente con la transmisión de vibraciones a través de elementos rígidos, como estructuras de concreto o redes adyacentes, que pueden amplificar o desviar la señal respecto a su fuente original. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en estudios sobre propagación acústica en tuberías enterradas, donde la interacción entre el medio y la estructura genera desplazamientos del punto de máxima intensidad (Muggleton et al., 2002; Gao et al., 2022). Asimismo, interferencias externas como equipos en operación, tránsito vehicular o variaciones hidráulicas dentro del sistema pueden generar patrones acústicos similares a los de una fuga, dificultando su diferenciación (Li et al., 2021).

Adicionalmente, en sistemas donde existen transiciones entre materiales disímiles —como las uniones entre tuberías metálicas y plásticas identificadas en el Caso 6— se presentan cambios en la impedancia acústica que generan fenómenos de reflexión, atenuación y dispersión de la señal (Felix et al., 2026). Estas condiciones producen patrones acústicos complejos y desplazamientos del punto de máxima intensidad, lo que incrementa significativamente la probabilidad de interpretaciones erróneas en campo si

no se cuenta con una caracterización técnica previa del sistema.

Este comportamiento no se presenta de manera aislada, sino que es recurrente en los escenarios evaluados. En el Caso 6, el vacío constructivo y la naturaleza del material galvanizado provocaron reverberaciones que alteraron la precisión espacial de la señal. De igual forma, en condiciones de alta interferencia como los Casos 9 y 11, se identificaron señales que no correspondían directamente a la ubicación de la fuga, evidenciando la dificultad de discriminación en entornos urbanos densos.

En este sentido, el geófono debe entenderse como una herramienta de apoyo dentro de un proceso diagnóstico integral, en el cual la validación mediante múltiples criterios y la lectura contextual del sistema permiten reducir la incertidumbre y mejorar la confiabilidad de la intervención, en coherencia con los principios de mínima intervención en la patología de la construcción (Paranoá, 2025).

7.5 . Alcances y limitaciones del método

El análisis de los casos evaluados permite establecer que el geófono constituye una herramienta efectiva dentro del proceso de detección de fugas, siempre que se comprendan sus alcances y limitaciones en función de las condiciones reales de aplicación. Su principal fortaleza se evidencia en escenarios con condiciones favorables de lectura, como en los Casos 1 y 5, donde la combinación de redes presurizadas y superficies rígidas permitió una localización directa con niveles de precisión altos.

No obstante, su desempeño presenta limitaciones en entornos con condiciones desfavorables o alta complejidad. En casos como el Caso 2 y el Caso 11, la presencia de suelos saturados o múltiples redes generó interferencias que impidieron discriminar adecuadamente la señal, conduciendo a orientaciones generales o sectorizaciones con baja precisión. De manera similar, en el Caso 10, la extensión de la red limitó la capacidad de localización puntual, requiriendo el uso de métodos complementarios.

Adicionalmente, en escenarios donde la red no se encuentra presurizada, como en los Casos 3, 4 y 9, el geófono pierde aplicabilidad directa, siendo necesario recurrir a otros enfoques diagnósticos para identificar el origen del problema. Estos resultados evidencian que el método no es universalmente aplicable, sino dependiente de las condiciones hidráulicas del sistema.

En este contexto, el geófono debe entenderse como parte de un enfoque integral de diagnóstico, donde su valor radica no solo en la localización exacta del daño, sino en su capacidad para orientar el proceso, reducir la incertidumbre y apoyar la toma de decisiones en campo.

7.6 Discusión final

El análisis de los casos evaluados permite establecer que el desempeño del geófono depende de la interacción entre las condiciones hidráulicas, el entorno de propagación y el criterio del operador. Se identifican patrones claros de mejor desempeño en redes presurizadas y superficies rígidas, donde la transmisión acústica favorece la claridad y precisión en la localización, como en los Casos 1 y 5 (Muggleton et al., 2002; Gao et al., 2022).

