

A Review of Geophysical Prospecting Methods for Identifying Optimal Groundwater Areas

Abstract— Sustainable access to groundwater is a growing challenge due to population growth and pressure on water resources. Given this situation, there is a need for accurate tools to locate and manage groundwater efficiently. The objective of this study is to determine geophysical prospecting methods for identifying optimal groundwater areas. To this end, 48 articles published between 2019 and 2024 from Scopus and Web of Science were analyzed. The registration and selection of studies was carried out by combining the PICO strategy and the PRISMA2020 statement. The results show that electrical resistivity tomography, vertical electrical sounding (VES), and ground-penetrating radar stand out for their ability to generate detailed images in various geological contexts. In particular, VES reaches depths of up to 200 m at a low cost. From a sustainability perspective, the incorporation of these techniques contributes directly to the fulfillment of Sustainable Development Goal 6 (Clean Water and Sanitation), as they improve water security and strengthen adaptation strategies in the face of climate variability. However, challenges remain associated with the transfer of these technologies to contexts with lower technical and financial capacities.

Keywords— Aquifer, Sustainable water management, Hydrogeology, Geophysical techniques.

Una Revisión sobre Métodos de Prospección Geofísica para la Identificación de Zonas Óptimas de Agua Subterránea

Resumen– El acceso sostenible al agua subterránea constituye un desafío creciente debido al aumento poblacional y la presión sobre los recursos hídricos. Ante esta situación, se plantea la necesidad de contar con herramientas precisas para localizar y gestionar aguas subterráneas de manera eficiente. El objetivo de este estudio es determinar métodos de la prospección geofísica para identificar zonas óptimas de aguas subterráneas. Para ello, se analizaron 48 artículos publicados entre 2019 y 2024 provenientes de Scopus y Web of Science. El registro y selección de estudios se llevó a cabo combinando la estrategia PICO y la declaración PRISMA2020. Los resultados muestran que la tomografía de resistividad eléctrica, el sondeo eléctrico vertical (SEV) y el radar de penetración terrestre destacan por su capacidad de generar imágenes detalladas en diversos contextos geológicos. En particular, el SEV alcanza profundidades de hasta 200m de profundidad a un bajo costo. Desde una perspectiva de sostenibilidad, la incorporación de estas técnicas contribuye directamente al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (Agua limpia y saneamiento), ya que permiten mejorar la seguridad hídrica y fortalecer estrategias de adaptación frente a la variabilidad climática. No obstante, persisten desafíos asociados a la transferencia de estas tecnologías hacia contextos con menores capacidades técnicas y financieras.

Palabras clave-- Acuífero, Gestión hídrica sostenible, Hidrogeología, Técnicas Geofísicas.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la creciente demanda sobre los recursos hídricos subterráneos, considerados vitales para la preservación de ecosistemas y actividades humanas, ha promovido el desarrollo de técnicas avanzadas enfocadas en su exploración, caracterización y manejo responsable. En este contexto, los métodos de prospección geofísica se han convertido en herramientas esenciales, al facilitar la localización exacta de acuíferos, la valoración de su potencial hidrogeológico y la reducción de los riesgos asociados a su explotación excesiva [1]. La combinación de datos geofísicos, hidrogeológicos y geomáticos está transformando la comprensión de los acuíferos y mejorando los procesos de toma de decisiones en contextos afectados por el aumento del estrés hídrico y la variabilidad climática [2].

En este ámbito tecnológico, los métodos electromagnéticos han mostrado una notable efectividad, especialmente en regiones costeras, donde su uso ha sido fundamental para identificar la intrusión de sal y definir acuíferos de agua dulce subterránea. Ejemplos representativos

abarcen la investigación que utilizó este método para identificar fuentes de agua dulce en las orillas de San Diego [3], y el estudio enfocado en la isla de Lombok, Indonesia, donde se delinearón con exactitud las áreas impactadas por salinización [4]. En situaciones geológicas complejas, como en terrenos metamórficos, se evidenció el potencial de la prospección magnética y electromagnética mediante drones para localizar zonas clave de captación de agua [5].

