

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



***“DETECCIÓN DE FUGAS EN REDES DE AGUA POTABLE MEDIANTE
GPR, EN LA CIUDAD DE CHIHUAHUA”.***

POR:

ING. PETRA VIRIDIANA IZAGUIRRE CASTILLO

TESIS PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA



“Detección de Fugas en Redes de Agua Potable Mediante GPR, en la Ciudad de Chihuahua.”. Tesis presentada por Petra Viridiana Izaguirre Castillo como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Fernando Martínez Reyes
Secretario de Investigación y Posgrado

M.I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador Académico

Dra. Carmen Julia Navarro Gómez
Directora de Tesis

Mayo 2023

Fecha

COMITÉ

Dra. Carmen Julia Navarro Gómez
Dr. Luis Ernesto Cervera Gómez
M.I. Martha Lorena Calderón Fernández
Ing. Jesús Rubén Sánchez Navarro



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

06 de junio de 2023

ING. PETRA VIRIDIANA IZAGUIRRE CASTILLO
Presente.

En atención a su solicitud relativa al desarrollo de la tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por la directora **Dra. Carmen Julia Navarro Gómez** para que lo desarrolle, con el título **“DETECCIÓN DE FUGAS EN REDES DE AGUA POTABLE MEDIANTE GPR, EN LA CIUDAD DE CHIHUAHUA”**.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos

Resumen

Índice de tablas

Índice de figuras

1. Introducción

1.1 Antecedentes

1.2 Estado del arte

2. Planteamiento del problema

2.1 Justificación

2.2 Hipótesis

2.3 Alcances y objetivos

2.4 Objetivo general

2.5 Objetivos particulares

3. Marco teórico

3.1 Pérdidas reales

3.2 Detección de fugas

3.3 Fundamentación teórica del GPR



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 4. Metodología
- 5. Localización de la zona de estudio
 - 5.1 Descripción del entorno físico de la Ciudad de Chihuahua
- 6. Localización de la zona de estudio
 - 6.1 Seleccionar sectores de la red de distribución de agua potable de la Ciudad de Chihuahua
 - 6.2 Aplicación del método de GPR
 - 6.3 Analizar y procesar las imágenes y datos obtenidos con el GPR para identificar y localizar las posibles fugas presentes en la red de distribución
 - 6.4 Discusión de resultado
- 7. Conclusiones y recomendaciones
 - 7.1 Utilidad de la investigación
- Referencias
- Curriculum Vitae

A T E N T A M E N T E

“naturam subiecit aliis”

EL DIRECTOR

**M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ
MARTÍNEZ**

**FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.**



DIRECCIÓN

**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

DR. FERNANDO MARTÍNEZ REYES



i. Índice de Contenido

i. Índice de Contenido.....	4
ii. Agradecimientos.....	6
iii. Dedicatoria.....	7
iv. Resumen.....	8
v. Índice de Tablas.....	9
vi. Índice de Figuras.....	10
“DETECCIÓN DE FUGAS EN REDES DE AGUA POTABLE MEDIANTE GPR, EN LA CIUDAD DE CHIHUAHUA”	12
I. Introducción	12
1.1 Antecedente	13
1.2 Estado del Arte.....	16
II. Planteamiento del Problema	22
2.1 Justificación	24
2.2 Hipótesis	26
2.3 Alcances y Objetivos	26
2.4 Objetivo General.....	26
2.5 Objetivos Particulares	27
III. Marco Teórico	27
3.1 Pérdidas Reales	28
3.2 Detección de Fugas.....	30
3.3 Fundamentación Teórica del GPR.....	33
IV. Metodología	36
V. Localización de la Zona de Estudio.....	39
5.1 Descripción del Entorno Físico de la Ciudad de Chihuahua	40
VI. Resultados	47
6.1 Seleccionar Sectores de la Red de Distribución de Agua Potable de la Ciudad de Chihuahua.....	47
6.2 Aplicación del Método de GPR.....	48
6.3 Analizar y Procesar las Imágenes y Datos Obtenidos con el GPR para Identificar y Localizar las Posibles Fugas Presentes en la Red de Distribución.....	49
Sector 1.- Banqueta entre Puente Pacheco y Avenida Fuentes Mares	50
Sector 2.- Sectorización Chihuahua 2000.....	52
Sector 3.- Terracería en Rancho Guadalupe.....	54



Sector 4.- Avenida Antonio de Montes entre Boulevard Antonio Ortiz Mena y Avenida Antonio Deza y Ulloa.....	55
Sector 5.- Fraccionamiento Circuito Magenta.....	58
6.4 Discusión de Resultados.....	60
Sector 1, Banqueta entre Puente Pacheco y Avenida Fuentes Mares.....	61
Sector 2, Chihuahua 2000.....	63
Sector 3, Terracería en Rancho Guadalupe	63
Sector 4, Avenida Antonio de Montes entre Boulevard Antonio Ortiz Mena y Avenida Antonio Deza y Ulloa.....	66
Sector 5.- Fraccionamiento Circuito Magenta.....	68
Levantamiento 1	70
Levantamiento 2	71
Levantamiento 3	71
VII. Conclusiones y Recomendaciones	72
7.1 Utilidad de la Investigación	74
Referencias	75
Curriculum Vitae	80



ii. Agradecimientos

Específicamente gracias a las personas que me ayudaron con la decisión de entrar al posgrado, que influenciaron de cualquier manera y me animaron a seguir con la formación de un perfil profesional. Gracias a mi Directora de tesis por todas sus aportaciones, por su trabajo, dedicación y tiempo durante mi transcurso en el postgrado, al igual gracias a mi comité de tesis por la atención y el apoyo con este compromiso. Gracias al personal de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua que logramos a través de su conocimiento, interpretación y aporte a este nuevo campo de mi tema de investigación. Gracias también a los académicos y administrativos de la Universidad, por compartirnos sus conocimientos, sus experiencias y su tiempo.



iii. Dedicatoria

Durante este proceso, me he dado cuenta de que Dios se encuentra reflejado en cada una de las personas que puso y que ha conservado en mi camino en el transcurso de estos tres años; desde mis primeras materias hasta la conclusión del presente trabajo de investigación.

Gracias mamá, hermanos y sobrinos por su paciencia, apoyo incondicional y por estar presentes a cada momento, gracias que han apoyado todas mis necesidades para lograr concluir este proceso. Gracias novio por tus valores, gracias por todo lo que me aportas y todo lo nuevo que aprendo de ti cada día. Gracias también amigas y jefes en Desarrollo Urbano, por el apoyo desde una taza de café y el tiempo para tomar mis clases. Gracias a la Dirección Local por permitirme desarrollarme, a conocer mi potencial, mi valor profesional y a no limitarme si de conocer se trata, gracias a mi Director, amigos y compañeros por sus grandes enseñanzas. Gracias compañeros, amigas y amigos que pasamos juntos por este proceso de crecimiento, por estar y apoyarnos los unos a los otros. Gracias a mis amigos de la vida de que están. Gracias a Dios por este desarrollo y gracias a mi misma por el querer superarme y querer crecer cada día.



iv. Resumen

La eficiencia promedio de los sistemas de redes de abastecimiento de agua potable a nivel nacional es del 44.8%, según datos proporcionados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua en 2019 (y otras fuentes). Dada la importancia de realizar estudios e investigaciones para el cuidado y manejo del agua, con el objetivo de: mejorar la eficiencia en el abastecimiento, combatir la escasez del recurso y preservar el recurso hídrico para las futuras generaciones, resulta crucial evitar las pérdidas de volúmenes de agua en las redes de distribución. En este contexto, el presente estudio se centra en determinar, como se puede optimizar y obtener eficacia para evitar el desperdicio del agua, mediante métodos no invasivos y por ende menos costosos como es el Ground Penetrating Radar (GPR) Radas de Penetración Terrestre. Considerando que el (GPR) cumple como una herramienta no destructiva para detectar pérdidas de agua en las redes, como parte de un programa activo de control de fugas. Dada la poca aplicación documentada de la utilización del GPR en entornos reales, y que la información documentada se limita a pruebas de laboratorio. La efectividad del GPR en la detección de fugas, basada en el análisis de los resultados obtenidos durante la implementación del método, está estrechamente relacionada con el conocimiento detallado de las redes existentes. En el caso específico de los cinco sectores de la Ciudad de Chihuahua, abordados en este estudio, se observaron diferentes niveles de eficacia en la detección de humedad al implementar el método del GPR. En resumen, la implementación del GPR en la detección de fugas en redes de distribución de agua potable tiene el potencial de reducir las pérdidas de agua y optimizar los recursos, pero requiere un enfoque integral y la consideración de múltiples factores.



v. Índice de Tablas

Tabla 1. Problemática de falta de agua y fugas en el Sector 1. (Fuente: Elaboración propia)	50
Tabla 2. Relación de volúmenes y dotaciones en el año 2022 del Sector 1. Fuente: Elaboración propia de Valencia (2023).	51
Tabla 3. Problemática de falta de agua y fugas en el Sector 2. (Fuente: Elaboración propia)	52
Tabla 4. Relación de volúmenes y dotaciones en el año 2022 del Sector 2. Fuente: Elaboración propia de Valencia (2023).	53
Tabla 5. Problemática de falta de agua y fugas en el Sector 3. (Fuente: Elaboración propia)	54
Tabla 6. Relación de volúmenes y dotaciones en el año 2022 del Sector 3. Fuente: Elaboración propia de Valencia (2023).	55
Tabla 7. Problemática de falta de agua y fugas en el Sector 4. (Fuente: Elaboración propia)	56
Tabla 8. Relación de volúmenes y dotaciones en el año 2022 del Sector 4. Fuente: Elaboración propia de Valencia (2023).	57
Tabla 9. Problemática de falta de agua y fugas en el Sector 5. (Fuente: Elaboración propia)	58
Tabla 10. Relación de volúmenes y dotaciones en el año 2022 del Sector 5. Fuente: Elaboración propia de Valencia (2023).	59
Tabla 11. Recorrido y ubicación de infraestructura subterránea en Sector 4. (Fuente: Elaboración propia)	67
Tabla 12. Detección de suelo húmedo con el uso de GPR, Sector 5. (Fuente: Elaboración propia)	69



vi. Índice de Figuras

Figura 1. Cobertura de redes de agua potable en México (IMTA, 2019).....	14
Figura 2. Esquema de eficiencia total de la calidad del servicio de agua potable (CONAGUA, 2012).	15
Figura 3. Ensayo de laboratorio. (a) Tubería enterrada, (b) placa de polipropileno y antena de GPR de 1.5 GHz, (c) configuración de malla de muestreo (Ocaña et al., 2017).	19
Figura 4. Pérdidas por fugas en redes de agua potable (Milenio, 2019).	23
Figura 5. Detección física de fugas en redes por método destructivo (Cárdenas, 2012).	23
Figura 6. Método no destructivo de detección de fugas (Proyectos SIG Integrados S.L., 2022).	24
Figura 7. Relación entre producción y volumen de agua perdida (Fuente: Elaboración propia).....	25
Figura 8. Volúmenes de pérdidas en bloques (GIZ, 2010).	29
Figura 9. Volumen de pérdidas reales (NRW) en lps (Fuente: Elaboración propia).....	30
Figura 10. Funcionamiento de GPR (EGV, 2020).	33
Figura 11. Diagramas resultados de GPR en zona con y sin fuga (Rodríguez, 2005).	35
Figura 12. GPR utilizado en la presente investigación. (Propiedad de la JMAS de Chihuahua)	38
Figura 13. GPR aplicado en Fraccionamiento Circuito Magenta, ciudad de Chihuahua (2022)	39
Figura 14. Macrolocalización de la zona de la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).	39
Figura 15. Fisiografía de la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).	41
Figura 16. Sistemas de topofomas en la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).	42
Figura 17. Clima de la ciudad de la Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).	43
Figura 18. Tipo de suelo de la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).	44
Figura 19. Uso de suelo y vegetación en la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).	45
Figura 20. Hidrografía de la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).	46
Figura 21. Sectores seleccionados en la ciudad de Chihuahua para aplicación de GPR. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).	48
Figura 22. Representación de fugas en Sector 1. (Valencia, 2023).	51
Figura 23. Representación de fugas en Sector 2. (Valencia, 2023).	53
Figura 24. Representación de fugas en Sector 3. (Valencia, 2023).	55
Figura 25. Representación de fugas en Sector 4. (Valencia, 2023).	57
Figura 26. Representación de fugas en Sector 5. (Valencia, 2023).	59
Figura 27. Datos, resultados y localización Sector 1 (Fuente: Elaboracion propia)	62
Figura 28. Datos, resultados y localización Sector 2 (Fuente: Elaboracion propia)	63
Figura 29. Ubicación de infraestructura subterránea en Sector 3.- (Fuente: JMAS, 2022)..	64



Figura 30. Levantamiento de ubicación de infraestructura subterránea en Sector 3. (Fuente: JMAS, 2022).....	64
Figura 31. Datos, resultados y localización Sector 3 (Fuente: Elaboracion propia)	65
Figura 32. Croquis de localización de estudio de ubicación de infraestructura subterránea, Sector 4. (JMAS, 2022)	66
Figura 33. Simbología para interpretación de ubicación de infraestructura subterránea, Sector 4. (JMAS, 2022)	67
Figura 34. Ubicación de Fraccionamiento Circuito Magenta (Fuente: Elaboracion propia).....	68
Figura 35. Excavación de suelo seco en Fraccionamiento Circuito Magenta (Fuente: Elaboracion propia)	70



“DETECCIÓN DE FUGAS EN REDES DE AGUA POTABLE MEDIANTE GPR, EN LA CIUDAD DE CHIHUAHUA”

I. Introducción

Tanto es el valor del agua para el Ser humano que además de ser indispensable para su vida, forma parte de él mismo, ocupando un 60% de su cuerpo.

A pesar de ser el líquido vital, en la actualidad se observa un insostenible consumo del mismo a nivel mundial, debido a que la importancia y los esfuerzos que se han realizado para su buena gestión y preservación es poca, conforme avanzan las generaciones. Las investigaciones relacionadas con la problemática del agua comenzaron con el siglo XIX, cuando diversos investigadores como Horton y Gumbel utilizaron el análisis racional para resolver problemas hidrológicos (Tisnado et al., 2018) y en comparación con otras ciencias, el estudio de la hidrología es reciente.

El cuidado del agua, adquiere más importancia cuando la alteración del Ciclo Hidrológico es evidente; es decir este fenómeno es estudiado cuando ya hay un impacto negativo en su proceso de forma cuantitativa o cualitativa; así las investigaciones en relación a la disponibilidad del líquido, se inician cuando se presenta el desabasto.

La inercia del descuido en el manejo del recurso, se ha reflejado en un consumo y gestión insostenibles, derivados ambos de una creciente sobreexplotación, derroche y contaminación, entre otras actividades antropogénicas que no han sido resueltas o abordadas de manera asertiva.

Uno de los principales problemas en el manejo del agua, se encuentra en las redes de distribución de los sistemas de agua potable, donde una vez identificadas se pueden realizar acciones de prevención y reducción de pérdidas.



1.1 Antecedente

En el campo de aplicación para estudios de abastecimiento en los sistemas de agua potable, se advierten pérdidas físicas de aproximadamente 40% en la distribución del gasto total suministrado, de acuerdo a la información publicada del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2019). El Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO) propuesto por el IMTA es una herramienta útil para determinar los indicadores de eficiencia de un sistema público de redes en sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento. En él se puede observar la información proporcionada por cada organismo operador, que participa en este programa y la envía al IMTA para su procesamiento.

Para el año 2019, el PIGOO arroja los siguientes resultados:

El 95% de la población nacional cuenta con sistemas de distribución de redes de agua potable, la localización se muestra en la Figura 1; el 84.6% de los Organismos Operadores (OP) cuenta con la cartografía de su sistema de redes de distribución, y el levantamiento catastral de redes, infraestructura e instalaciones de agua potable existentes. El 86.7% de los OP tiene capacidad de medición del total real de agua que suministra a la población, es decir que cuenta con macro medición; asimismo, solo el 6.17% de los OP cuenta con la capacidad para medir el agua consumida por los usuarios, es decir que cuenta con micro medición.