En contraste, en entornos desfavorables como suelos saturados, redes extensas o múltiples conducciones, la señal se ve afectada por atenuación, dispersión e interferencias, lo que limita su discriminación, tal como se evidenció en los Casos 2, 10 y 11 (Li et al., 2021; Zhang et al., 2020). Asimismo, en redes no presurizadas, el método pierde aplicabilidad directa, requiriendo enfoques de descarte o técnicas complementarias, como en los Casos 3, 4 y 9.

En este contexto, la interpretación no es un proceso automático, sino dependiente del operador, quien actúa como filtro frente a la complejidad del entorno (Artificial Intelligence in Water Distribution Networks, 2026). Desde la patología de la construcción, esto refuerza la necesidad de un enfoque integral basado en técnicas no destructivas y el principio de mínima intervención (Paranoá, 2025).

En consecuencia, el geófono no debe entenderse como una herramienta de precisión absoluta, sino como un instrumento de apoyo dentro de un proceso diagnóstico progresivo, cuyo valor radica en orientar la intervención y reducir la incertidumbre en campo.

8. Conclusiones

El presente capítulo recoge las conclusiones derivadas del análisis desarrollado, en función de los objetivos planteados para la investigación. A partir de la evaluación del desempeño del geófono en casos reales, se sintetizan los principales hallazgos relacionados con su comportamiento en condiciones de campo, así como los factores que influyen en su efectividad y aplicación dentro del proceso diagnóstico.

En este sentido, las conclusiones se estructuran de manera coherente con el objetivo general y los objetivos específicos definidos, permitiendo evidenciar el cumplimiento del alcance propuesto y consolidar los aportes del estudio en el marco de la patología de la construcción.

8.1 Conclusión general

Se logró evaluar el desempeño del geófono como herramienta de diagnóstico no destructivo en la detección de fugas en redes hidrosanitarias urbanas, evidenciando que su efectividad no es uniforme, sino que está condicionada por la interacción entre el entorno, las características del sistema y la interpretación del operador. A partir del análisis de casos reales, se estableció que el método presenta un comportamiento más favorable en condiciones controladas, como superficies rígidas y espacios interiores, mientras que en entornos heterogéneos su precisión disminuye debido a fenómenos de atenuación e interferencia.

No obstante, el valor del geófono no radica únicamente en su capacidad de localización exacta, sino en su aporte dentro del proceso diagnóstico, al permitir orientar la búsqueda, reducir la incertidumbre y delimitar zonas de intervención de manera no destructiva. En este sentido, su aplicación debe entenderse como parte de un enfoque integral, donde la combinación de herramientas, la información previa y la experiencia en campo permiten optimizar la toma de decisiones.

En consecuencia, el geófono se consolida como una herramienta útil dentro de la patología de la construcción, siempre que su uso se realice bajo criterios técnicos y en coherencia con las condiciones reales del sistema evaluado.

8.2 Conclusiones específicas

En relación con el análisis del comportamiento del geófono en diferentes condiciones de entorno, se evidenció un mejor desempeño en espacios interiores y superficies rígidas, donde la propagación de la señal es más eficiente. En contraste, en entornos exteriores o con materiales heterogéneos, la atenuación e interferencias afectan la claridad de la señal y reducen la precisión del método.

Se identificó que factores como la profundidad de la red, el material de la tubería, la configuración del sistema y las condiciones del entorno influyen directamente en la precisión de localización, la claridad de la señal y la confiabilidad operativa del geófono en escenarios reales.

Se estableció que el aporte del geófono dentro del proceso diagnóstico no se limita a la localización exacta de la fuga, sino que incluye la capacidad de orientar la inspección, validar o descartar hipótesis y reducir la incertidumbre en la toma de decisiones.

La aplicación de una matriz semicuantitativa permitió establecer criterios técnicos para la interpretación del desempeño del método, integrando múltiples variables de campo y facilitando la comparación entre casos bajo condiciones reales.