La resistividad eléctrica y la tomografía de resistividad se han establecido como métodos fundamentales para el mapeo de formaciones geológicas profundas y la localización de acuíferos ocultos en formaciones heterogéneas [6]. Mediante modelado en dos y tres dimensiones, se han descrito facies sedimentarias complejas, mostrando áreas de saturación de agua de gran relevancia [7]. De igual manera, la combinación de diversos métodos geofísicos ha mostrado ser efectiva para identificar agua en sistemas kársticos, subrayando la flexibilidad metodológica en la solución de variadas problemáticas geohidrológicas [8].

La integración de herramientas geofísicas con tecnologías de análisis espacial, como los Sistemas de Información Geográfica, ha ampliado notablemente el impacto de estas investigaciones [1]. Por ejemplo, la utilización de análisis jerárquico facilitó la creación de mapas de idoneidad hídrica en zonas semiáridas, mientras que métodos geomáticos han conseguido medir con exactitud el potencial subterráneo en entornos topográficamente complejos [9]. Estas metodologías interdisciplinarias permiten abordar las restricciones impuestas por la diversidad litológica y las condiciones climáticas extremas [10]. Un área emergente en este sentido es la aplicación de tecnología no destructiva para caracterizar el subsuelo, en la que sobresale el radar de penetración terrestre [11]. La mejora de los algoritmos de procesamiento ha disminuido el ruido de fondo y aumentado la resolución de estructuras hidrogeológicas, permitiendo aplicaciones que incluyen la detección de cavidades deshabitadas y la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos a través de índices geofísicos compuestos.

La tendencia actual se dirige hacia la hibridación de métodos, integrando distintas técnicas geofísicas para obtener una caracterización más sólida y completa del entorno subterráneo [12]. Se ha evidenciado la importancia de

combinar datos geofísicos con información hidrogeológica en formaciones graníticas y sistemas de recarga artificial, favoreciendo no solo una exploración más efectiva, sino también planes de gestión sostenible del recurso hídrico a largo plazo [13].

En resumen, la evolución y aplicación de técnicas geofísicas en la búsqueda de aguas subterráneas ha progresado hacia una estrategia multidisciplinaria, flexible y que se ajusta a diversas condiciones geológicas y climáticas. Este nuevo paradigma refuerza la prospección geofísica como un elemento clave en la planificación del agua del siglo XXI, enfocado en asegurar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en entornos cada vez más complejos.

II. METODOLOGÍA

Con el objetivo de reconocer los beneficios de los métodos más eficientes para identificar áreas óptimas de captación de agua subterránea, se decidió realizar un análisis a través de una revisión sistemática de la literatura (RSL). Fue conducida estrictamente por la estrategia PICO (Población, Intervención, Comparación y Resultados), una herramienta ampliamente reconocida para la formulación de preguntas de investigación clínica y la recopilación de evidencia científica, con el objetivo de mejorar la toma de decisiones fundamentadas en datos empíricos [14], [15]. No obstante, es importante señalar que se omitió la parte de comparación (C) para realizar un análisis más exhaustivo de los distintos métodos de prospección geofísica usados en la identificación de aguas subterráneas, por lo que este estudio adopta una variante de PICO, conocida como PIO.

Atendiendo a los lineamientos del modelo PIO (detallado en la Tabla 1) se formuló la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las principales ventajas de aplicar métodos de prospección geofísica en la localización de zonas óptimas de agua subterránea? Esta pregunta constituyó el eje estructural para desarrollar una búsqueda exhaustiva y minuciosa de literatura especializada. Para ello, se recurrió a bases de datos de alto impacto como Scopus y Web of Science (WoS) [16], [17].

TABLA I
PALABRAS CLAVES USADAS EN LA ESTRATEGIA PIO

Componente	Descripción	Palabras claves
P (Population)	Aguas subterráneas	Groundwater, ground water, ground, water
I (Intervention)	Métodos de prospección geofísica	Geophysical prospecting, geophysical methods
O (Outcome)	Identificación	Identification, optimisation

En la Tabla II, se muestran las cadenas de búsqueda utilizadas en ambas bases de datos usando las palabras claves registradas en cada componente de la estrategia PIO. Además, se describe los filtros utilizados para ambas cadenas (año de publicación, idioma, tipo de documento y tipo de acceso).