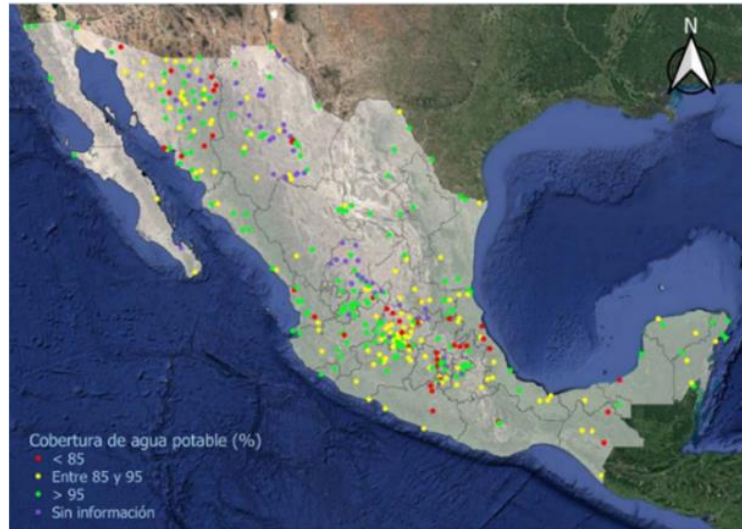


Figura 1. Cobertura de redes de agua potable en México (IMTA, 2019)

Sin considerar las pérdidas de agua, derivadas a las fugas en las redes de distribución y en las tomas domiciliarias, el consumo real promedio de agua es de 202 l/Hab/d; el valor mínimo es de 77 l/Hab/d y el máximo 521 l/Hab/d, estadísticas de los organismos participantes en el PIGOO.

De los datos más preocupantes, se estima que es el valor máximo de pérdidas de agua en las redes de agua potable a nivel nacional por kilómetro es de 467,825 m³/km, y en promedio a nivel nacional es 29,472 m³/km.

La eficiencia global o total de un sistema de redes de abastecimiento de agua potable es de 44.8% a nivel nacional (IMTA, 2019), calificando de manera cualitativa las actividades de captación, conducción, regularización, potabilización, y distribución del agua proveniente de una fuente natural hasta llegar a la población (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2012). La eficiencia total de la calidad del servicio de agua potable se compone de tres diferentes escenarios como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Esquema de eficiencia total de la calidad del servicio de agua potable (CONAGUA, 2012).

Los tres escenarios que componen la eficiencia total de una red de distribución de agua potable son 1) desarrollo institucional, 2) comercialización del servicio e 3) ingeniería de producción y distribución.

Al utilizar de forma no vinculada estos tres componentes, provoca baja eficiencia en el servicio. A continuación, se describen los componentes:

- 1) Desarrollo institucional: trata la importancia de contar en un Organismo Operador con la atención financiera e institucional, mejorando la capacidad técnica del personal, adquiriendo orden de administración gerencial, así mismo, hacer buen uso del recurso humano y mantener buena comunicación a nivel institucional;
- 2) Comercialización del servicio: pretende regular desatención a problemas de uso clandestino, aumentar cobertura de micro medición, clasificar e identificar los usos del agua, cuidar el recurso financiero, contar con esquemas tarifarios justos, disminuir materiales y equipos de mantenimiento e integrando lo anterior, mejorar la cultura del agua de la sociedad;



- 3) Ingeniería de producción y distribución: aspira a disminuir los tandeos a la población, entregar con suficiente presión, disminuir el consumo de energía eléctrica en los equipos de bombeo que alcanza hasta el 35% de los ingresos del Organismo Operador, cuidar que el agua de las tomas domiciliarias sea siempre potable, y la disminución de fugas en las redes de distribución que alcanza hasta el 50% del volumen suministrado (CONAGUA, 2012).

Con lo anteriormente expuesto, se determina que es necesario mejorar la eficiencia del abastecimiento con la aportación de estudios e investigaciones en el cuidado y manejo de las redes de agua potable, aportar en el campo físico de ingeniería de producción y distribución, para ayudar a revertir la escasez del agua y cuidar el recurso para las futuras generaciones, precisando evitar el desperdicio de agua en redes.

1.2 Estado del Arte

La detección de fugas en redes de agua potable mediante el uso de Radar de Penetración Terrestre “GPR” por sus siglas en inglés, es una técnica que ha demostrado ser una herramienta basada en la emisión y detección de ondas electromagnéticas que permite analizar la subsuperficie y detectar anomalías, como fugas o roturas en las tuberías de agua.

La aplicación del GPR en la detección de fugas en redes de agua potable ha sido objeto de numerosos estudios e investigaciones. Por ejemplo, en un estudio realizado por (Aguilar, et al., 2018), se utilizó el GPR para la detección de fugas en una red de agua potable en México. Los resultados mostraron que el GPR fue capaz de identificar y localizar con precisión las fugas en las tuberías.

Otro estudio realizado por (Mora Morales, et al., 2019) evaluó la efectividad del GPR en la detección de fugas en una red de agua potable en Costa Rica. Los resultados indicaron que el GPR fue capaz de detectar y localizar con éxito las fugas, lo que permitió una intervención temprana y reducción de pérdidas de agua.



Estos estudios y otros similares han demostrado la utilidad y eficacia del GPR en la detección de fugas en redes de agua potable, lo que puede contribuir a la conservación de este recurso vital y la mejora en la gestión de los sistemas de distribución de agua.

Este estudio se enfoca en determinar si el GPR es una herramienta eficaz en la detección de las pérdidas reales o pérdidas físicas de agua en redes de distribución cuando el sistema está presurizado y contabilizado hasta el punto de micro medición por parte del usuario y/o definir como el GPR pudiera ser empleado para apoyar en la búsqueda de fugas no visibles.

En la actualidad existe un gran impulso para el manejo e interpretación de imágenes como una técnica con mayor cobertura y rapidez de aplicación, este estudio se focaliza en particular en el uso de GPR, cabe destacar que este trabajo, es de aplicación operativa, con lo que se intenta verificar y/o vincular de la mayoría de los trabajos, que hay en la actualidad, los cuales se concretan a estudios experimentales y de laboratorio.

A continuación, se describen los trabajos más importantes relacionados con el tema de esta investigación.

La eficacia del GPR, en la localización de fugas para la rehabilitación de redes de abastecimiento de agua potable, se ha utilizado considerando como resultado, que en constantes dieléctricas diferentes, la atenuación de la señal aumenta conforme aumenta la constante por el alto ruido, lo cual no ha sido expuesto en casos reales, ya que lo anterior ha sido aplicado en ensayos de laboratorio, donde casi todos los cambios son más fáciles de ser identificados debido a que los datos son más controlados. (Tavera, 2008).

Los ensayos de la aplicación de GPR en laboratorio, fueron en dos tuberías de PVC (policloruro de vinilo), donde se buscó la comparativa de dos tuberías con el mismo diámetro, misma condición de operación (flujo, caudal, velocidad y presión), una de las tuberías se utilizó como blanco, es decir al no tener fugas, se comparó las imágenes que arrojaba la otra tubería donde, sí se tenía presente fuga y pérdida de volúmenes de agua; se concluyó que es difícil interpretar los resultados en imágenes bruto, y que los datos, contienen diferencias



significativas al introducir agua en la tubería. Así mismo, este trabajo que el preprocesamiento hace más fácil la visualización de características que no reflejadas en las imágenes en bruto (Ayala et al., 2013).

Este trabajo también propone un método para formular un ajuste en el valor del índice estructural de fugas en la Sierra Ecuatoriana, utilizando el GPR y considerando el periodo paso del tiempo en las tuberías desde el año 2008 al 2016. Se demostró que este índice depende también del período de servicio del sistema de redes de distribución de agua (Benavides & García, 2019).

Existen diferentes metodologías de detección de fugas, por ejemplo: el balance de agua en el sistema, el transitorio inverso, la respuesta a la frecuencia, las técnicas eléctricas, los métodos de calibración; y las metodologías de localización más utilizadas: geófonos, correladores acústicos, trazadores con gases, termografía, radar de penetración de suelo, sustancias radioactivas y las cámaras de video (Rodríguez, 2005).

Rodríguez enfatiza en la metodología de trazadores con gases para localización de fugas, este método se utiliza en casos donde los métodos acústicos son ineficientes, en sistemas de baja presión o con tuberías no metálicas. Su implementación es muy costosa y de larga duración, además de que no es precisa por el tiempo que toma el gas recorrer el sistema y cuando comienza a salir por la fuga, en ocasiones no se encuentra, debido a que el radio que detecta la presencia del gas es de aproximadamente de un metro (Rodríguez, 2005).

En el siguiente trabajo se presenta un ensayo realizado en laboratorio en la

Figura 3, en el cual se obtuvieron imágenes de GPR, empleando un tanque de madera de $1 \times 1 \times 0.6$ m, lleno de material seco. Para la simulación de fuga se colocó dentro del tanque tubería de PVC perforada, de 0.95 m de longitud x 100 mm de diámetro.

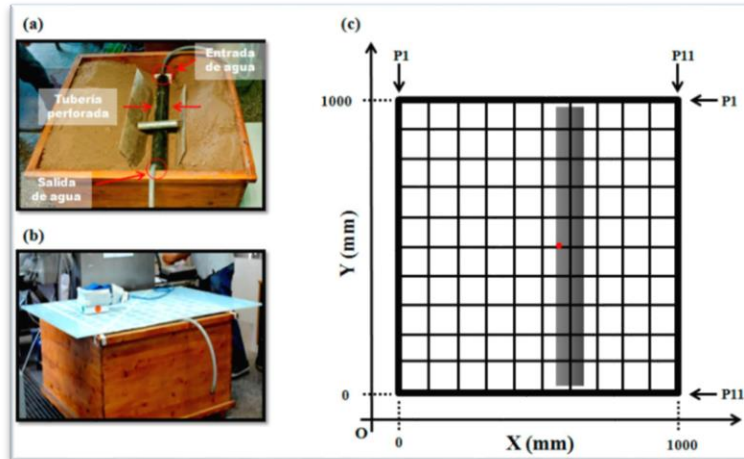


Figura 3. Ensayo de laboratorio. (a) Tubería enterrada, (b) placa de polipropileno y antena de GPR de 1.5 GHz, (c) configuración de malla de muestreo (Ocaña et al., 2017).

Se concluye que el GPR es una herramienta poderosa que permite localizar fugas en sistemas de abastecimiento de agua. En este trabajo se aplicaron los métodos de sustracción y el filtrado de varianza que son de sencilla aplicación y que permitieron facilitar la interpretación en los datos de GPR e identificar características que no son fácilmente visibles en imágenes en bruto, asimismo ambos métodos permiten una visualización clara de la fuga y su ubicación puntual. Adicionalmente, el filtrado de varianza permite delimitar bordes, lo cual facilita la clasificación de los materiales presentes en la imagen. Finalmente, las formas localizadas en este proceso sirven como base para la creación de un sistema de análisis de datos que permita localizar características de este tipo automáticamente (Ocaña et al., 2017).

En este trabajo se demuestra que es posible identificar diferentes materiales en imágenes GPR, es posible reconocer no solo las tuberías sino también objetos. En un estudio de un caso urbano, se ha planteado la necesidad de evaluar los sistemas de localización espacial más fiables, evitando la incertidumbre de la capacidad de localización de objetos. Tal es el caso de la posición desplazada de la tubería con respecto al lugar de medición en el campo. El estudio en mención permite ver cómo los objetos se agrupan verticalmente como familias de curvas, que no son líneas rectas horizontales dentro de las imágenes. Este caso ha demostrado la viabilidad de obtener representaciones 3D, mediante el método de GPR siendo



un método no destructivo, facilitando la comprensión de las zonas estudiadas (Ayala et al., 2016).

En el siguiente trabajo se utilizó una técnica de contraste a nivel laboratorio en el tiempo inicial y en el tiempo final de la fuga para analizar las características del agua filtrada y observar el registro de las fugas en las imágenes GPR, también fue posible identificar la integración del sistema, así como el punto por donde se escapaba el agua. Se comparó esta práctica de laboratorio con la aplicación en un entorno real y se determina que las condiciones experimentales, cuando no son controladas, no proporcionan una imagen inicial que permita el contraste de imágenes. También en este trabajo, se evaluó la factibilidad de la caracterización de componentes de los sistemas de abastecimiento de agua, mediante el análisis de imágenes obtenidas por GPR, mostrando efectividad para la detección en la tubería con fugas. Los resultados de GPR en el medio urbano (es decir donde se encuentra las superficies de rodamientos cubierta con pavimento o concreto), mostraron gran similitud con los contrastes realizados con los datos brutos, para proporcionar representaciones 3D, lo que permitió una mejor comprensión de la información obtenida en imágenes 2D (Ayala, 2015).

En el siguiente estudio, se muestra la propagación del tiempo de fuga a través del subsuelo en condiciones de laboratorio, utilizando una tubería perforada de PVC, mediante la interpretación de imágenes GPR. En este trabajo fue posible la extracción de patrones relevantes ya que las interpretaciones del GPR permiten obtener superficies y volúmenes fácilmente en el análisis de datos brutos. Los resultados de este estudio ayudan a promover las técnicas de validación de modelos para la generación, distribución y predicción de fugas de agua en sistemas de abastecimiento utilizando GPR como método no destructivo (Ayala et al., 2014).

El siguiente estudio se focaliza en los métodos no destructivos que son de fácil de aplicación y que permiten una rápida visualización de los componentes de los sistemas de redes abastecimiento de agua de imágenes obtenidas con GPR. Se toma como base el análisis



e interpretación de la amplitud de onda, aplicando luego una serie de correcciones de imagen y de forma que mejora la visualización y manejo de los datos, resultando que es posible la representación de tuberías enterradas de manera eficiente. El objetivo es generar conocimientos para poder ensayar sistemas inteligentes para la caracterización de componentes de sistemas de abastecimiento (Ayala et al., 2014).

En este estudio se aborda la problemática de fugas en redes de distribución de agua potable empleando GPR como método no destructivo. El trabajo consistió en realizar pruebas de laboratorio para extraer las características de fugas de agua de las imágenes GPR obtenidas, también se comparó los resultados con una prueba ejecutada en un sistema real urbano. Se extrajeron las características con las que se interpretan las imágenes GPR con el apoyo de una metodología de preprocesamiento sobre la base de una combinación adecuada de métodos estadísticos y sistemas multiagente (Ayala et al., 2013).

En esta investigación se analizan los errores, evaluando las principales variables responsables de estos y hasta qué punto la simplificación es válida, los modelos matemáticos simplificados utilizados en redes de distribución de agua derivan diversos niveles de granularidad, en este caso la demanda, en concreto, cuando el consumo es asociado a una línea son igualmente asignados a los extremos de la línea con un error mínimo, finalmente, se evalúan los errores asociados a la simplificación y localizar de los puntos de una recta donde se producen las máximas discrepancias (Izquierdo, 2013).

Se han utilizado múltiples agentes para la interpretación y análisis de las características de los componentes del sistema de suministro de agua, trabajando en una recopilación de archivos de levantamiento de GPR. En este trabajo se empleó el algoritmo multiagente basado en la Teoría de grafos. La entrada consiste en el resultado de la encuesta de radargrama GPR y la salida son puntuaciones que se describen los movimientos de los agentes. Este análisis permite una determinación simple de las propiedades electromagnéticas en un sistema subterráneo y proporciona una clasificación de estas propiedades. Este algoritmo agrupa y, por lo tanto, disminuye el número de puntos que



componen el radargramas; conservando al mismo tiempo sus principales propiedades y permitiendo una mayor claridad vistas de tuberías y una mejor identificación de los componentes en el sistema de suministro de agua (Ayala et al., 2011).

En este trabajo se propone una herramienta para examinar el trazo y las características de los sistemas de abastecimientos urbanos de agua. Para ello, se emplean imágenes subterráneas obtenidas con GPR como método que no altera las condiciones del sistema y las características ambientales o sea métodos no destructivos. El resultado se centra en la amplitud de onda y en una manipulación matricial intensiva y debido a que la metodología es no subjetiva, visualiza tuberías enterradas con eficiencia. Esta herramienta ayuda a los gerentes del sistema de abastecimiento de agua a obtener información más precisa en imágenes de abastecimiento de agua y con esto, brindar un mejor servicio a los usuarios (Ayala et al., 2010).

II. Planteamiento del Problema

La operación del sistema de abastecimiento de agua potable en el la Ciudad de Chihuahua, presenta al igual que innumerables ciudades de Latinoamérica, desarticulación entre el crecimiento en las redes y la información actualizada de estas tuberías, tanto en instalación como en reemplazo; lo que provoca que no se cuente con un respaldo técnico sólido, para prevenir las fallas en la infraestructura y programar acciones preventivas, uno de los puntos clave es la actualización de catastro de las redes del sistema de agua.