Finalmente, se propusieron lineamientos para el uso del geófono dentro de un enfoque de diagnóstico progresivo, en el cual la integración de herramientas, la información previa del sistema y la experiencia en campo permiten optimizar los resultados y minimizar intervenciones innecesarias, en coherencia con los principios de la patología de la construcción.

9. Recomendaciones y buenas prácticas

9.1 Enfoque general

La disponibilidad y calidad de la información previa, como planos hidráulicos, antecedentes de consumo y registros de intervenciones anteriores, constituyen un elemento determinante en la definición de la estrategia de diagnóstico. En el contexto de edificaciones existentes, es frecuente la ausencia de información actualizada o la presencia de modificaciones no documentadas, lo que incrementa la incertidumbre operativa y limita la aplicación directa de los métodos de detección.

En este sentido, el proceso diagnóstico debe iniciar con una fase de caracterización técnica del sistema, orientada a reconstruir su funcionamiento a partir de la información disponible y la observación en campo. Esta etapa permite contextualizar el uso del geófono y anticipar posibles limitaciones asociadas a la configuración de la red, las condiciones del entorno y el estado operativo del sistema.

De esta manera, la gestión de la información previa transforma la selección de herramientas en una decisión estratégica, en la cual el geófono y los métodos complementarios se emplean de forma integrada, optimizando la toma de decisiones y reduciendo la incertidumbre durante la intervención.

9.2 Buenas prácticas en el diagnóstico

9.2.1 Integración con la inspección patológica

El uso del geófono debe complementarse con la inspección visual de manifestaciones como humedades, fisuras, eflorescencias o deterioro de acabados. La correlación entre la evidencia física y la señal acústica permite reducir la incertidumbre y mejorar la precisión del diagnóstico. En múltiples casos, la identificación del daño estuvo más asociada al contexto constructivo que a la intensidad del sonido.

9.2.2 Reconocimiento del sistema hidráulico

Es fundamental identificar el material de la tubería, su configuración y condiciones de instalación. Cada material presenta comportamientos distintos en la transmisión del sonido, lo que influye directamente en la lectura del geófono. Asimismo, elementos como codos, uniones, derivaciones o cambios de diámetro pueden generar alteraciones en la señal, las cuales deben ser interpretadas dentro del contexto del sistema.

9.2.3 Evaluación del entorno

El ruido ambiental, las vibraciones estructurales y las condiciones del suelo pueden afectar la calidad de la medición. Se recomienda realizar lecturas comparativas en diferentes puntos, priorizando la identificación de variaciones en la señal más que valores absolutos. Este enfoque resulta especialmente útil en escenarios donde la señal no es claramente dominante.

9.3 Buenas prácticas en la interpretación

9.3.1 Lectura relativa de la señal

La mayor intensidad sonora no siempre corresponde a la ubicación exacta de la falla, debido a que elementos rígidos como estructuras o tuberías pueden actuar como amplificadores, desplazando el pico acústico respecto a su origen real. Por esta razón, la interpretación no debe basarse en valores absolutos, sino en la comparación entre diferentes puntos de medición. Se recomienda realizar lecturas comparativas, priorizando la identificación de tendencias y variaciones espaciales de la señal sobre la simple detección de volumen.

9.3.2 Análisis del comportamiento acústico

En escenarios donde la señal es débil o difusa, resulta más efectivo analizar su comportamiento en términos de continuidad, repetición y contenido frecuencial, en lugar de buscar únicamente un punto de máxima intensidad. El operador debe desarrollar la capacidad de discriminar interferencias, tales como ruidos ambientales, vibraciones estructurales o flujos residuales, y reconocer patrones asociados a la fuga. Esta habilidad es clave para reducir la incertidumbre, especialmente en entornos heterogéneos donde la disipación de la señal es elevada.