TABLA II
CADENAS DE BÚSQUEDA Y FILTROS UTILIZADOS PARA LA SELECCIÓN DE DOCUMENTOS

Base de Datos	Cadena de Búsqueda
Scopus	TITLE-ABS-KEY ((groundwater OR "ground water" OR ground OR water) AND ("geophysical prospecting" OR "geophysical methods") AND (identification OR optimization)) AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) AND (LIMIT-TO (OA, "all")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))
WoS	TS=((groundwater OR "ground water" OR ground OR water) AND ("geophysical prospecting" OR "geophysical methods") AND (identification OR optimization)) AND PY=(2019-2024) AND LA=(English) AND DT=(Article) AND OA=(All Open Access)
Filtros	• Año de Publicación: 2019–2024. • Idioma: inglés. • Tipo de documento: Artículo Original • Tipo de Acceso: Todo Acceso abierto.

Después de aplicar las cadenas de búsqueda en ambas bases de datos, se identificaron 193 artículos registrados con fecha diciembre del 2024. Para asegurar la validez y pertinencia de los estudios incluidos, se aplicó la metodología PRISMA2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [18], concebida como una guía estructurada que optimiza la transparencia, rigurosidad y reproducibilidad de los procesos de selección y análisis de literatura científica [19].

En una primera fase de depuración, se eliminaron 39 estudios duplicados mediante el uso de identificadores DOI en Microsoft Excel, obteniendo un total de 154 artículos para el proceso inicial de cribado. Posteriormente, mediante un análisis preliminar de títulos y resúmenes, se descartaron 105 artículos que no cumplían con los objetivos de la investigación, quedando 59 estudios para una evaluación detallada a texto completo. De estos, 6 no fueron recuperables en su totalidad, por lo cual fueron excluidos de la revisión. A su vez, 5 de los 53 documentos restantes, se eliminaron por carecer de pertinencia respecto a los métodos de prospección geofísica enfocados a la detección de agua subterránea (Criterio de Exclusión 1 – C.E.1), o por desviarse del enfoque central del estudio (Criterio de Exclusión 2 – C.E.2).

Finalmente, tras aplicar rigurosamente los criterios de exclusión establecidos, el corpus final quedó conformado por 48 documentos que fueron usados para el proceso de análisis de resultados de la presente revisión.

En la Fig. 1 se resume, mediante un diagrama de flujo, el proceso de selección mediante la declaración PRISMA2020 abarcando las tres fases: Identificación, cribado e inclusión de documentos.