En resumen, la operación de redes, se realiza día a día, donde los operarios transfieren su experiencia y sus supuestos a quienes le suplen, es decir de manera empírica por los Organismos Operadores del Estado de Chihuahua a través de sus Juntas Municipales de Agua y Saneamiento; ya que las actividades diarias absorben al operario y casi nunca se tienen mecanismos de retroalimentación entre las acciones de campo y de actualización de catastro.



Para disminuir este problema, se debe establecer, cuales son la base de los datos básicos de cálculo, que se deben actualizar como: dotación, horas de servicio al día, consumo, calidad del agua y a su vez, planear y hacer los estudios necesarios para mejorar la eficiencia, rehabilitación de tuberías y eliminar en lo posible, el desperdicio en las redes de distribución.



Figura 4. Pérdidas por fugas en redes de agua potable (Milenio, 2019).

Una de las alternativas propuestas con la presente tesis, es la actualización de catastro enfocado en la detección de fugas, para evitar las acciones reactivas, es decir, afrontar los problemas como falta de suministro y/o la baja presión en la red, que por lo general son reportadas por los usuarios, previniendo las pérdidas por conducción de redes como se aprecia en la Figura 4.



Figura 5. Detección física de fugas en redes por método destructivo (Cárdenas, 2012).



Las diferentes técnicas de detección de fugas tienen cierta incertidumbre en sus resultados y un grado de complejidad en su aplicación, por ejemplo, la búsqueda física en la apertura de zanjas como en se aprecia en Figura 5, tiene un alto valor económico, es por eso que los métodos no destructivos o técnicas no directas son cada vez más frecuentes.

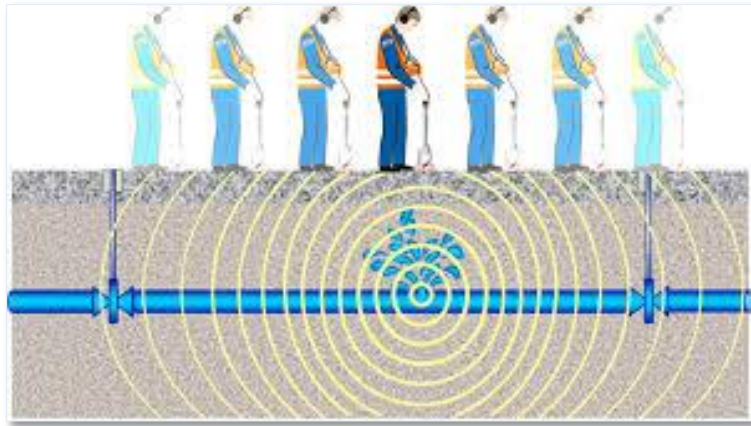


Figura 6. Método no destructivo de detección de fugas (Proyectos SIG Integrados S.L., 2022).

Los métodos no destructivos como la Figura 6, reducen tiempo y costo en la detección de fugas, sin embargo, es necesaria la cuestión operativa, es decir, contar con un conocimiento previo y determinar una metodología adecuada de detección para obtener un resultado eficaz, asimismo hacer un posterior análisis, correlación calibración de resultados indirectos para tener volúmenes de pérdida reales, de los datos encontrados en el campo.

2.1 Justificación

Las estrategias de gestión de agua por los Organismos Operadores en redes de distribución de consumo humano, se han enfocado únicamente en la gestión de la oferta, como respuesta al incremento de la población, para cubrir las necesidades de estos requerimientos, es decir se adicionan volúmenes de agua para la satisfacción de las necesidades de los usuarios, sin considerar que el incremento de volúmenes de agua en redes



de distribución, también incrementa el volumen de agua perdida “NRW” por sus siglas en inglés, como se aprecia en Figura 7.

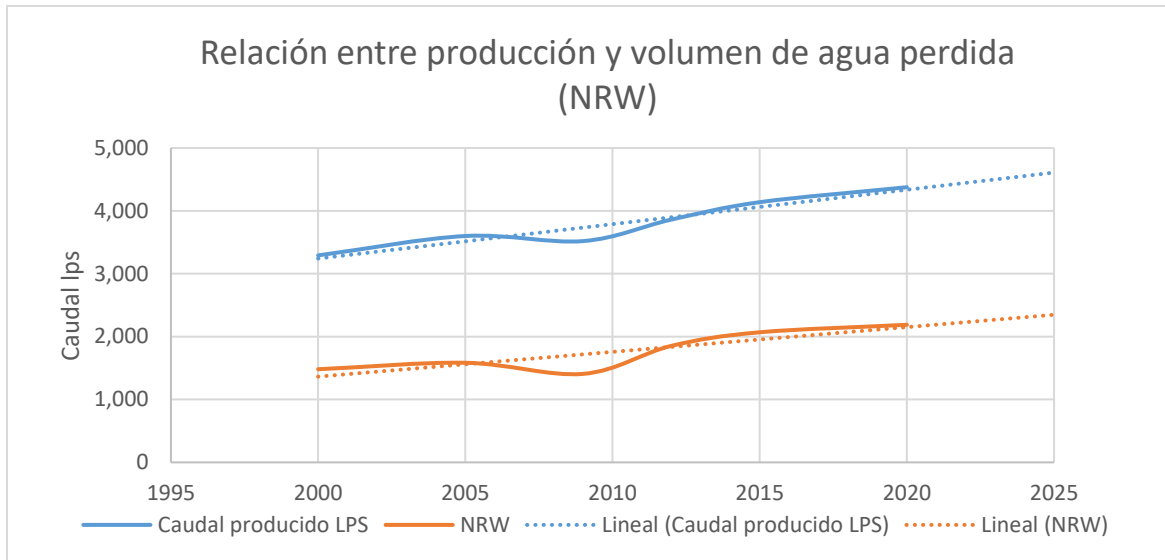


Figura 7. Relación entre producción y volumen de agua perdida (Fuente: Elaboración propia)

Por lo tanto, sin un eficaz enfoque, rara vez estos volúmenes de agua adicionales llegan a solucionar los posibles “déficits”, más aún sin identificar donde se generan las fugas y por ende los volúmenes de agua perdida, no solo no se disminuyen, sino al contrario se incrementan.

Por todo lo anterior, es conveniente realizar trabajos de campo para lograr identificar cuáles son pérdidas de agua visible y no visible, así como contar un programa de control activo de fugas y lograr la implementación de la detección de fugas mediante equipos no solo a nivel laboratorio, como el que se propone en este trabajo investigación.



2.2 Hipótesis

Es posible evaluar la eficacia de los métodos indirectos y no destructivos, como el uso del Radar de Penetración Terrestre (GPR), en la detección de fugas en redes de distribución de agua potable.

2.3 Alcances y Objetivos

El alcance de este trabajo es poder correlacionar la información existente en sectores de la ciudad de Chihuahua, donde se han registrado fallas en la infraestructura y con ello fugas no visibles, con la consecuencia de pérdidas de volúmenes de agua.

Esto permitirá identificar, cual es la factibilidad de detectar y localizar dichas fugas en los sistemas de tuberías de distribución mediante el procesamiento e interpretación de imágenes obtenidas mediante el uso del Radar de Penetración Terrestre (GPR). Además, poder identificar si estas fugas tienen un patrón operativo, derivado de la política de operación de suministro de agua, pasando de un sistema intermitente a un suministro continuo en la ciudad de Chihuahua.

2.4 Objetivo General

Evaluar la eficacia de los métodos indirectos y no destructivos, como el uso del Radar de Penetración Terrestre (GPR), en la detección de fugas en redes de distribución de agua potable.



2.5 Objetivos Particulares

1. Seleccionar un(os) sector(es) específico(s), de la red de distribución de agua potable donde se tiene evidencias de fugas para llevar a cabo el estudio.
2. Definir los puntos de inspección con el GPR, en los sectores seleccionados.
3. Aplicar y recolectar datos mediante la utilización del Radar de Penetración Terrestre (GPR) en el sector seleccionado.
4. Analizar y procesar las imágenes y datos obtenidos con el GPR para identificar y localizar las posibles fugas presentes en la red de distribución.
5. Evaluar la factibilidad y viabilidad de implementar el uso del GPR como método de detección de fugas en la red de distribución de agua potable.

III. Marco Teórico

Las pérdidas de agua en los sistemas de redes de abastecimiento y distribución de agua potable en una ciudad pueden ser clasificadas en diferentes categorías. Además de las pérdidas visibles y no visibles, existe otra clasificación de los volúmenes de agua perdida en estos sistemas, que se describen a continuación.

- **Pérdidas físicas:** Estas pérdidas se refieren a fugas o roturas en las tuberías y conexiones del sistema de distribución de agua potable. Estas fugas pueden ser causadas por desgaste, corrosión, impactos externos u otros factores. Las pérdidas físicas pueden ser detectadas mediante técnicas de inspección visual, escucha acústica o tecnologías más avanzadas como el Radar de Penetración Terrestre (GPR) (Aguilar, et al., 2018).
- **Pérdidas de conexión:** Estas pérdidas ocurren debido a conexiones defectuosas o inadecuadas entre las tuberías y los accesorios del sistema de distribución. Estas



conexiones defectuosas pueden generar fugas o filtraciones que resultan en una pérdida de agua. La detección de estas pérdidas puede requerir inspecciones detalladas y pruebas de presión en las conexiones (Farley & Trow, 2003).

- Pérdidas por sobrepresión: Este tipo de pérdidas ocurren cuando la presión del agua en el sistema de distribución es demasiado alta, lo que puede provocar fugas en las tuberías o accesorios. La regulación adecuada de la presión del agua es fundamental para prevenir estas pérdidas (Farley & Trow, 2003).
- Pérdidas por derroche o mal uso del agua: Estas pérdidas se deben al uso ineficiente o innecesario del agua por parte de los consumidores. Pueden incluir actividades como el riego excesivo, el lavado de aceras o vehículos, o la falta de reparación de grifos y sistemas de plomería defectuosos. La concientización y educación sobre el uso responsable del agua son clave para reducir estas pérdidas (Farley & Trow, 2003).

3.1 Pérdidas Reales

El Grupo de Trabajo en Pérdidas de Agua de la International Water Association (IWA, 2003) definió en el año 2003 los cuatro principales métodos de intervención para abordar las pérdidas reales de agua. La Figura 8 ilustra que, dentro de los volúmenes de pérdidas reales, se pueden identificar tres categorías principales. Específicamente, las pérdidas en las tuberías de agua se componen de: 1) pérdidas reales potenciales recuperables; dentro de estas se incluyen las 2) pérdidas reales anuales inevitables en función del 3) nivel económico de rentabilidad para su recuperación. Esto implica que resulta mucho más costoso buscar y recuperar el volumen de las pérdidas reales anuales inevitables en comparación con su propia pérdida (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH [GIZ], 2010).

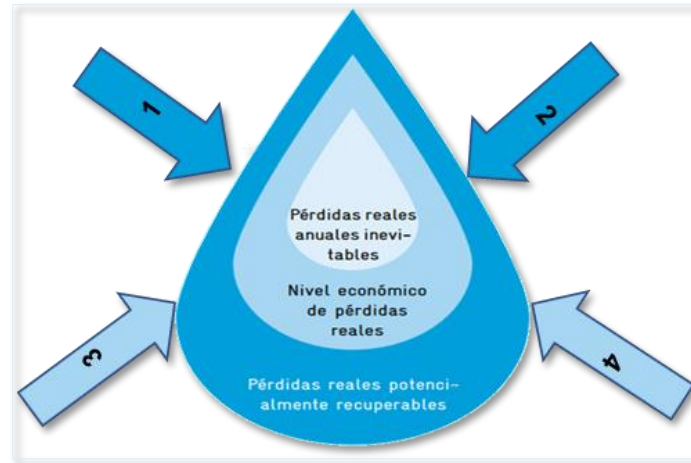


Figura 8. Volúmenes de pérdidas en bloques (GIZ, 2010).

En la lucha contra las pérdidas reales de agua en los sistemas de distribución, se han identificado varios métodos principales de intervención.

Estos métodos incluyen:

- 1) la gestión de la presión,
- 2) la detección activa de fugas,
- 3) la rapidez y calidad de las reparaciones en la red, y
- 4) la gestión de la infraestructura

En el presente estudio, se centrará en el segundo método, la detección activa de fugas, con el objetivo de evaluar su aplicabilidad y el impacto que puede generar en la recuperación de pérdidas de volúmenes de agua (reales).

Las pérdidas reales se refieren al volumen anual de agua perdida a través de distintos tipos de fugas en la red de distribución. Estas pérdidas están determinadas por la frecuencia, los caudales y la duración promedio de cada fuga individual.

La medición de las pérdidas reales en redes de agua potable tiene como objetivo mejorar la eficiencia en el uso del recurso, lo cual es fundamental para lograr la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, la falta de datos confiables para generar información y realizar análisis precisos ha llevado a que los Organismos Operadores tomen decisiones basadas en suposiciones o soluciones empíricas.



Dada la escasez de estudios de campo o investigaciones en tramos de tuberías urbanas, este trabajo de investigación busca contribuir a la generación de conocimiento en este campo. Se pretende aportar a la mayoría de los trabajos existentes, que se basan en experimentos a escala reducida o en laboratorio.

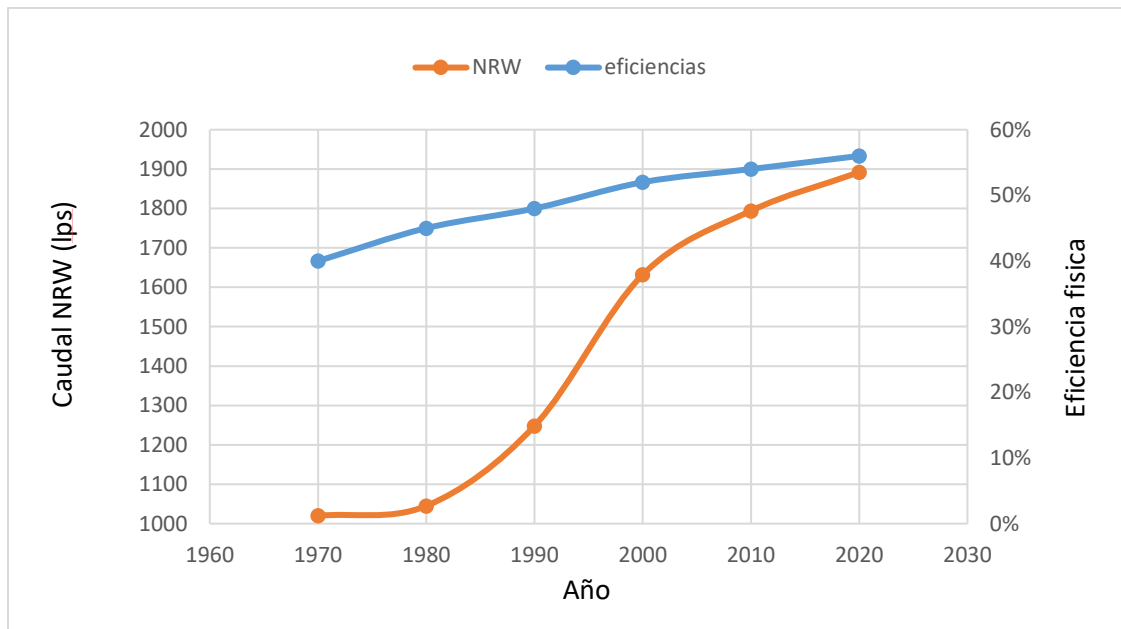


Figura 9. Volumen de pérdidas reales (NRW) en lps (Fuente: Elaboración propia)

La Figura 9 ilustra la relación entre el volumen de pérdidas reales (NRW) y la eficiencia física a lo largo de las décadas en la ciudad de Chihuahua. Esta visualización permite comprender la magnitud de las pérdidas, estimándose un déficit en el suministro de agua potable en la ciudad de aproximadamente 800 a 1200 lps (litros por segundo), que corresponde aproximadamente al volumen de pérdidas reales.

3.2 Detección de Fugas

Detección de fugas en redes de agua potable: Se pueden explorar diferentes métodos y técnicas utilizados para la detección de fugas en sistemas de distribución de agua potable. Esto puede incluir técnicas tradicionales, como la inspección visual y la escucha acústica, así



como técnicas más avanzadas, como el uso de tecnologías no destructivas como el Radar de Penetración Terrestre (GPR) (Aguilar, et al., 2018).