9.3.3 Correlación con la evidencia física

La interpretación acústica constituye una evidencia parcial que debe validarse mediante la lectura patológica del sistema. Se recomienda contrastar los puntos identificados con manifestaciones físicas como humedades, eflorescencias o deterioro de acabados. Esta correlación permite confirmar si una señal corresponde a una fuga real o a una reverberación estructural, integrando el uso del geófono dentro de un proceso diagnóstico más amplio y confiable, orientado a la mínima intervención.

9.4 Buenas prácticas en la intervención

Este apartado materializa el objetivo de minimizar las intervenciones invasivas que puedan afectar la estabilidad o la estética del sistema, en coherencia con el principio de mínima intervención propio de la patología de la construcción.

9.4.1 Validación del punto de intervención

La validación mediante múltiples mediciones constituye una práctica crítica, ya que en condiciones reales de campo pueden identificarse puntos de mayor intensidad acústica que no corresponden a la ubicación exacta del daño, debido a fenómenos de propagación estructural. Por esta razón, es fundamental contrastar la señal obtenida con la evidencia técnica y el contexto constructivo, reduciendo la probabilidad de intervenciones innecesarias y optimizando los recursos de reparación.

9.4.2 Minimización del impacto

La delimitación precisa del área de intervención es el núcleo del principio de mínima intervención. Su aplicación resulta especialmente relevante en edificaciones en uso, donde las condiciones reales pueden diferir de los diseños originales y donde intervenciones extensivas generan afectaciones significativas en la habitabilidad, el servicio y los acabados.

9.5 Enfoque desde la patología de la construcción

9.5.1 Análisis integral del daño

Desde la patología de la construcción, la fuga debe entenderse no como un evento aislado, sino como la manifestación de un proceso de deterioro asociado a factores como presiones de servicio, envejecimiento de materiales o deficiencias en la instalación. Este enfoque permite identificar la causa raíz del problema y orientar soluciones definitivas, más allá de intervenciones paliativas.

9.5.2 Uso del geófono como herramienta complementaria

La señal acústica constituye una evidencia parcial dentro del proceso diagnóstico. Por ello, su integración con técnicas como la inspección visual, la termografía, cámaras de inspección o pruebas hidráulicas permite reducir la incertidumbre y mejorar la confiabilidad del diagnóstico final.

9.5.3 Ajustes operativos para mejorar el desempeño

El uso de varillas o extensiones de contacto representa una estrategia operativa efectiva en escenarios de alta atenuación, como suelos naturales o superficies no rígidas. Estos elementos mejoran la transmisión de la señal hacia el sensor, ampliando la aplicabilidad del método sin comprometer su fundamento físico.

9.6 Síntesis

Las buenas prácticas planteadas en este capítulo permiten consolidar un enfoque técnico orientado a la integración de herramientas, la interpretación crítica de la información y la comprensión del sistema constructivo en su conjunto. En este sentido, el uso del geófono se enmarca en un proceso diagnóstico que trasciende la búsqueda de una localización puntual, para convertirse en un ejercicio de análisis progresivo basado en la evidencia disponible.

Este enfoque reconoce que la detección de fugas en redes hidrosanitarias no responde a condiciones ideales, sino a escenarios variables donde factores como el entorno, la configuración de la red, las interferencias y la calidad de la información previa influyen directamente en los resultados. Por esta razón, la correcta selección del método de inspección, así como su integración con otras técnicas, se convierte en un elemento determinante para mejorar la confiabilidad del diagnóstico.

Asimismo, se destaca la importancia del criterio técnico del operador como elemento articulador del proceso, capaz de interpretar la información obtenida, identificar patrones y tomar decisiones en función del contexto. La experiencia en campo, sumada al uso adecuado de herramientas como el geófono, las varillas de acople y equipos complementarios, permite optimizar el alcance del método y adaptarlo a diferentes condiciones de operación.