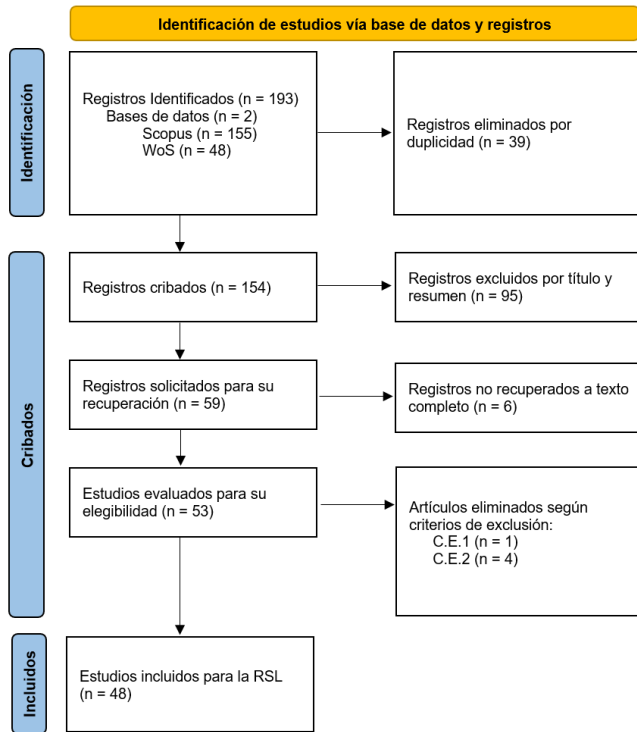


Fig. 1: Diagrama de flujo de la declaración PRISMA2020

III. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

A partir del análisis minucioso de los 48 artículos científicos elegidos, se deduce que una parte considerable de estos aborda de forma completa las preguntas planteadas según la estrategia metodológica PIO, descrita en la Tabla I. En concreto, se observó que el 75% de los estudios se enfocan en la dimensión referente a la Población (P), dirigiendo su atención a los retos asociados con la localización de aguas subterráneas, especialmente en entornos geológicos complicados o áreas con limitada disponibilidad de datos hidrogeológicos.

Respecto al componente de Intervención (I), un 81.25% de los estudios analizados investiga detalladamente los diversos métodos de prospección geofísica utilizados, incluyendo desde técnicas tradicionales hasta enfoques vanguardistas combinados con sistemas de análisis espacial y modelado 3D. Este elevado porcentaje indica el dinamismo en la investigación acerca de la implementación y mejora de esas metodologías.

En relación a la componente Resultado (O), se notó que el 60.42% de los artículos presenta una crítica sobre la efectividad de las técnicas utilizadas, considerando su influencia en la identificación y delimitación de áreas potenciales para la recolección de agua subterránea. Esta

dimensión es fundamental para determinar la importancia operativa y la utilidad práctica de los descubrimientos.

Los artículos correspondientes a cada componente PIO se registran explícitamente en la Tabla III, lo que proporciona una visión clara y organizada del nivel de alineación metodológica de la literatura examinada.

TABLA III
ARTÍCULOS SELECCIONADOS PARA LA RSL ASOCIADOS CON LAS COMPONENTES PIO

Componente	Pregunta asociada	Referencias
P	¿Qué dificultades se reportan en la localización de aguas subterráneas?	[1], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [13], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44]
I	¿Qué métodos de prospección geofísica son usados en la localización de aguas subterráneas?	[1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [13], [20], [21], [22], [23], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [33], [34], [35], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49]
O	¿Cómo influyen las técnicas de prospección geofísica en la identificación de zonas óptimas de aguas subterráneas?	[1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [13], [20], [21], [23], [25], [30], [31], [33], [37], [39], [41], [42], [43], [44], [45], [47], [48], [49]

El estudio de la distribución geográfica de las publicaciones muestra una destacada concentración de investigaciones en Suiza, nación que ocupa el primer lugar con 31 artículos, lo que equivale al 64.58% del total de los estudios analizados. Seguidos de Reino Unido y Alemania, con 5 artículos cada uno (10.42%). Esta distribución muestra no solo una variedad regional en las contribuciones científicas, sino también una notable predominancia europea en la producción de conocimiento relacionado con la prospección geofísica de recursos hídricos subterráneos. Igualmente, destaca la importancia de la cooperación internacional y el papel destacado de algunas entidades académicas en el progreso metodológico y tecnológico de esta área de investigación (Ver Fig. 2).

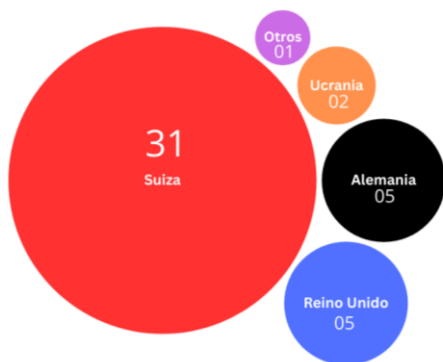


Fig. 2: Países de la revista de los 48 artículos reportados

A continuación, se detallan las preguntas asociadas a las componentes PIO, reportadas en la Tabla III.

A. *¿Qué dificultades se reportan en la localización de aguas subterráneas?*

La localización de aguas subterráneas constituye un proceso complejo, sobre todo en regiones donde el acceso al agua es limitado. Entre las problemáticas más recurrentes, se encuentran una geografía del terreno, formaciones geológicas, hidrología, infraestructura, entre otros (ver Fig. 3). Para un mejor entendimiento, se describen a continuación las dificultades registradas en la presente revisión.