En la detección de fugas en redes de agua potable, se han desarrollado diversos métodos y técnicas para identificar y localizar las fugas de manera efectiva. Las 6 técnicas o métodos más utilizados para saber si se está produciendo una fuga o encontrar en qué punto está pasando son (LOGITEK, 2022):

1. Medir el caudal
2. Medir la presión.
3. Medir el ruido (acústicos)
4. Medir la vibración
5. Visión termográfica
6. Visión y clasificación de la humedad

Estos métodos permiten monitorizar y detectar tanto fugas visibles como invisibles, lo que resulta crucial para la gestión y conservación del recurso hídrico.

En primer lugar, la medición del caudal se utiliza para comparar los caudales de entrada y salida en cada segmento de la red y determinar si existe una fuga (LOGITEK, 2022). La medición de la presión también es una técnica utilizada, ya que una fuga provoca una caída de presión en el tramo afectado. Esta medición puede realizarse de manera más sencilla y económica que la medición del caudal (LOGITEK, 2022).

Además, existen métodos basados en la medición del ruido generado por el agua al escapar por una grieta o junta de la tubería. Aunque es un método efectivo para encontrar el punto exacto de una fuga, su aplicación como monitorización continua puede ser costosa debido a la tecnología necesaria para distinguir el ruido de la tubería del ruido del entorno (LOGITEK, 2022).

La medición de la vibración en los extremos de los tramos de tubería también puede indicar la presencia de una fuga, ya que la presión del agua provoca que la tubería tiemble (LOGITEK, 2022). Otro enfoque utilizado es la visión termográfica, que permite identificar



visualmente el punto específico de la fuga al detectar las diferencias de temperatura causadas por el escape de agua (LOGITEK, 2022).

Por último, la visión y clasificación de la humedad en el suelo colindante a la tubería es otro método utilizado. Esta técnica proporciona información constante sobre el nivel de humedad y puede ser útil para estudios ambientales (LOGITEK, 2022).

Los primeros tres métodos son ampliamente utilizados en la actualidad, el cuarto y el quinto presentan gran dificultad para su aplicación en redes de distribución de agua potable. Este método está dentro del sexto grupo de visión y clasificación de la humedad.

En este estudio, se empleará el Radar de Penetración Terrestre (GPR) como método de localización puntual de fugas en redes de abastecimiento de agua potable. El GPR permite identificar los contrastes entre el agua fugada y el suelo circundante mediante imágenes (radargramas) generadas a partir de las diferencias en las propiedades dieléctricas (Ayala, 2014).

Los métodos más usados en Latinoamérica son: las mediciones de caudal, presión y métodos acústicos, aunque su uso es ampliamente conocido, no existen muchas evidencias en publicaciones técnicas, pero su efectividad está ampliamente difundida dentro de los organismos operadores que utilizan la detección de fugas.

La detección de fugas, es una tarea compleja, debido a que, en la mayoría de las veces, las fugas son detectadas cuando los daños en la red son muy considerables, y esto trae consigo altos costos sociales y económicos. En este sentido, los métodos no destructivos pueden ser una respuesta a esta problemática, con el fin de encontrar las fugas de agua cuando aún son mínimas y resolver el problema mediante la implementación de una estrategia integral de acción (Ayala et al., 2014).

La técnica de GPR al igual que las técnicas acústicas y de termografía infrarroja se considera no destructiva y son las más empleadas en la localización de fugas. El GPR, se muestra como una efectiva herramienta, que favorece la inspección de las redes al demarcar



en imágenes (Radargramas) los contrastes del agua fugada y el suelo circundante, debido a las diferencias en sus características dieléctricas.

3.3 Fundamentación Teórica del GPR

Se puede describir el funcionamiento básico del GPR, que se basa en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas para analizar la subsuperficie y detectar anomalías, como fugas o roturas en las tuberías de agua (Mora Morales, et al., 2019).

La metodología del Radar de Penetración Terrestre (GPR) se fundamenta con la creación de pequeñas ráfagas de energía electromagnética desde un origen, que normalmente se encuentra en la superficie del terreno, hacia un dispositivo que recibe una señal que también se encuentra en la superficie del terreno. Tal como se aprecia en la Figura 10

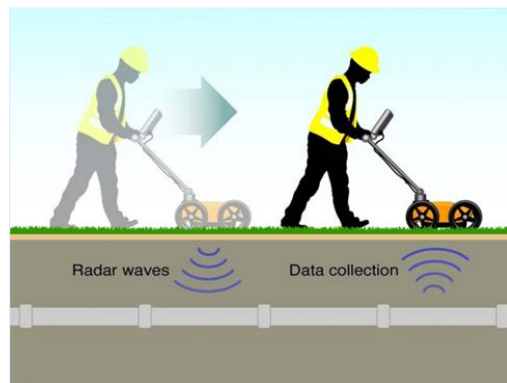


Figura 10. Funcionamiento de GPR (EGV, 2020).

Las reflexiones en el subsuelo con el uso del GPR, están en función del contenido de agua y la conductividad mineral, los cuales son el resultado de la fuerza de onda, que es creada por el reflector y por la naturaleza de la superficie. Para ejemplificar se esperan ondas fuertes en superficies suaves, como tuberías metálicas enterradas y ondas débiles en superficies rugosas; asimismo el resultado de una pulsación débil es la presencia de arcilla o suelos abajo del nivel freático. Para el empleo de este método, se espera que el suelo alrededor



de la fuga se encuentre completamente saturado, ya que esto produce un esparcimiento y una atenuación general de las ondas del radar (Rodríguez, 2005).

Una manera de detectar fugas con GPR, es mediante la detección de vacíos que se crean por el agua de la fuga y la dispersión que se provoca alrededor de esta misma, que es ocasionada por la presión del agua saliendo de la tubería; a su vez, y debido a que el GPR puede identificar las fugas en tuberías enterradas; la velocidad de propagación del radar cambia a medida que la fuga satura el suelo, detectando así anomalías en lo profundo de la tubería. La saturación del suelo alrededor de la tubería reduce la velocidad de las ondas de radar, lo que provoca que la sección parezca más profunda de lo que es; y esto ocurre debido a un cambio en la conducción del suelo próximo con exceso de agua (Rodríguez, 2005).

Las ondas del Radar de Penetración Terrestre, se reflejan parcialmente en la superficie cuando se producen anomalías en las propiedades del suelo como puede ser en el caso de un vacío o una tubería. Se va formando una imagen en el radar que determina en este caso la profundidad de la tubería y la fuga, conforme el intervalo de tiempo entre las ondas de radar que son transmitidas y reflejadas.

Los resultados de cada observación se deben de analizar en gráficas mostrando las secciones transversales en dos sentidos de tiempo de viaje. Estas secciones se convierten en secciones de profundidad, utilizando las velocidades de propagación de las ondas electromagnéticas a través del suelo.

Para analizar estas gráficas se buscan anomalías como irregularidades en grandes patrones de reflexión uniforme y cambios en la frecuencia en las ondas del radar. Las irregularidades en el suelo son originadas por reflectores en el suelo como tuberías, rocas o vacíos (Rodríguez, 2005). Las irregularidades en grandes patrones uniformes ocurren generalmente por cambios en la frecuencia de la señal del radar a causa de los cambios en las propiedades dieléctricas del medio de transmisión y debido a la saturación del suelo producida por el agua que escapa de la tubería. La saturación baja la frecuencia y hace que el ancho de la onda de la señal del radar se concentre en ese punto. En la Figura 11 se muestra



un claro ejemplo con las diferencias que se pueden encontrar en sectores con y sin problemas de fugas.

En la figura de la izquierda se puede observar que toda el área estudiada se encuentra libre de anomalías o perturbaciones. En cambio, en la figura de la derecha, se ve claramente otro patrón. Se observa atenuación en las ondas que se propagan debido a un cambio de color (de rojo y azul a verde), que puede deberse a un cambio en las condiciones del suelo cerca de la tubería.

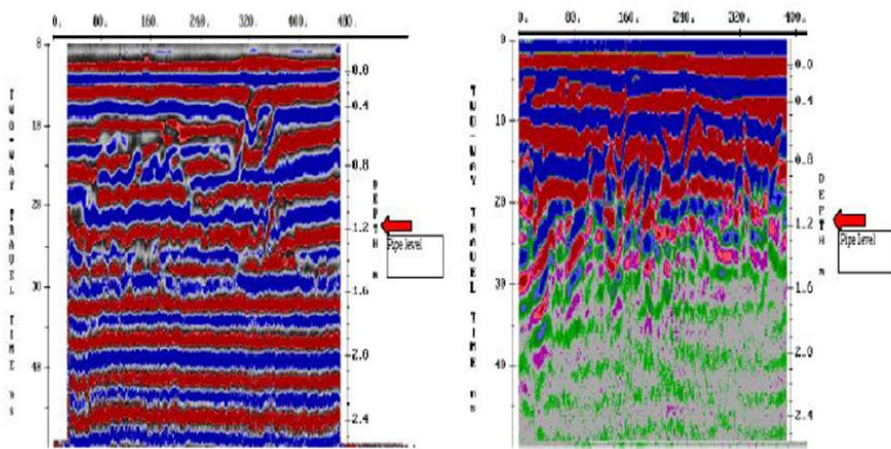


Figura 11. Diagramas resultados de GPR en zona con y sin fuga (Rodríguez, 2005).

Ventajas y limitaciones del GPR: Se pueden analizar las ventajas y limitaciones del uso del GPR para la detección de fugas en redes de agua potable. Esto puede incluir aspectos como la precisión, la profundidad de detección, la velocidad de muestreo y los factores que pueden afectar su desempeño (Aguilar et al., 2018). **Consideraciones técnicas y prácticas:** Se pueden abordar aspectos técnicos y prácticos relevantes para la implementación del GPR en la detección de fugas en redes de agua potable. Esto puede incluir consideraciones sobre la calibración del equipo, la interpretación de los datos obtenidos y la integración del GPR en los sistemas de gestión de agua potable (Mora Morales et al., 2019).



IV. Metodología

La metodología utilizada en la presente tesis consistió en los siguientes pasos:

1. Selección del área de estudio: Se eligió la ciudad de Chihuahua como el sitio de investigación para el estudio de detección de fugas en redes de agua potable.
2. Recopilación de información: Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre el tema de detección de fugas en redes de agua potable mediante el uso de Radar de Penetración Terrestre (GPR). Se recopilaron estudios previos, investigaciones y técnicas utilizadas en esta área.
3. Diseño del plan de muestreo: Se diseñó un plan de muestreo que incluyó la selección de diferentes puntos de la red de distribución de agua potable en la ciudad de Chihuahua. Se tuvieron en cuenta diferentes características, como el tipo de suelo, el diámetro de las tuberías y la antigüedad de la red.
4. Adquisición de datos: Se utilizó un equipo de Radar de Penetración Terrestre (GPR) para la adquisición de datos. Se realizaron mediciones en los puntos de muestreo seleccionados, siguiendo un procedimiento estandarizado. Los datos obtenidos incluyeron información sobre la profundidad y la ubicación de posibles fugas en las tuberías.
5. Procesamiento de datos: Los datos obtenidos con el GPR fueron procesados utilizando software especializado. Se aplicaron técnicas de filtrado, corrección y análisis para obtener información precisa sobre la ubicación y magnitud de las fugas detectadas.
6. Interpretación de resultados: Los resultados obtenidos a partir del procesamiento de datos fueron interpretados y analizados. Se identificaron las áreas donde se detectaron fugas en la red de distribución de agua potable, y se determinó la magnitud de las mismas.
7. Evaluación de la eficacia: Se evaluó la eficacia de la detección de fugas en redes de agua potable mediante el uso del GPR. Se compararon los resultados obtenidos con los



métodos tradicionales de detección de fugas para determinar la precisión y la confiabilidad del GPR.

8. Conclusiones y recomendaciones: Se elaboraron conclusiones basadas en los resultados obtenidos y se formularon recomendaciones para mejorar las prácticas de detección de fugas en redes de agua potable en la ciudad de Chihuahua.

La metodología utilizada en esta tesis proporcionó una guía clara y sistemática para abordar el problema de la detección de fugas en redes de agua potable mediante el uso del GPR. Con base en esta metodología, se obtuvieron resultados que contribuyen al conocimiento y a la mejora de las técnicas de detección de fugas en redes de distribución de agua potable.

Especificaciones de GPR a utilizar

En las figuras Figura 12 y Figura 13 se muestra el equipo a emplear, el cual cuenta con las siguientes características:

- Ancho de banda de frecuencia 100 MHz - 900 MHz
- Frecuencia central 500 MHz
- Profundidad de escaneo 6 metros
- Tiempo de funcionamiento Windows 50 ns / 100 ns
- Rango Dinámico 120 dB min.
- Resolución horizontal 0.1 m
- Resolución vertical 0.05m
- Frecuencia de repetición de pulsos 75 kHz
- Longitud de pulso 2 ns
- Diferencial de pulso 40 voltios p-p
- Tiempo de aumento de pulso 250 ps



- Consumo de energía 270 mAh
- Pilas 10/20 x 4.0 Ah NiMH 1.2 V Autonomía con una carga 12 hr
- Tiempo de carga 5 h
- Rango ADC 8 bits
- Tasa de adquisición de datos 18.2 trazas / segundo
- Muestras por Rastro 585
- Interfaz GPR UART a través de USB
- Rango de temperatura de funcionamiento -5°C a 40°C
- Resistencia al agua IP 52
- Tamaño 50/40/15 cm
- Peso 4 kg
- Antena 500 mHz, Receptor, Transmisor, Integrados en estuche plástico ABS
- Cable USB
- Batería y Cargador de Batería
- Carro transportador todo terreno
- Computadora portátil de uso rudo o Tablet 10.5" con parasol (Incluido)



Figura 12. GPR utilizado en la presente investigación. (Propiedad de la JMAS de Chihuahua)



Figura 13. GPR aplicado en Fraccionamiento Circuito Magenta, ciudad de Chihuahua (2022)

V. Localización de la Zona de Estudio

La ciudad de Chihuahua, ubicada en el estado homónimo al norte de México, desempeña un papel central en esta investigación.

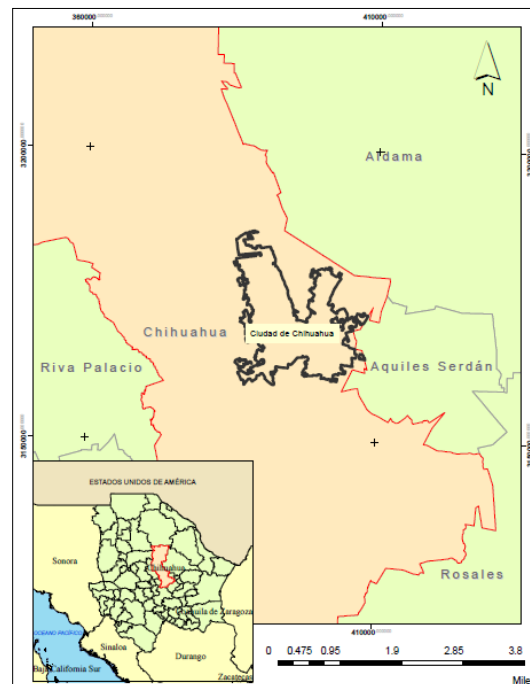


Figura 14. Macrolocalización de la zona de la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).



Con referencia a la Figura 14, se puede observar su posición geográfica dentro del estado de Chihuahua. Como capital del estado y municipio homónimo, la ciudad limita al noreste con el Municipio de Aldama y al este con el Municipio de Aquiles Serdán. Hacia el sureste, comparte límites con el municipio de Rosales, mientras que hacia el oeste se conecta con el municipio de Riva Palacio.

5.1 Descripción del Entorno Físico de la Ciudad de Chihuahua

La descripción del entorno físico de la ciudad de Chihuahua es fundamental para comprender la problemática del medio natural y facilitar la interpretación de los resultados obtenidos en los trabajos de campo. Mediante el análisis de la fisiografía, se puede obtener una visión completa del medio natural, incluyendo el relieve, el clima, las características del suelo y la vegetación presente en el área de estudio.

Fisiografía

La ciudad de Chihuahua se encuentra ubicada en una zona que colinda con la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental al oeste y al sur Figura 15. Además, se sitúa mayormente dentro de la Provincia Sierras y Llanuras del Norte. En esta área, se encuentran las Subprovincias Sierras y Llanuras Tarahumaras al oeste, Sierras y Llanuras de Durango al sur y la Del Bolsón de Mapimí en el centro, la cual abarca parte de la ciudad de Chihuahua.