En consecuencia, el enfoque propuesto se alinea con los principios de la patología de la construcción, en los cuales la comprensión del fenómeno, la identificación de causas y la mínima intervención constituyen pilares fundamentales. De esta manera, las buenas prácticas aquí descritas no solo buscan mejorar la precisión en la detección de fugas, sino también aportar criterios aplicables al ejercicio profesional, especialmente en edificaciones existentes donde las condiciones son complejas y dinámicas.

REFERENCIAS

1. Adediji, K. B., Hamam, Y., Abe, B. T., & Abu-Mahfouz, A. M. (2017). Leak detection and estimation in water distribution systems: A review. *IEEE Access*, 5, 25792–25803.
2. Artificial Intelligence in Water Distribution Networks: A Systematic Review of Models, Input Variables, Databases, and Output Strategies for Leak Detection. (2026). *Smart Cities*, 9(3), 45–68. <https://www.mdpi.com/2624-6511/9/3/45>
3. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá, Colombia.
4. Colombo, A. F., Lee, P., & Karney, B. W. (2009). A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of Hydro-environment Research*, 2(4), 212–227.
5. Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). Sage Publications.
6. Daniels, D. J. (2004). *Ground penetrating radar* (2nd ed.). Institution of Engineering and Technology.
7. Felix, J., et al. (2026). Micro-leakage diagnosis of steel-plastic transition joints in PE pipelines based on acoustic emission multi-domain features and random forest. *Sensor Review*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1108/SR-12-2025-0996>
8. Feng, Z., & Cheng, W. (2026). Acoustic leak localization study based on MVDR time-delay estimation algorithm in a cross-spectral domain for water pipeline systems. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 17(2). <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-2055>
9. Flores-Colen, I., & de Brito, J. (2019). A systematic approach for maintenance planning of building facades. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(3).
10. Gao, Y., Brennan, M. J., Joseph, P. F., & Muggleton, J. M. (2022). A review of leak detection methods for water distribution pipelines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 162.
11. Hunaidi, O., & Chu, W. (1999). Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. *Applied Acoustics*, 58(3), 235–254.
12. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2009). Leak detection in water distribution networks using isotopic and chemical methods. IAEA.
13. International Organization for Standardization (ISO). (2010). ISO 13822: Bases for design of structures — Assessment of existing structures. ISO.
14. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2016). NTC 1500: Instalaciones hidráulicas y sanitarias en edificaciones. Bogotá, Colombia.
15. Li, S., Wen, Y., & Li, Y. (2021). Acoustic emission-based leak detection in water pipelines: A review. *Sensors*, 21(3), 1–20.

16. Liemberger, R., & Wyatt, A. (2019). Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Supply*, 19(3), 831–837.
17. Maldague, X. (2001). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. Wiley.
18. Martini, A., Troncossi, M., & Rivola, A. (2017). Vibro-acoustic methods for leak detection in pipelines. *Mechanical Systems and Signal Processing*.
19. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)*. Bogotá, Colombia.
20. Muggleton, J. M., Brennan, M. J., & Pinnington, R. J. (2002). Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection. *Journal of Sound and Vibration*, 249(5), 939–954.
21. Orna, M., & 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-2024-326>
22. Paranoá. (2025). Non-destructive testing, digitization, and digital twins in historic buildings: A systematic review. *Paranoá*, 18(37), 1–22. <https://doi.org/10.16991/paranoa.2025.60423>
23. Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D., & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25–45.
24. Valero, E., Sanz, R., & Pérez, R. (2015). Acoustic imaging for leak detection in pressurized systems. *Applied Acoustics*.
25. Wu, H., et al. (2020). Acoustic signal processing for leak detection in pipelines under complex conditions. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*.
26. Wu, H., Liu, Y., & Sun, Q. (2023). Acoustic signal analysis for pipeline leak detection under complex environmental conditions. *Sensors*.
27. Zhang, L., Gao, Y., & Liu, Y. (2020). Influence of soil conditions on acoustic leak detection in buried pipelines. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*.