1) *Geografía del terreno*: La geografía de la propia superficie del terreno muestra topografías irregulares que evidencian su carácter endorreico, lo que determina, además, la infiltración y el almacenamiento de agua subterránea [28]. La variación de resistividad que detecta la técnica de prospección geofísica muestra contrastes en composición y saturación de los materiales del subsuelo, tales que permiten diferenciar zonas con mayor y menor potencial de acumulación de agua, o bien zonas pertenecientes a sectores armados, compacto o impermeables [37]. A fin de identificar estas heterogeneidades son necesarios los métodos eléctricos y electromagnéticos porque con ellos se pueden delimitar esas heterogeneidades que permiten localizar más acertadamente las zonas óptimas para la explotación sostenible de los recursos de agua subterránea.

2) *Formaciones geológicas*: Las estructuras geológicas existentes se relacionan con suelos depositados y materiales sueltos. Este tipo de depósitos tiende a tener una mayor capacidad de porosidad y permeabilidad, lo que favorece la entrada y el desplazamiento del agua subterránea [5]. Mediante técnicas de exploración geofísica, particularmente las eléctricas, se pueden detectar diferencias en resistividad que están vinculadas a estos materiales [31]. Estas diferencias permiten distinguir áreas con un mayor potencial para almacenar agua en comparación con otras que son menos adecuadas. Por lo tanto, su análisis es crucial para la

identificación de acuíferos y la administración responsable del recurso.

3) *Hidrología*: La hidrología del área evidencia la presencia de agua no potable, lo que limita su aprovechamiento directo para consumo humano. Adicionalmente, se detectan fugas subterráneas que generan pérdidas y modifican el flujo natural del acuífero [4]. Estos fenómenos producen variaciones en la resistividad del terreno, detectables mediante métodos de prospección geofísica. Su análisis permite identificar zonas de recarga afectadas y sectores con riesgo de contaminación [36]. De esta forma, se delimitan áreas prioritarias para la gestión y control de los recursos hídricos subterráneos.

4) *Infraestructura y exploración*: La investigación sobre el agua en esta zona muestra que hay agua que no se puede consumir, lo que impide su uso directo para las personas [35]. Además, se han encontrado pérdidas de agua en el subsuelo que alteran el curso natural del agua subterránea. Estos eventos provocan cambios en la conductividad del suelo, los cuales se pueden medir con técnicas de exploración geofísica. El estudio de estos cambios ayuda a localizar las áreas de recarga que están en riesgo y partes que pueden estar contaminadas [38]. Así, se establecen zonas prioritarias para administrar y regular los recursos hídricos subterráneos.

5) *Factores sociales*: Los elementos sociales tienen un efecto directo en la calidad del agua subterránea y en cómo se puede acceder a ella. El crecimiento de la población aumenta la necesidad de este recurso y pone presión sobre los acuíferos [23]. Al mismo tiempo, la falta de una buena organización en la gestión del agua complica la realización de estudios técnicos y controles eficientes. Estas situaciones pueden acelerar la extracción excesiva y el deterioro del agua [5]. Por lo tanto, los análisis de prospección geofísica son esenciales para asegurar un uso sostenible frente a estos retos sociales.

6) *Factores ambientales*: Los elementos del entorno impactan de manera directa en la búsqueda y uso de aguas subterráneas. La falta de condiciones climáticas adecuadas disminuye los niveles de renovación natural de los acuíferos, lo que crea una presión sobre este recurso [41]. De igual manera, la alteración del paisaje cambia las condiciones en la superficie y dificulta la lectura de datos geofísicos. Estos factores generan cambios en las mediciones de resistividad y en la detección de áreas prometedoras [20]. Por esta razón, es fundamental tener en cuenta las condiciones ambientales en los análisis de prospección geofísicas.