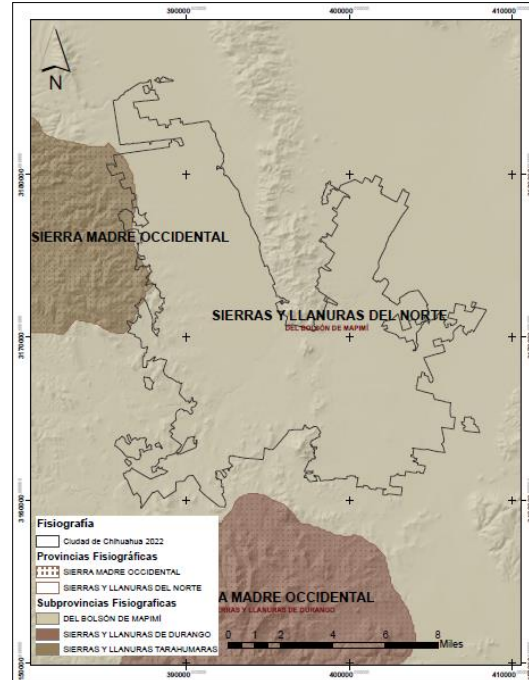


Figura 15. Fisiografía de la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).

Geomorfología

La Ciudad de Chihuahua se localiza en el centro del Estado y está situada dentro de la subprovincia del Bolsón de Mapimí. En esta zona, las topofomas predominantes son las llanuras aluviales y los lomeríos escarpados Figura 16.

El territorio de la ciudad de Chihuahua es mayormente plano, teniendo llanuras prolongadas, hacia el Sur y al oeste se interrumpe con cerros y lomeríos, por el contrario, el Este de la Ciudad está limitado por sierra y bajadas, apreciándose en la Figura 16.

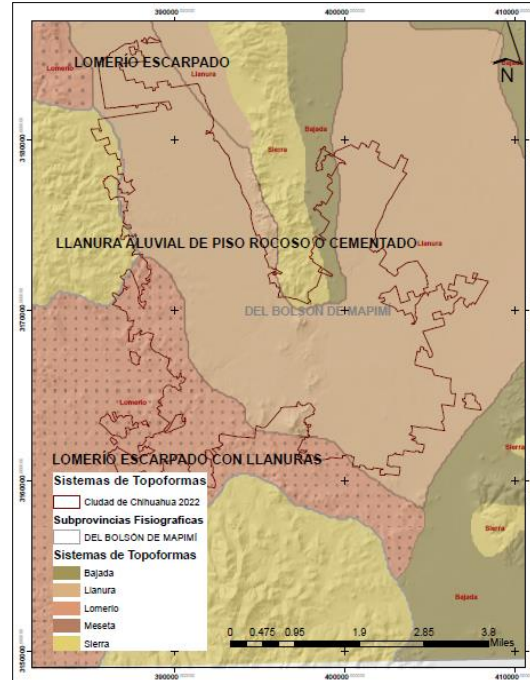


Figura 16. Sistemas de topoformas en la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).

Clima

El análisis realizado de las series de datos de Temperatura y Precipitación, fue en el intervalo de tiempo entre los años 1960 a 2019 (Silva, 2020), de estos registros, se determinó que la temperatura media anual es de 18.6 °C. Asimismo la precipitación media anual es de 391.50 mm, tomando los datos de la Estación, manifiesta que la mayor intensidad de precipitación es durante los meses de; mayo, junio, julio, agosto y septiembre, decreciendo durante el resto del año.

Como se observa en la Figura 17 el clima predominante en el municipio de Chihuahua se caracteriza por ser árido y a vez es extremo.

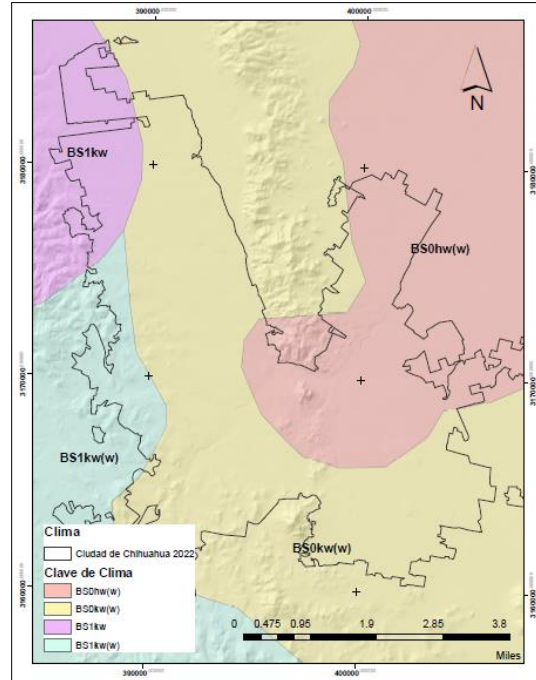


Figura 17. Clima de la ciudad de la Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).

De acuerdo con la clasificación Köppen y adaptada por Enriqueta García para nuestro país, el clima en la zona urbana de la ciudad de Chihuahua presenta los siguientes subtipos climatológicos (INEGI, 2005):

- BS0kw (w). Clima árido templado, con una temperatura media anual entre los 12 y 18°C, en el mes más frío tiene temperaturas entre -3° y 18°C. Se tienen lluvias de verano con un porcentaje invernal entre 5 y 10.2% del total anual. Esta unidad se distribuye al noroeste de la zona centro y este del municipio.
- BS0hw (w). Clima árido-semicálido, de temperatura entre los 18° y 22°C, en el mes más frío es menor a 18°C y la temperatura del mes más caliente mayor a 22°C. Se tienen lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal entre el 5 y 10 % del total anual. Se localiza en la porción sureste y centro del municipio.
- BS1kw. Clima semiseco templado con temperatura media anual entre los 12 y 18°C, en el mes más frío tienen temperaturas entre -3° y 18°C. El mes más caliente se tienen temperaturas mayores a 22°C. Se tienen lluvias de verano



con un porcentaje invernal mayor al 18% del total anual. Esta unidad se distribuye en la zona noroeste y este del municipio.

Tipo de suelo

La ciudad de Chihuahua está conformada en su mayoría con suelo tipo Xerosol, lo cual se observa en la Figura 18, este tipo de suelo se encuentra presente de Centro a Norte, se caracteriza por ser un suelo de zonas áridas, generalmente se encuentran arcillas debajo de este tipo de suelo; asimismo se observa una franja de Centro a Oeste de Litosol, los cuales son suelos de piedra; al este se encuentra el tipo de suelo Castañozem representativo de las zonas semiáridas, estos suelos son moderadamente susceptibles a la erosión; en el límite de la ciudad, se puede observar el Regosol el cual se puede definir como manto o capa de material que cubre una roca coincidiendo con lo anteriormente visto, siendo zona de Sierras.

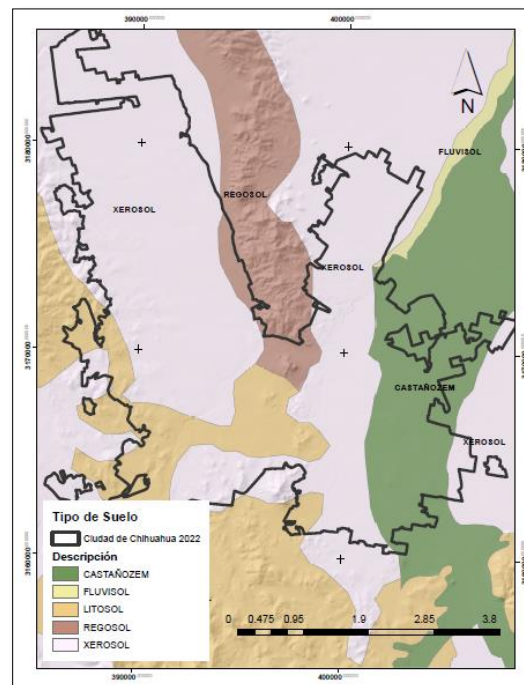


Figura 18. Tipo de suelo de la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).



Las características descritas en el presente capítulo son provenientes de la Guía para Interpretación de Cartografía (INEGI, 2004); del Enlace Web para descargar datos y capas digitales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2023) como fuente y; elaboración e interpretación propia con ayuda del Software ArcGis10.5.

Uso de suelo y vegetación

En la figura Figura 19 se aprecia que conforme INEGI, la ciudad de Chihuahua está conformada en su mayoría de suelo de uso urbano; asimismo se encuentra cubierto de pastizal y áreas agrícolas.

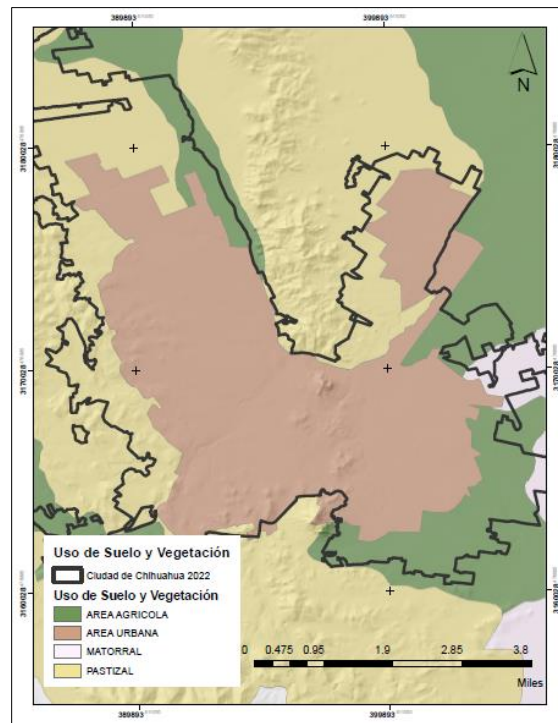


Figura 19. Uso de suelo y vegetación en la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).



Hidrografía

La Ciudad de Chihuahua se localiza dentro de la Unidad Hidrológica, Región Bravo Conchos (RH24), Cuenca R. Conchos – P. El Granero (RH24K), Subcuenca R. Chuvíscar (RH24Kc) estos datos provenientes del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas [SIATL] (INEGI, 2023).

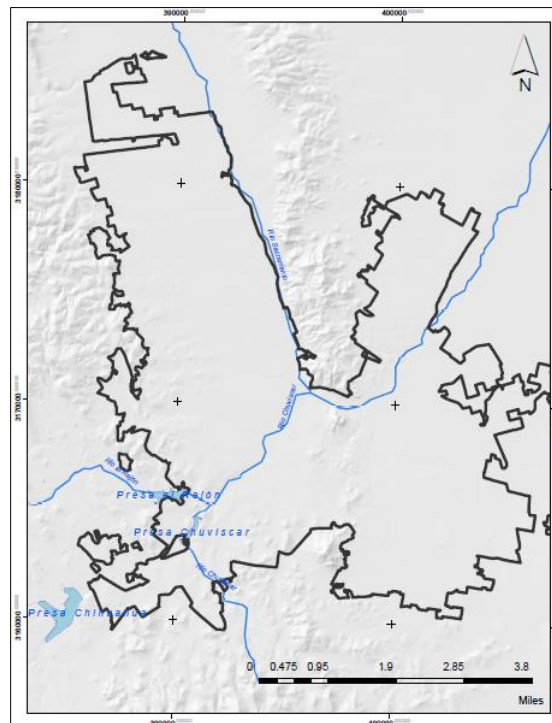


Figura 20. Hidrografía de la ciudad de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).

Los principales cuerpos de agua de la zona urbana son la Presa el Rejón, Presa Chihuahua y presa Chuvíscar como se muestra en la Figura 20. La ciudad de Chihuahua se asienta en el valle que forman los ríos Chuvíscar y Sacramento, que al unirse forman parte de la cuenca del Río Bravo de la vertiente del Golfo de México.

Los principales Ríos de la Ciudad son el Río Chuvíscar y el Río Sacramento. El Río Sacramento se forma en la sierra alta, localizada al Noroeste de la Ciudad de Chihuahua y



desciende con una dirección hacia al Noroeste; Aguas abajo, conserva el mismo sentido hacia la localidad de Sacramento, donde su cauce cambia con dirección hacia el Sureste hacia la ciudad de Chihuahua. El Río Chuvíscar, es la fuente principal de escurrimiento de la zona urbana.

VI. Resultados

En este capítulo se presenta la aplicación técnica del GPR en diversos sectores de la ciudad, donde se describen las características hidrosociales de cada uno de los mapeos realizados

6.1 Seleccionar Sectores de la Red de Distribución de Agua Potable de la Ciudad de Chihuahua

En esta investigación, se seleccionaron 5 sectores distribuidos en la ciudad de Chihuahua, tomando como base la caracterización hidrosocial obtenida tanto del Inventario Nacional de Vivienda (INV) de INEGI (2020), así como de los registros de fugas de agua potable del Área Técnica de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (2023).

Los sectores coinciden con los datos proporcionados por el INEGI en las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) de INEGI (2022). La ubicación de estos sectores se muestra en la Figura 21 y se presenta a continuación un listado con los nombres de referencia

- 1) **Sector 1**, Banqueta entre Puente Pacheco y Avenida Fuentes Mares
- 2) **Sector 2**, Chihuahua 2000
- 3) **Sector 3**, Terracería en Rancho Guadalupe



- 4) **Sector 4**, Avenida Antonio de Montes entre Boulevard Antonio Ortiz Mena y Avenida Antonio Deza y Ulloa
- 5) **Sector 5**, Fraccionamiento Circuito Magenta

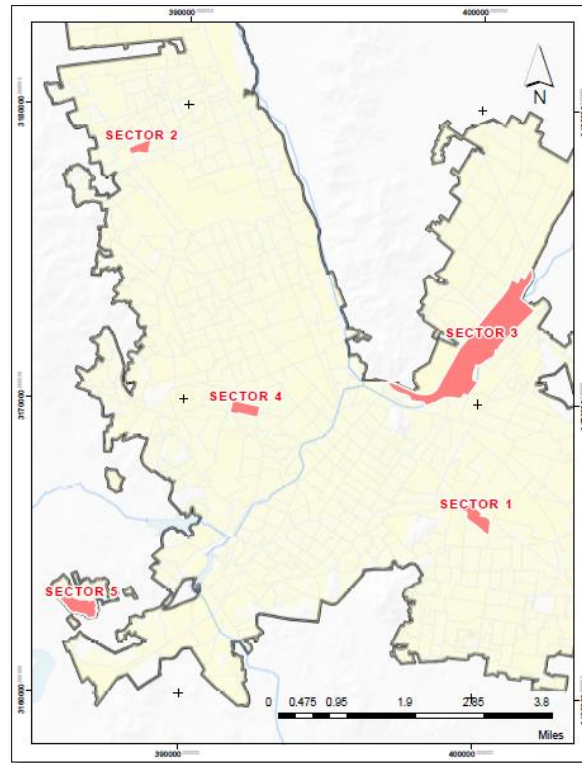


Figura 21. Sectores seleccionados en la ciudad de Chihuahua para aplicación de GPR. (Fuente: Elaboración propia, INEGI, 2023).

6.2 Aplicación del Método de GPR

Durante la aplicación del método de GPR, se identificaron necesidades específicas para su implementación y uso en los siguientes puntos:

Caracterización del subsuelo: Se requirió obtener información detallada sobre la composición y estructura del subsuelo en los sitios seleccionados. Esto permitió identificar posibles obstáculos, como capas de suelo compacto, tuberías enterradas u otros elementos que pudieran afectar la detección de fugas.



Diseño de rutas de exploración: Se planificaron rutas de exploración estratégicas para cubrir de manera efectiva los sectores seleccionados. Esto implicó determinar la ubicación y disposición de los perfiles de GPR, teniendo en cuenta la distribución de las redes de agua potable y las áreas con mayor probabilidad de presentar fugas.

Calibración del equipo: Se realizó la calibración adecuada del equipo de GPR para garantizar mediciones precisas y confiables. Esto incluyó ajustar parámetros como la frecuencia de emisión de las ondas electromagnéticas y la ganancia de la antena receptora, para adaptarse a las condiciones del terreno y obtener la mejor calidad de datos posible.

Interpretación de los datos: Se llevó a cabo un análisis detallado de los datos obtenidos mediante GPR, con el objetivo de identificar posibles anomalías que indicaran la presencia de fugas en las redes de agua potable. Esto implicó el uso de software especializado para procesar y visualizar los resultados, así como la experiencia en la interpretación de las señales registradas.

Validación de resultados: Se realizaron pruebas adicionales, como excavaciones selectivas y mediciones complementarias, para verificar y confirmar los resultados obtenidos mediante GPR. Esto permitió validar la detección de fugas y obtener una evaluación más precisa de su ubicación y magnitud.

La aplicación del método de GPR en este estudio se basó en estas necesidades específicas, con el objetivo de proporcionar una herramienta efectiva para la detección de fugas en las redes de agua potable de los sectores seleccionados.