La localización de aguas subterráneas no puede entenderse solo como un problema técnico, sino como un proceso complejo en el que intervienen factores físicos, limitaciones metodológicas y presiones humanas. La interpretación de datos geofísicos suele verse afectada por la interacción de variables geológicas, hidrológicas y ambientales, lo que aumenta la incertidumbre en la delimitación de acuíferos. A ello se suma que una gestión inadecuada del recurso hídrico puede derivar en decisiones basadas en información incompleta, incrementando el riesgo de sobreexplotación. Por

ello, resulta necesario un enfoque integrador que articule técnicas geofísicas con análisis hidrogeológicos y planificación territorial, con el fin de mejorar la identificación de zonas potenciales y promover un uso sostenible del recurso.

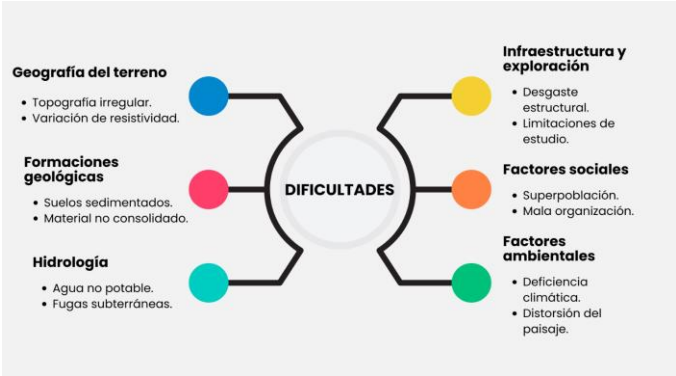


Fig. 3: Principales dificultades reportadas en la localización de aguas subterráneas

B. *¿Qué métodos de prospección geofísica se utilizan para localizar agua subterránea?*

Complementariamente, se procedió a la clasificación de los métodos geofísicos más relevantes empleados en la exploración hidrogeológica, agrupándolos en dos categorías principales: Resistividad y Geofísicos.

- *Método de resistividad:* La resistividad es una propiedad física del subsuelo que mide la oposición de los materiales al paso de la corriente eléctrica. Su análisis permite identificar variaciones en la

- composición y el grado de saturación de agua, siendo clave para localizar acuíferos y estructuras geológicas.
- *Método geofísico:* Este método geofísico hace referencia al estudio de las propiedades físicas de la Tierra mediante métodos indirectos, como ondas sísmicas, electromagnéticas o eléctricas. Ello, permiten caracterizar el subsuelo sin necesidad de perforaciones, facilitando la exploración de agua, minerales y estructuras geológicas.

A su vez, de cada método se sub clasificaron técnicas particulares, las cuales son descritas en la Tabla IV. Esta organización permitió identificar no solo la frecuencia de uso de cada técnica, sino también su aplicabilidad según los distintos contextos geológicos abordados en la literatura especializada. A continuación, se describen las técnicas tanto de los métodos de resistividad como de tipo geofísico.

TABLA IV
MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA APLICADAS A LA LOCALIZACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEAS

Método	Técnica	Profundidad (m)	Ventajas	Referencias
Resistividad	ERT	[0-100]	Imágenes 2D/3D. Útiles en áreas complejas.	[13], [34], [37], [38], [39], [40]
	SEV	[0-200]	Bajo costo	[5], [6], [9], [11], [23], [28], [33], [36]
	SEV + EC	[0-200]	Identificación de varios tipos de agua.	[13], [34], [37], [38], [39]
Geofísico	GPR	[0-10]	Alta resolución. Detección de estructuras finas y superficiales	[20], [21], [25], [26], [27], [29], [31], [31], [34], [35], [38], [40], [44], [46], [49]
	IP	[10-100]	Detecta arcillas y minerales metálicos.	[1], [6]
	P	[0-30]	Viable para detectar el flujo natural de las aguas subterráneas.	[[30], [47], [48]

1) *Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)*: La ERT determina la resistividad eléctrica del terreno utilizando una serie de electrodos colocados en la superficie. Con este método se crean secciones 2D o incluso modelos 3D que ilustran la variación de materiales en profundidad. Es especialmente valioso para reconocer acuíferos, huecos y

formaciones geológicas intrincadas. Su alcance puede alcanzar hasta aproximadamente 100 metros, dependiendo de la disposición de los electrodos.