6.3 Analizar y Procesar las Imágenes y Datos Obtenidos con el GPR para Identificar y Localizar las Posibles Fugas Presentes en la Red de Distribución.



Sector 1.- Banqueta entre Puente Pacheco y Avenida Fuentes Mares

Las características del entorno urbano, lo forma un total de 442 viviendas de las cuales 385 se encuentran habitadas; con una población total de 1,267 habitantes siendo 606 mujeres y 647 hombres, en su mayoría adultos entre 30 y 59 años; asimismo se encuentran 58 diferentes establecimientos económicos. El uso de suelo que predomina en el sector es Habitacional de 26 - 35 viv/hab. De acuerdo a Samaniego (2023) en su mayoría pertenecen al nivel socioeconómico Medio.

De las 385 viviendas que se encuentran habitadas, 179 han tenido problemas por falta de agua o fugas en un periodo de abril de 2018 a mayo de 2022, lo que corresponde 46.49% de la problemática a fugas en viviendas habitadas por sector (Valencia, 2023). En la Tabla 1 se resume la problemática de las viviendas en el Sector 1.

Tabla 1. Problemática de falta de agua y fugas en el Sector 1. (Fuente: Elaboración propia)

Problema	Cantidad
Falta de Agua	66
Fuga en caja de válvulas	3
Fuga en Calle	59
Fuga al Reinstalar	0
Fuga en Interior	23
Fuga en Medidor	24
Fuga al Instalar Medidor Nuevo	0
Fuga Interna Tinaco	4
Fuga al Cortar	0
Total	179

En dónde 62 de las 113 fugas presentadas en la zona por periodo, son en redes de distribución de agua potable, y las 51 fugas restantes son generadas en la toma del usuario o en el interior del domicilio. Lo que nos indica que 54.86% de las fugas en el Sector son generadas en las redes de distribución.



Conforme a datos de Valencia (2023) se determinó a manera de resumen el volumen por dotación en el Sector 1, el cual se puede encontrar en la Tabla 2.

Tabla 2. Relación de volúmenes y dotaciones en el año 2022 del Sector 1. Fuente: Elaboración propia de Valencia (2023).

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago.	Sep.	Oct	Nov	Dic	Promedio	Unidad
10.70	10.26	11.39	10.74	11.71	12.22	12.34	11.48	11.16	10.28	10.71	11.22	11.18	HM3
254.84	244.43	271.23	255.79	278.87	290.97	293.73	273.25	265.77	244.87	255.11	267.11	266.33	Lts/Hab/día

En la Tabla 2 se observa el promedio de volumen suministrado en este Sector en el año 2022 el cual es de 11.18 HM3 y la dotación promedio anual es de 266.32 Lts/Hab/día.



Figura 22. Representación de fugas en Sector 1. (Valencia, 2023)

En la anterior, representación gráfica de la Figura 22, se muestra el tramo de banqueta entre Puente Pacheco y Ave. Fuentes Mares, resaltando los años en los que se han detectado fugas no visibles, mediante el procedimiento de hacer un sondeo físico y buscar la falla; lo que resalta la importancia de la búsqueda de las fugas con métodos no invasivos y con los cuales disminuir el costo económico de la detección. De acuerdo a los registros en el organismo, se fue incrementando el número de fallas detectadas.



Sector 2.- Sectorización Chihuahua 2000

Las características del entorno urbano, de este sector consta de un total de 753 viviendas, de las cuales 684 se encuentran habitadas; con una población total de 2,308 habitantes siendo 1,144 mujeres y 1,163 hombres, donde la mayoría son adultos entre 30 y 59 años; asimismo se encuentran 99 establecimientos económicos. El uso de suelo que predomina en el sector es Habitacional de 46 - 60 viv/hab, que caen en la clasificación de nivel socioeconómico Bajo.

De las 684 viviendas, que se encuentran habitadas 179, han tenido problemas por falta de agua o fugas en un periodo de febrero de 2018 a diciembre de 2022, lo que corresponde 20.76% de la problemática a fugas en viviendas habitadas por sector. En la Tabla 3 se muestra la problemática de las viviendas en este Sector:

Tabla 3. Problemática de falta de agua y fugas en el Sector 2. (Fuente: Elaboración propia)

Problema	Cantidad
Falta de Agua	26
Fuga en caja de válvulas	0
Fuga en Calle	53
Fuga al Reinstalar	0
Fuga en Interior	17
Fuga en Medidor	45
Fuga al Instalar Medidor Nuevo	0
Fuga Interna Tinaco	1
Fuga al Cortar	0
Total	142

En dónde, 53 de las 116 fugas presentadas en la zona por periodo, son en redes de distribución de agua potable y las 63 fugas restantes son generadas en la toma del usuario y/o en el interior del domicilio. Lo que nos indica que 45.68% de las fugas en el Sector son generadas en las redes de distribución.



En el presente Sector se expone el resumen el volumen por dotación, el cual se puede encontrar en la Tabla 4. Observándose el promedio de volumen suministrado en el año 2022 siendo 15.17 HM3 y la dotación promedio anual que es de 261.81 Lts/Hab/día.

Tabla 4. Relación de volúmenes y dotaciones en el año 2022 del Sector 2. Fuente: Elaboración propia de Valencia (2023).

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago.	Sep.	Oct	Nov	Dic	Promedio	Unidad
14.18	14.09	15.00	14.58	15.30	15.72	15.39	16.16	15.50	15.59	14.35	16.19	15.17	HM3
244.61	243.16	258.81	251.65	264.08	271.23	265.64	278.89	267.54	268.95	247.71	279.44	261.81	Lts/Hab/día

En la Figura 23, se aprecia que las fugas por fallas encontradas en el sector, se han mantenido más o menos en los mismos eventos, lo que indica una necesidad de buscar la causa, las cuales pueden ser operativas, deficiencia de materiales o que la vida útil de las tuberías ya hayan sido rebasadas.



Figura 23. Representación de fugas en Sector 2. (Valencia, 2023)



Sector 3.- Terracería en Rancho Guadalupe

Las características del entorno urbano del sector, consta de un total de 718 viviendas, de las cuales 527 se encuentran habitadas; con una población total de 1,629 habitantes siendo 779 mujeres y 803 hombres; en el cual se encuentran 51 establecimientos económicos. El uso de suelo que predomina conforme información del Plan de Desarrollo Urbano (IMPLAN, 2021), es Equipamiento Recreación y Deporte, este sector se clasifica como de nivel socioeconómico Indefinido, seguido por un socioeconómico Bajo.

De las 527 viviendas que se encuentran habitadas, 112 han tenido problemas por falta de agua o fugas en un periodo de mayo de 2018 a octubre de 2022, lo que corresponde 21.25% de la problemática a fugas en viviendas habitadas por sector. En la Tabla 5 se muestra la problemática de las viviendas en este Sector.

En dónde, 9 de las 23 fugas presentadas en la zona por periodo, son en redes de distribución de agua potable y las 14 fugas restantes son generadas en la toma del usuario y/o en el interior del domicilio. Lo que nos indica que 39.13% de las fugas en el Sector son generadas en las redes de distribución.

Tabla 5. Problemática de falta de agua y fugas en el Sector 3. (Fuente: Elaboración propia)

Problema	Cantidad
Falta de Agua	89
Fuga en caja de válvulas	0
Fuga en Calle	9
Fuga al Reinstalar	1
Fuga en Interior	1
Fuga en Medidor	11
Fuga al Instalar Medidor Nuevo	0
Fuga Interna Tinaco	1
Fuga al Cortar	0
Total	112



En el Sector 3. Correspondiente a Terracería en el Rancho Guadalupe el promedio del volumen suministrado fue de 5.10 HM³ y la dotación en ese Sector fue de 198.08 Lts/Hab/día, tal como se observa en la Tabla 6 .

Tabla 6. Relación de volúmenes y dotaciones en el año 2022 del Sector 3. Fuente: Elaboración propia de Valencia (2023).

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago.	Sep.	Oct	Nov	Dic	Promedio	Unidad
4.49	4.39	4.69	4.69	4.77	6.10	6.09	5.65	4.99	4.91	5.21	5.24	5.10	HM ³
174.19	170.28	181.97	182.08	185.30	236.69	236.59	219.55	193.88	190.74	202.41	203.27	198.08	Lts/Hab/día

En la Figura 24, se aprecia de manera gráfica que, en relación a la superficie del sector con la densidad de fugas, son mínimos los presentados en el periodo de 2018-2022 pero no inexistentes.



Figura 24. Representación de fugas en Sector 3. (Valencia, 2023)

Sector 4.- Avenida Antonio de Montes entre Boulevard Antonio Ortiz Mena y Avenida Antonio Deza y Ulloa

Las características del entorno urbano del sector, consta de un total de 557 viviendas, de las cuales 519 se encuentran habitadas; con una población total de 1,434 habitantes siendo



760 mujeres y 672 hombres; en el sector se encuentran 222 establecimientos comerciales. El uso de suelo que predomina en el sector es Habitacional de 13 - 25 viv/ha, cuya clasificación es, que en su mayoría pertenecen al nivel socioeconómico Alto.

De las 519 viviendas que se encuentran habitadas, 352 han tenido problemas por falta de agua o fugas en un periodo de enero de 2018 a diciembre de 2022, lo que corresponde 67.82% de la problemática a fugas en viviendas habitadas por sector. En la Figura 4 se muestra la problemática de las viviendas en este Sector.

En dónde, 154 de las 221 fugas presentadas en la zona por periodo, son en redes de distribución de agua potable y las 67 fugas restantes son generadas en la toma del usuario y/o en el interior del domicilio. Lo que nos indica que 69.68% de las fugas en el Sector son generadas en las redes de distribución.

Tabla 7. Problemática de falta de agua y fugas en el Sector 4. (Fuente: Elaboración propia)

Problema	Cantidad
Falta de Agua	131
Fuga en caja de válvulas	1
Fuga en Calle	153
Fuga al Reinstalar	0
Fuga en Interior	19
Fuga en Medidor	37
Fuga al Instalar Medidor Nuevo	2
Fuga Interna Tinaco	9
Fuga al Cortar	0
Total	352

En el Sector y se determina que durante el año 2022 el volumen promedio de agua suministrado fue de 13.75 Hm³ y la dotación promedio anual de 327.47 Lts/Hab/día. En la *Tabla 8* se expone el resumen de Volumen – Dotación.



Tabla 8. Relación de volúmenes y dotaciones en el año 2022 del Sector 4. Fuente: Elaboración propia de Valencia (2023).

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago.	Sep.	Oct	Nov	Dic	Promedio	Unidad
14.18	14.09	15.00	14.58	15.30	15.72	15.39	16.16	15.50	15.59	14.35	16.19	15.17	HM3
244.61	243.16	258.81	251.65	264.08	271.23	265.64	278.89	267.54	268.95	247.71	279.44	261.81	Lts/Hab/día

En la Figura 25 se aprecia el Sector 4 siendo el que tiene mayor dotación de los 5 Sectores de estudio y el segundo con mayor volumen suministrado, por la distribución de las fugas no visibles, es posible que la dotación y por ende el volumen suministrado este impactado por esta dispersión de fallas en todo el sector, las cuales permanecen uniformes a lo largo del tiempo, lo que es pertinente implementar con mayor rigor la búsqueda de las causas de estas fallas y así evitar los volúmenes de agua perdida.



Figura 25. Representación de fugas en Sector 4. (Valencia, 2023)



Sector 5.- Fraccionamiento Circuito Magenta

Las características del entorno urbano del sector, consta de un total de 629 viviendas, de las cuales 546 se encuentran habitadas; con una población total de 1,329 habitantes siendo 692 mujeres y 630 hombres. El uso de suelo que predomina es el Uso Especial clasificada como Zona Especial de Desarrollo Controlado, las edificaciones en el sector, en su mayoría pertenecen al nivel socioeconómico Indefinido seguido por un socioeconómico Alto.

De las 546 viviendas que se encuentran habitadas, 163 han tenido problemas por falta de agua o fugas en un periodo de junio de 2018 a diciembre de 2022, lo que corresponde 29.85% de la problemática a fugas en viviendas habitadas por sector. En la Tabla 9 se muestra la problemática de las viviendas en este Sector:

Tabla 9. Problemática de falta de agua y fugas en el Sector 5. (Fuente: Elaboración propia)

Problema	Cantidad
Falta de Agua	61
Fuga en caja de válvulas	0
Fuga en Calle	9
Fuga al Reinstalar	0
Fuga en Interior	3
Fuga en Medidor	85
Fuga al Instalar Medidor Nuevo	3
Fuga Interna Tinaco	1
Fuga al Cortar	1
Total	163

En dónde, 9 de las 102 fugas presentadas en la zona por periodo, son en redes de distribución de agua potable y las 93 fugas restantes son generadas en la toma del usuario y/o en el interior del domicilio. Lo que nos indica que 8.82% de las fugas en el Sector son generadas en las redes de distribución.



En la Tabla 10 se observa que durante el año 2022 el volumen promedio de agua suministrado fue de 8.53 Hm³ y la dotación promedio anual de 203.99 lps/Hab/día.

Tabla 10. Relación de volúmenes y dotaciones en el año 2022 del Sector 5. Fuente: Elaboración propia de Valencia (2023).

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago.	Sep.	Oct	Nov	Dic	Promedio	Unidad
7.48	8.28	8.12	8.46	8.86	9.59	9.55	8.92	8.73	8.23	7.63	8.47	8.53	HM ³
179.02	198.19	194.30	202.40	211.98	229.41	228.41	213.39	208.75	196.92	182.63	202.54	203.99	Lts/Hab/día

En la Tabla 10 se expone el resumen de Volumen – Dotación.

De acuerdo a la información proporcionada por la JMAS (2022) relacionada a reportes y atención de fugas en el periodo de 2018 a 2022, la Figura 26, muestra que los incidentes aumentan al paso de los años, a pesar de ser asentamientos recientes y que las tuberías están aún en el rango de vida útil; lo que permite suponer que puede ser el agotamiento por operación en suministro intermitente o por mala instalación, lo cual es relevante para mantener un mejor control en la recepción de los nuevos fraccionamientos.

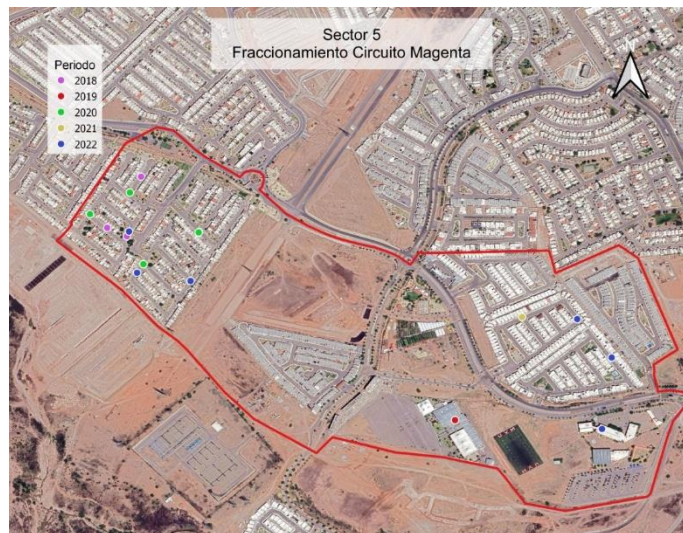


Figura 26. Representación de fugas en Sector 5. (Valencia, 2023)



6.4 Discusión de Resultados

La efectividad del GPR en la detección de fugas, de acuerdo al análisis de los resultados obtenidos durante la implementación del método de detección de fugas utilizando Radar de Penetración Terrestre (GPR), es aún incipiente en el Estado de Chihuahua y Latinoamérica, ya que depende principalmente de la incertidumbre de catastro de las redes existentes, así cuales de estas tuberías están en operación o lo que denominan los operarios “vivas”.

Por ejemplo, en un estudio de caso en Calgary, Canadá, realizado por la empresa Pure Technologies, se utilizó el GPR para detectar fugas en la red de distribución de agua potable de Calgary. Se logró identificar y localizar fugas con una precisión de hasta el 95%. El uso del GPR permitió una detección temprana de fugas, lo que condujo a una rápida reparación y ahorro de agua significativo. (Rizzo et al., 2004).

En trabajos antecesores, pudieron llegar a mencionar las características de las fugas detectadas, como su tamaño, ubicación y profundidad, y compararlos con los resultados obtenidos utilizando otros métodos convencionales de detección de fugas. Se pueden presentar casos de éxito en los que el GPR haya demostrado ser efectivo en la identificación precisa de fugas en la red de distribución de agua potable (Kang & Kim, 2019). Como en el caso del Reino Unido: En un proyecto de investigación realizado por la Universidad de Bath en el Reino Unido, se implementó el GPR para la detección de fugas en la red de distribución de agua potable. El GPR demostró ser una herramienta efectiva para la identificación precisa de fugas, permitiendo una intervención oportuna y reduciendo las pérdidas de agua en un 50% (Guaguen, 2007).

En el caso específico de los 5 sectores que fueron abordados con la finalidad de vincular la efectividad de la implementación del uso del GPR, presenta diferentes grados de eficacia en la implementación del uso del GPR, para la detección de humedad. Podemos clasificar en tres grandes bloques de resultados.



1. Donde se corrobora que la humedad, proviene de una falla de las tuberías identificadas o conocidas.
2. Donde la humedad registrada, No proviene de una falla de las tuberías y que no se encuentra el origen del escurrimiento.
3. Donde la humedad registrada, da como resultado la ubicación de infraestructura o tuberías enterradas desconocidas.

A continuación, se describen los resultados de forma puntual en los sectores, clasificando e identificando los tres posibles resultados.

Sector 1, Banqueta entre Puente Pacheco y Avenida Fuentes Mares

Con fecha de 25 de agosto de 2022, fue inspeccionada la línea de agua potable en la banqueta, entre Puente Pacheco y Avenida Fuentes Mares, cuya localización se muestra en la Figura 27.

La detección de una segunda línea, que se desconocía, fue identificada a través de los radargramas (JMAS, 2022), esta segunda línea consistía en un canal de agua pluvial, el cual es de gran dimensión y se encuentra debajo de la banqueta de estudio, asimismo, se observó la existencia de tubos de respiración, confirmando en la lectura de los radargramas y físicamente con la visualización del canal.

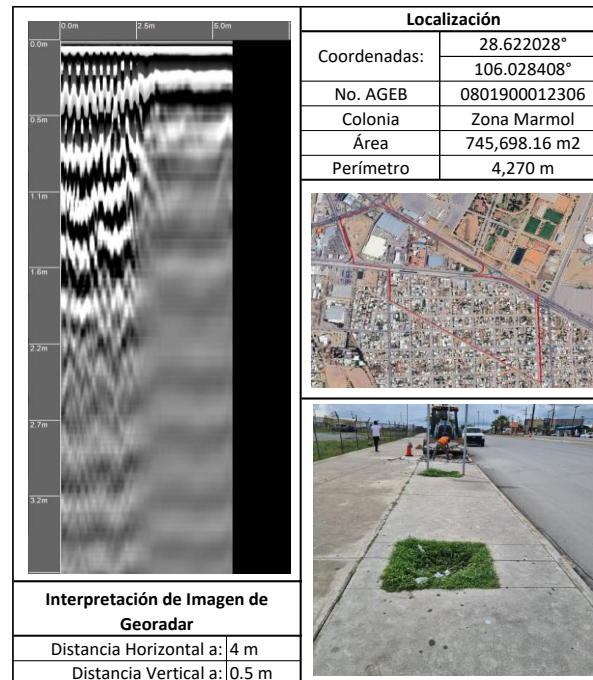


Figura 27. Datos, resultados y localización Sector 1 (Fuente: Elaboracion propia)

La lectura de radargramas se interpreta, que el vacío aparece sobre la horizontal, es más uniforme que el material del terreno, mostrando, que a mayor profundidad interfiere el vacío en la toma de muestra del radargrama mediante las señales que emite para la toma del levantamiento (JMAS, 2022), es por eso que la lectura del radargrama se interpreta de esa manera en la Figura 27 observándose el cambio de material abrupto, lo que coincidió en todas las lecturas tomadas y corroborado de manera física en campo.

En este sector, la aplicación del GPR, se concluye que *el resultado es del tipo 3*, ya que la humedad no es de origen de una falla de tubería, sino de un pluvial que no se tenía en el catastro. Donde la humedad registrada, da como resultado la ubicación de infraestructura o tuberías enterradas desconocidas.



Sector 2, Chihuahua 2000

Con fecha de 22 de diciembre de 2021, se inspecciono en el punto ubicado en la Calle Fco. L. Adame. A través de la aplicación del Radar de Penetración Terrestre, se confirma la inexistencia de línea de agua potable, y lo que indica que la humedad reportada no es generada por fuga en una línea de agua potable. Se muestran los resultados en la Figura 28.

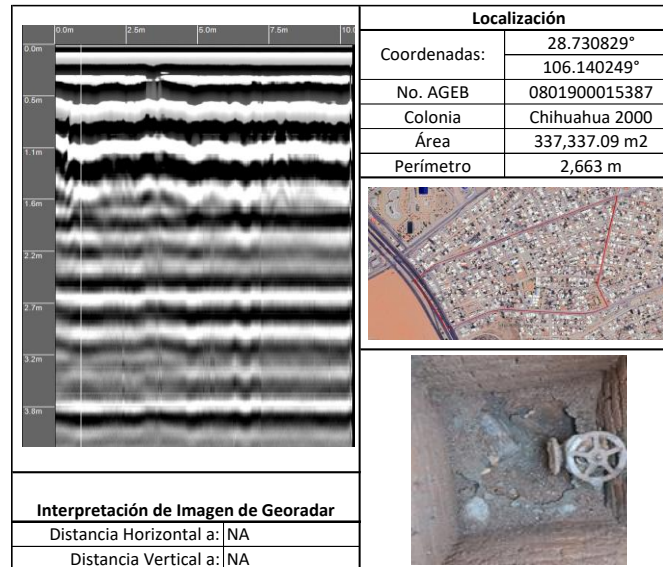


Figura 28. Datos, resultados y localización Sector 2 (Fuente: Elaboracion propia)

En este sector, la aplicación del GPR, se concluye que ***el resultado es del tipo 2***, y no se pudo encontrar el origen del escurrimiento. Donde la humedad registrada, No proviene de una falla de las tuberías y que no se encuentra el origen del escurrimiento.

Sector 3, Terracería en Rancho Guadalupe

En este Sector, fue necesaria la ubicación de infraestructura subterránea, en el Cruce de la Calle Luis Aguilar, con el fin de asegurar no dañar la infraestructura existente de PEMEX, Figura 29.

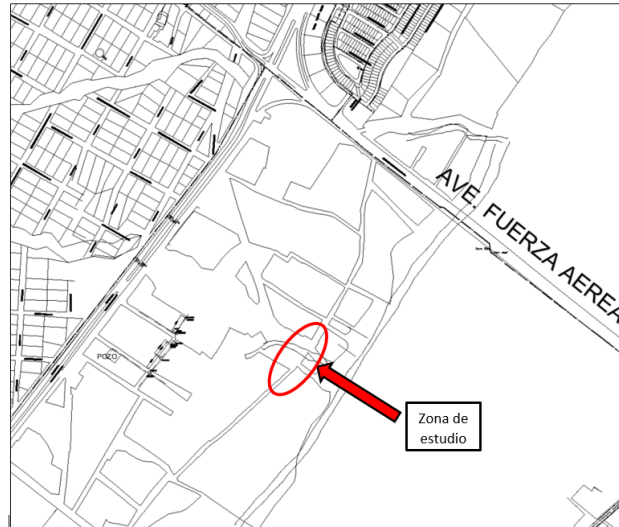


Figura 29. Ubicación de infraestructura subterránea en Sector 3.- (Fuente: JMAS, 2022)

Se realizaron recorridos con el Geo-Radar en la zona indicada en el mismo sentido de la Calle Luis Aguilar en 3 secciones del cruce como lo muestra la Figura 30.



Figura 30. Levantamiento de ubicación de infraestructura subterránea en Sector 3. (Fuente: JMAS, 2022)

De los resultados obtenidos en el levantamiento, se puede visualizar la ubicación de Infraestructura Subterránea, en Terracería en Rancho Guadalupe Figura 31 (JMAS, 2022); y de acuerdo al análisis de los diferentes radargramas y su geolocalización se determinó que:



- Existencia de 3 líneas de infraestructura pertenecientes a Pemex a 70 cm de profundidad (lomo de la tubería) a lo largo del camino de terracería en sentido transversal a la línea de agua potable proyectada.
- Se encontraron por medio de GPR las 3 líneas buscadas. Encontrándose que son paralelas al gasoducto. (JMAS, 2022).

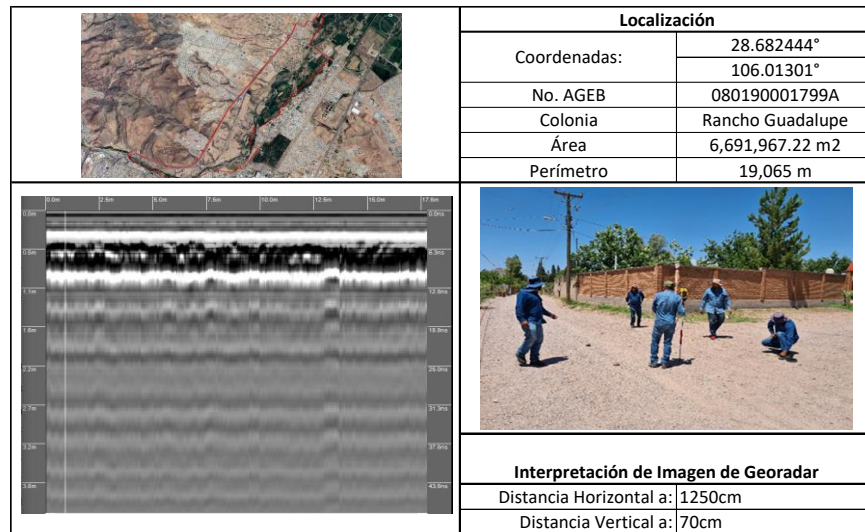


Figura 31. Datos, resultados y localización Sector 3 (Fuente: Elaboracion propia)

En este sector, la aplicación del GPR, se concluye que *el resultado es del tipo 3*, y no se pudo encontrar el origen del escurrimiento. Donde la humedad registrada, No proviene de una falla de las tuberías y que no se encuentra el origen del escurrimiento, cabe resaltar el enfoque de este levantamiento es esencialmente la ubicación de tuberías existentes para evitar el daño o deterioro con los trabajos posteriores de instalación de tubería por parte de Pemex.



Sector 4, Avenida Antonio de Montes entre Boulevard Antonio Ortiz Mena y Avenida Antonio Deza y Ulloa

El croquis de localización de la zona de estudio se puede encontrar en la *Figura 32*

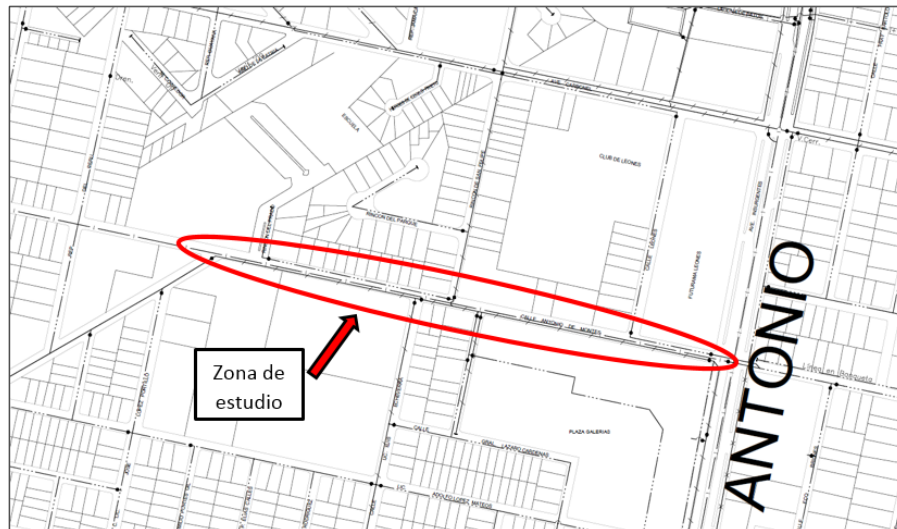


Figura 32. Croquis de localización de estudio de ubicación de infraestructura subterránea, Sector 4. (JMAS, 2022)

En la Tabla 11, se muestra el resumen de lo encontrado en campo, realizados a la transversal de la calle:



Tabla 11. Recorrido y ubicación de infraestructura subterránea en Sector 4. (Fuente: Elaboración propia)

No. de Recorrido	Cota	Longitud de Sección	Fotografía de referencia	Radargrama	Interpretación:
1	0+000	12.34			
27	0+260	11.10			
45	0+487.5	10.97			

Se llevaron a cabo 45 recorridos con Geo-Radar; de los cuales 3 son anteriormente expuestos, la simbología para la interpretación de los radargramas en el programa AutoCAD, es la que aparece en la Figura 33 (JMAS, 2022).

	LECTURA DESCARTADA
	INFRAESTRUCTURA CFE
	INFRAESTRUCTURA GAS
	POSIBLE LINEA O INFRAESTRUCTURA
	POSIBLE LINEA O INFRAESTRUCTURA
	DRENAJE
	POSIBLE LINEA O INFRAESTRUCTURA
	POSIBLE LINEA O INFRAESTRUCTURA
	POSIBLE LINEA O INFRAESTRUCTURA
	ZONA RECOMENDADA PARA EXCAVACION
	LINEA DE INICIO RADARGRAMA
	RADARGRAMA

Figura 33. Simbología para interpretación de ubicación de infraestructura subterránea, Sector 4. (JMAS, 2022)



Lo localizado e interpretado a lo largo de los 487.50 metros, es una gran cantidad de infraestructura subterránea.

En este sector, la aplicación del GPR, se concluye que *el resultado es del tipo 3*, ya que la humedad no es de origen de una falla de tubería, sino de infraestructura que no se tenía en el catastro. Donde la humedad registrada, da como resultado la ubicación de infraestructura o tuberías enterradas desconocidas.

Sector 5.- Fraccionamiento Circuito Magenta

Se realizó el levantamiento con GPR al poniente de la Ciudad, en busca de que los Radargramas mostrarán, la ubicación que genera el(os) problemas de inundación en las casas del sector Figura 34.


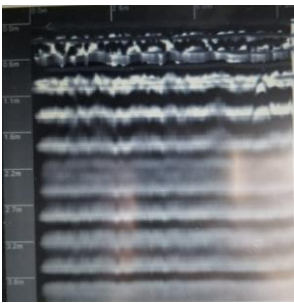


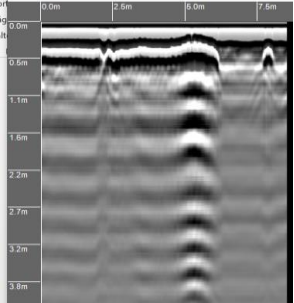


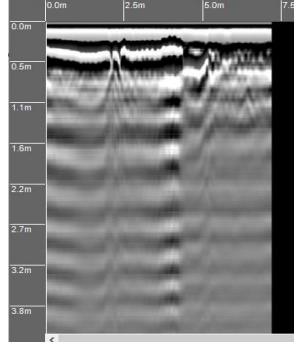



Figura 34. Ubicación de Fraccionamiento Circuito Magenta (Fuente: Elaboracion propia)



En la Tabla 12 se aprecian los levantamientos llevados a cabo en el Fraccionamiento, estos levantamiento son derivados, de las quejas de los usuarios, por percibir humedad cerca de sus viviendas.

Tabla 12. Detección de suelo húmedo con el uso de GPR, Sector 5. (Fuente: Elaboracion propia)

No. Levantamiento	Zona	Localización	Radargrama	Ubicación
1	No Húmeda			
2	Húmeda			
3	Húmeda			



Levantamiento 1

En el radargrama de la Tabla 12, se observa una estructura con forma de "V invertida" que podría corresponder a una tubería, sin embargo por la profundidad a la que se encuentra, se asume que puede ser de gas.

La interpretación de que se trata de la línea de gas se ve respaldada por la coincidencia en distancia con el parche de la zanja que fue realizada por la compañía de gas natural, así como por el conocimiento sobre su forma típica de trabajo, que implica la instalación de tuberías cerca de las banquetas en fraccionamientos (JMAS, 2022).

En conclusión, los problemas de humedad debido a fugas de agua en la red, se confirman por sondeo y se muestran en la Figura 35 (JMAS, 2022)- En este levantamiento se tiene *el resultado tipo 1*, donde se corrobora que la humedad registrada, da como resultado la ubicación de infraestructura o tuberías enterradas desconocidas.