2) *Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)*: El SEV facilita la obtención de un perfil de resistividad en profundidad directamente debajo del lugar de medición. Se utiliza en gran medida en investigaciones hidrogeológicas y caracterización fundamental del suelo. Alcanza profundidades de hasta 200 metros en situaciones favorables.

3) *Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) + Conductividad Eléctrica (EC)*: La integración del SEV con lecturas de conductividad eléctrica facilita la identificación de agua dulce, salobre y salina en el subsuelo. Esta conexión optimiza la comprensión hidrogeológica al proporcionar más precisión en la descripción de los acuíferos. El método es muy útil para investigaciones sobre la calidad del agua subterránea. Su capacidad de penetración es comparable a la del SEV tradicional.

4) *Radar de Penetración Terrestre (GPR)*: El GPR emplea ondas electromagnéticas de alta frecuencia que ingresan en el suelo y se reflejan según las variaciones de los materiales. Estas consideraciones posibilitan la creación de imágenes de alta definición, ya sea en 2D o en 3D. Es altamente efectivo para identificar estructuras superficiales y delgadas. La profundidad de su investigación suele variar entre 0 a 10 o hasta 30 metros, según las condiciones del terreno.

5) *Polarización Inducida (IP)*: El método de IP evalúa la reacción demorada del subsuelo después de aplicar una corriente eléctrica. Esta característica es valiosa para identificar arcillas y minerales metálicos, lo que la hace muy aplicable en la exploración minera y en investigaciones ambientales. Asimismo, colabora en complementar técnicas de resistividad en áreas con materiales conductores. Su rango habitual de estudio se encuentra entre 10 y 100 metros.

6) *Potencial Espontáneo (SP)*: El SP se basa en variaciones naturales de voltaje en el suelo, sin requerir la inyección de corriente eléctrica. Es un método accesible, veloz y no intrusivo, ampliamente utilizado en hidrogeología. Es especialmente efectivo para identificar corrientes de agua subterránea o actividad hidrotermal. Su uso se restringe a profundidades superficiales, usualmente de algunos a decenas de metros.

En conjunto, la implementación integrada de estas técnicas permite mejorar la precisión, fiabilidad y resolución espacial en la localización y caracterización de aguas subterráneas. No obstante, la literatura evidencia que ningún método por sí solo es suficiente para resolver la complejidad hidrogeológica del subsuelo, por lo que su uso combinado constituye una estrategia más robusta frente a la incertidumbre inherente de los modelos geofísicos.

En la Fig. 4 se presentan las profundidades de investigación asociadas a cada técnica, evidenciando las diferencias en su capacidad de exploración vertical y su complementariedad metodológica.

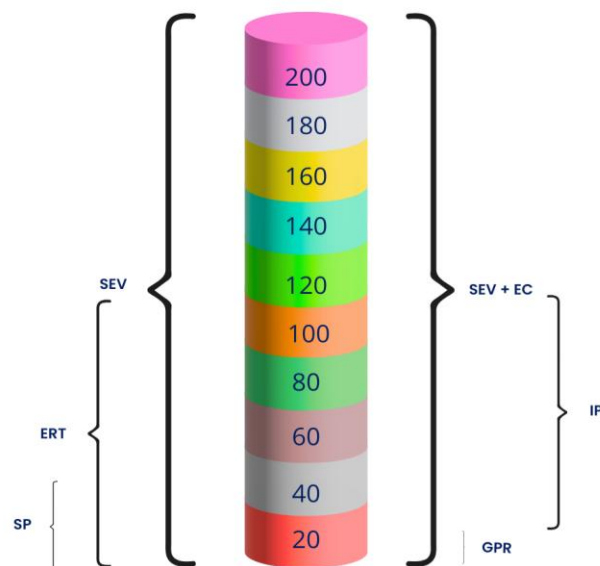


Fig. 4: Profundidad en metros de las técnicas de prospección geofísica.