Figura 35. Excavación de suelo seco en Fraccionamiento Circuito Magenta (Fuente: Elaboracion propia)



Levantamiento 2

En la parte del fraccionamiento con antecedentes de suelo altamente húmedo e inundación de aljibes y registros como se observa en la Tabla 12, con el GPR se realizaron recorridos con el objetivo de interpretar los resultados y visualizar la humedad en el suelo.

Durante el primer recorrido, se observó la importancia de la velocidad a la que se movía el Georradar. Se notó que, al moverse rápidamente, se perdía la toma vertical en el radargrama. Con el fin de obtener mayor precisión y revisar la vivienda nuevamente, se realizó un segundo recorrido a menor velocidad. En este segundo levantamiento, se observaron diferencias en la uniformidad de las capas del terreno. La calibración se realizó con suelo seco, lo que reveló que la mayoría de los suelos eran uniformes.

Al modificar los parámetros en el GPR, como cambiar del suelo seco al suelo húmedo, se pudo apreciar que a 5 metros del inicio del muestreo había una deformación horizontal en el terreno. A mitad del muestreo, se observó una falta de uniformidad, lo que sugiere la infiltración de agua hacia el aljibe. Esto concuerda con los antecedentes de las viviendas y la falla en la tubería aguas arriba. En este levantamiento se tiene *el resultado 1*, descrito anteriormente. Donde se corrobora que la humedad, proviene de una falla de las tuberías identificadas o conocidas.

Levantamiento 3

Al realizar el levantamiento anterior y desplazar el Georradar 1 metro hacia la izquierda para analizar el suelo, se observa una deformación en el radargrama. Estos indicios son consistentes con la presencia de humedad o saturación en el suelo de la cochera de la vivienda como se observa en la Tabla 12.

En conclusión, durante el levantamiento 1 realizado en la calle transversal, no se observó ninguna deformidad en el suelo. Sin embargo, al tomar mediciones en la casa



habitación donde se sabe que hay presencia de humedad en el suelo, se aprecia una deformidad en la distancia que sugiere la infiltración a través de la tubería. Es decir, este *resultado es el que describimos como el número 1*. Donde la humedad registrada, da como resultado la ubicación de infraestructura, en este caso un aljibe.

VII. Conclusiones y Recomendaciones

En conclusión, el análisis de los resultados obtenidos durante la implementación del método de detección de fugas utilizando Radar de Penetración Terrestre (GPR) en Chihuahua indica que la efectividad del GPR en la detección de fugas es aún incipiente. Esto se debe en gran medida a la incertidumbre en el catastro de las redes existentes ya la dificultad de identificar qué tuberías están en funcionamiento. Sin embargo, existen casos de éxito en otros lugares donde se ha utilizado el GPR para detectar fugas en la red de distribución de agua potable.

Este trabajo de investigación, aborda la aplicación del método de GPR, para la detección de fugas en redes de distribución de agua potable en un entorno real. Sin embargo, se reconoce que este trabajo solo toca superficialmente los alcances de esta técnica de cuantificación de fugas. Se identifican diversos problemas que dificultan la implementación de un enfoque cuantitativo de detección de fugas, como la falta de catastro, deficiencias en los sistemas y la falta de plataformas y metodologías unificadas.

Se propone que, a medida que con los avances experimentados por las administraciones de los Organismos Operadores, se implementen plataformas y programas digitales que permitan llevar a cabo unificación de información y el registro de información relevante. Esto ayudaría a optimizar el tiempo de solución de problemas y reducir el desperdicio de agua en las redes de distribución.

Se destaca que el uso del GPR como método de detección de fugas presenta ventajas, como la capacidad de detectar fugas en diferentes tipos de suelo y la posibilidad de realizar



inspecciones no destructivas. Sin embargo, también se deben considerar las limitaciones, como la influencia de las condiciones del suelo en la precisión de los resultados y la necesidad de personal capacitado para interpretar los datos obtenidos.

En cuanto a los cinco sectores abordados en el estudio, se identificaron diferentes resultados:

- Sector 1, se encontró que la humedad no provenía de una falla de tubería, sino de infraestructura desconocida. TIPO 3.
- Sector 2, no se pudo encontrar el origen del escurrimiento y la humedad registrada, no proviene de una falla de las tuberías. TIPO 2
- Sectores 3 y 4, nuevamente se encontró que la humedad era resultado de infraestructura desconocida. TIPO 3
- Sector 5, se concluyó que la humedad provenía de fallas en las tuberías conocidas. TIPO 1

Es importante evaluar la factibilidad técnica y económica de implementar el uso del GPR, considerando los costos asociados con la adquisición y mantenimiento del equipo, así como la capacitación del personal. Estos costos deben ser comparados con los beneficios potenciales, como la reducción de pérdidas de agua y la optimización de los recursos destinados a la reparación de fugas.

Además, se deben abordar consideraciones operativas y logísticas, como la planificación de rutas de inspección, la coordinación con otros trabajos de mantenimiento de la red y la integración del GPR en los procesos existentes de gestión y mantenimiento de la red de distribución de agua potable.

Como perspectivas futuras, se sugiere mejorar la precisión y eficiencia del método de GPR, así como realizar investigaciones adicionales para abordar los desafíos y limitaciones identificados durante el estudio.



En resumen, la implementación del GPR en la detección de fugas en redes de distribución de agua potable tiene el potencial de reducir las pérdidas de agua y optimizar los recursos, pero requiere un enfoque integral y consideración de múltiples factores.

7.1 Utilidad de la Investigación

Estos resultados demuestran la importancia de buscar métodos no invasivos, como el GPR, para la detección de fugas, especialmente en áreas donde la incertidumbre en el catastro de las redes es alta. La utilización de estas herramientas puede permitir una intervención oportuna y reducir las pérdidas de agua, contribuyendo así a un uso más eficiente de los recursos hídricos

Con esta investigación abre la posibilidad de plantear programas de acciones (barrido de detección), en búsqueda de fugas no visibles y mantener o incrementar la eficiencia física en las redes de distribución, así como evitar la pérdida de importantes volúmenes de agua.



Referencias

- Aguilar, R., Tamez, A., & Guevara, F. (2018). Water Leak Detection in Potable Water Supply Pipes Using Ground Penetrating Radar (GPR). *Journal of Applied Geophysics*. 147, 83-90.
- Ayala Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., & Pérez García, R. (2014). Representaciones 3D del seguimiento de la evolución de fugas de agua mediante la interpretación de imágenes de Georadar. *Liguas Ibéricas con Instrumento de Cohecimento, Ciencia e Tecnología: XIII Simpósio Iberoamericano de Redes de Agua, Esgoto e Drenagem*.
- Ayala Cabrera, D. (2014). Detección de fugas en sistemas de abastecimiento de agua potable mediante el uso del Ground Penetrating Radar (GPR). *Revista de Ingeniería Civil*.
- Ayala Cabrera, D. (2015). Characterization of components of water supply systems from GPR images and tools of intelligent data analysis. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Ayala Cabrera, D., Campbell, E., Carreño Alvarado, E. P., Izquierdo, J., & Pérez García, R. (2014). Water leakage evolution based on GPR interpretations. Valencia, Spain: 16th Conference on Water Distribution System analysis, WDSA 2014.
- Ayala Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., Ocaña Levario, S., & Pérez García, R. (2013). GPR-Based water leak models in water distribution systems. Valencia, Spain.
- Ayala Cabrera, D., Herrera, M., Montalvo, I., & Pérez García, R. (2010). Towards the visualization of water supply system components with GPR images. Valencia, Spain: *Mathematical and Computer Modelling*.
- Ayala Cabrera, D., Izquierdo, J., Montalvo, I., & Pérez García, R. (2011). Water supply system component evaluation from GPR radargrams using a multi-agent approach. Valencia, Spain: *Mathematical and Computer Modelling*.
- Ayala Cabrera, D., Ocaña Levario, S. J., Izquierdo, J., & Pérez García, R. (2016). 3D Representation of (Buried) Water Supply Elements using Pre-Processed GPR Images. Valencia, España: *Athens Journal of Technology & Engineering*.
- Ayala Cabrera, D., Ocaña Levario, S., Izquierdo, J., & Pérez García, R. (2014). Improving water supply system components visualization into GPR images. Valencia, España: *Athens Journal of Technology & Engineering*.



- Benavides Muñoz, H. M., & García Espinosa, J. C. (2019). Adjustment value of water leakage index in infrastructure. Medellín, Colombia: Universidad Técnica Particular de Loja.
- Cárdenas, J. (02 de abril de 2012). El Siglo de Torreón. Obtenido de Atienden fuga que generaba el desperdicio de 80 mil litros de agua en Durango: Recuperado de <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/2021/atienden-fuga-que-generaba-el-desperdicio-de-80-mil-litros-de-agua-en-durango.html>
- CONAGUA. (2012). Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica, y Energética en Sistemas de Agua Potable
- CONAGUA. (2018). Comisión Nacional del Agua. Chihuahua: Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Chihuahua-Sacramento (0830), Estado de Chihuahua.
- David, A. C., Silvia J., O. L., Rafael, P. G., Joaquín, I., & Manuel, H. (2013). Visualización de Fugas de Agua en Sistemas de Abastecimiento de Agua Mediante Imágenes de GPR. Valencia, España: XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje.
- EGV, I. (03 de abril de 2020). Método electromagnético del Georadar o GPR. Obtenido de Recuperado de <https://www.egv.cl/noticia/vinculacion-entre-georadar-y-topografia/>
- Farley, M., & Trow, S. (2003). Non-revenue Water: An Unfortunate Necessity. IWA Publishing.
- GIZ. (2010). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Guía para la Reducción de las Pérdidas de Agua.
- Guaguen, M., Thomas, A., & Chapman, D. (2007). Non-Intrusive Leakage Detection by Ground Penetrating Radar. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management, 109-117.
- IMPLAN. (Actualización 2021). Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua. Plan de Desarrollo Urbano del Centro de Población Chihuahua Visión 2040 (PDU 2040).
- IMTA. (2019). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO).



- INEGI. (2001). Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. Aguascalientes, Méx.: Diccionario de datos fisiográficos.
- INEGI. (2004). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Guía para la Interpretación de Cartografía, Edafología.
- INEGI. (2005). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica.
- INEGI. (2020). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de Inventario Nacional de vivienda (INV): Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/80>
- INEGI. (2022). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de Área Geoestadística Básica (AGEB): Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- INEGI. (2023). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL): Recuperado de https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- INEGI. (2023). Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica. Obtenido de Página Oficial. Mapas: Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/>
- IWA. (2003). Water Loss Task Force Report. International Water Association.
- Izquierdo, J., Campbell, E., Montalvo, I., Pérez García, R., & Ayala Cabrera, D. (2013). Error analysis of some demand simplifications in hydraulic models of water supply networks. Valencia, Spain: Rafael Jacinto Villanueva.
- JMAS. (2022). Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua. Chihuahua, Chihuahua.: Levantamiento con GPR en Banqueta entre Puente Pacheco y Avenida Fuentes Mares.
- JMAS. (2022). Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua. Chihuahua, Chihuahua.: Ubicación de Infraestructura Subterránea en Terracería en Rancho Guadalupe, en Cruce de la Calle Luis Aguilar.
- JMAS. (2022). Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua. Chihuahua: Ubicación de infraestructura subterránea en Avenida Antonio de Montes, entre Boulevard Antonio Ortiz Mena y Avenida Antonio Deza y Ulloa.



- JMAS. (2022). Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua. Chihuahua: Detección de Suelo Húmedo con el Uso de Geo-Radar en el Fraccionamiento Circuito Magenta.
- Kang, Y., & Kim, H. (2019). Leak Detection in Water Pipelines Using Ground Penetrating Radar. Obtenido de *Signal Processing Approaches and Challenges*. *Water*, 11(1), (56): Recuperado de <https://doi.org/10.3390/w11010056>
- Karim, A., & Sattar, A. (2018). Ground Penetrating Radar as a Tool for Water Leak Detection in Water Distribution Networks. Obtenido de *A Review*. *Water*, 10(7), 897.: Recuperado de <https://doi.org/10.3390/w10070897>
- LOGITEK. (13 de 07 de 2022). Becolve Digital. Obtenido de *Tecnologías utilizadas en la detección de fugas en redes de agua potable.*: Recuperado de <https://logitek.es/6-metodos-para-localizar-fugas-de-agua-en-grandes-tuberias-y-canalizaciones/>
- Milenio. (06 de 11 de 2019). Por fugas en red hidráulica, CdMx pierde 40% de agua: Sacmex (Milenio). Obtenido de agua.org.mx: Recuperado de <https://agua.org.mx/por-fugas-en-red-hidraulica-cdmx-pierde-40-de-agua-sacmex-milenio/>
- Mora Morales, J. (2019). Detección de fugas en redes de agua potable mediante el uso de Ground Penetrating Radar (GPR). *Revista de Ingeniería y Tecnología*, 20(1), 29-42.
- Mora Morales, J., Segura, F., & Abarca Jiménez, F. (2019). Detection or Leaks in the Distribution Network of Potable Water Supply Using Ground Penetrating Radar. Obtenido de *A case Study in Costa Rica*. *Sensors*, 19(19), 4091: Recuperado de [doi:10.3390/s19194091](https://doi.org/10.3390/s19194091)
- MUNICIPIUM. (2016). *Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua*. Cd. México.
- Ocaña Levario, S. J., Carreño Alvarado, E. P., Ayala Cabrera, D., & Izquierdo, J. (2017). Análisis comparativo de métodos de extracción de patrones en imágenes de GPR para la localización de fugas de agua. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Rizzo, P., Lambert, M., & Simpson, A. (2004). Ground Penetrating Radar as a Non-Destructive Tool for Water Leak Detection in Municipal Pipelines. *Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 1, 352-355.



- Rodríguez Amaya, D. (2005). El estado del Arte de las metodologías para la detección y localización de fugas en sistemas de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de los Andes.
- S.L., P. S. (2022). Mantenimiento de Redes de Servicios. Obtenido de Detección de Fugas: Recuperado de <http://www.prosig.net/fugas.html>
- Samaniego, E. (2023). Determinación de Niveles Socioeconómicos de la ciudad de Chihuahua. Trabajo en proceso de publicación.
- Silva, H. (2020). Pruebas Estadísticas Aplicadas a Datos Climatológicos. Universidad Autónoma de Chihuahua: Estadística y Análisis de Datos en Sistemas Hidrológicos.
- Tavera, M. (2008). Aplicación del georadar para la mejora del rendimiento de una red hídrica. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Tisnado Caceres, I. D., Condori López, R. D., & Callizana Condori, T. (2018). Historia de la Hidrología. Moquegua, Perú: Universidad José Carlos Mariategui.
- Valencia, A. (2023). Datos de Fugas en Redes de la Ciudad de Chihuahua. Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua, Departamento de Sectorización.
- Valencia, A. (2023). Dotación por AGEB en la Ciudad de Chihuahua. Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua. Subdirección de Sectorización.



Curriculum Vitae

Petra Viridiana Izaguirre Castillo se tituló de Ingeniera Civil en la Universidad Autónoma de Chihuahua en abril de 2017. Cuenta con la experiencia de servicios de verificación para INFONAVIT de la construcción de vivienda en serie y de supervisor externo de viviendas habitadas con fallas estructurales con Grupo RUBA (2014-2017); permaneció en el extranjero (Vancouver B.C., Canadá) (2017-2018); Tiene una participación en el “Dictamen Técnico del Proyecto Ejecutivo conforme funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Hidalgo Del Parral, Chihuahua con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (2019); Experiencia en administración, facturación, control de cuentas y de empleados incluyendo programas para la CFE (Plataforma SISPROTER / Sigla 03) (2019); Apoyo en el control, gestión, acompañamiento de proyectos ejecutivos estatales de movilidad, planeación urbana, rellenos sanitarios, hidrológicos, análisis costo beneficio, mediante la Ley Adquisiciones o la Ley de Obras Públicas (Adjudicaciones / Licitaciones Públicas) en la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (Gobierno del Estado) (2019-2021); ha sido encargada de la Subdirección de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento en la Dirección Local Chihuahua de la Comisión Nacional del Agua, llevando a cabo las funciones de coordinación y enlace entre Organismos Operadores y Dirección General para Programas Federales como PRODDER, PROSANEAR, PROAGUA y Cultura del Agua en sus diferentes apartados, aunado a tareas turnadas directamente de parte de la Dirección Local como el proyecto de “Plan de Atención Integral para el Suministro de Agua Potable Creel, Bocoyna. (2021 – 2023)

Correo Electrónico: p271375@uach.mx