C. ¿Cómo influyen las técnicas de prospección geofísica en la identificación de zonas óptimas de aguas subterráneas?

El método de resistividad, utilizado a través de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) y el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), proporciona la ventaja de crear modelos en 2D y 3D del subsuelo que facilitan la identificación de acuíferos, cavidades y estructuras complejas con gran precisión [6], [34]. No obstante, su efectividad está condicionada por la calidad de la inversión de datos y la heterogeneidad del terreno, lo que puede generar ambigüedades en la interpretación si no se cuenta con validación de campo.

Mientras la ERT ofrece mayor resolución espacial en contextos complejos, el SEV representa una alternativa más económica, aunque con menor capacidad para captar

variaciones laterales. La integración del SEV con mediciones de conductividad eléctrica (SEV + EC) amplía el alcance interpretativo al permitir diferenciar tipos de agua según su salinidad, reduciendo parcialmente la incertidumbre asociada a las anomalías de resistividad. Sin embargo, esta mejora depende de condiciones físico-químicas del medio y de una adecuada calibración, por lo que no elimina completamente las limitaciones del método.

Por su parte, técnicas como GPR, la Polarización Inducida (IP) y el Potencial Espontáneo (SP) actúan principalmente como herramientas complementarias. El GPR ofrece alta resolución en zonas superficiales, aunque su desempeño se restringe en medios conductivos; la IP aporta información sobre materiales con comportamiento electroquímico, pero con mayor complejidad interpretativa; y el SP permite identificar flujos subterráneos de forma no invasiva, aunque es sensible al ruido ambiental.

De manera global, el valor de estas técnicas no reside en su desempeño individual, sino en su integración, dado que ninguna resuelve por sí sola la complejidad del subsuelo. La evidencia indica que la delimitación de zonas óptimas exige enfoques multimétodo y validación hidrogeológica, siendo esta articulación la que realmente reduce la incertidumbre y evita decisiones basadas en interpretaciones parciales.

IV. CONCLUSIÓN

La topografía irregular y las formaciones geológicas con suelos sedimentados o materiales no consolidados representan las principales barreras para la exploración de aguas subterráneas. Además, factores ambientales y sociales, como el impacto del clima y la infraestructura limitada, también afectan la identificación de zonas óptimas.

Los métodos de prospección geofísica se agrupan en dos categorías principales: resistividad eléctrica (ERT, SEV, SEV+EC) y métodos geofísicos (GPR, IP, SP). Entre ellos, la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) ha sido identificada como la técnica más efectiva, destacada en el 30% de los estudios, seguida del SEV y el GPR, que han demostrado ser particularmente útiles en la localización precisa de estructuras acuíferas. Asimismo, técnicas como la IP y SP aportan valor en contextos específicos.

En algunos casos, la integración de métodos geofísicos con algoritmos de optimización, como el Enjambre de Partículas (PSO), ha permitido mejorar la interpretación de datos, pero más como un complemento metodológico que como una categoría independiente.

En conclusión, la prospección geofísica se confirma como una herramienta esencial para la identificación eficiente de zonas óptimas de agua subterránea, superando limitaciones

geológicas y topográficas. Su aplicación integrada y multidisciplinaria optimiza la exploración y la gestión sostenible de acuíferos.

V. FUTUROS DESAFIOS

La revisión sistemática realizada confirma que los métodos de prospección geofísica constituyen herramientas indispensables para la gestión sostenible del agua subterránea. Sin embargo, los resultados también ponen en evidencia limitaciones prácticas y oportunidades de mejora que deben ser consideradas en la investigación y en la aplicación técnica.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la incorporación de estas técnicas contribuye directamente al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (Agua limpia y saneamiento), ya que permiten mejorar la seguridad hídrica y fortalecer estrategias de adaptación frente a la variabilidad climática. No obstante, persisten desafíos asociados a la transferencia de estas tecnologías hacia contextos con menores capacidades técnicas y financieras, donde la accesibilidad económica y la formación de personal especializado siguen siendo limitantes críticas.

En cuanto a la innovación tecnológica, se observa una tendencia creciente hacia la integración de inteligencia artificial, aprendizaje automático y sistemas no tripulados (como drones) para optimizar la adquisición e interpretación de datos geofísicos. Estas herramientas emergentes no solo prometen aumentar la resolución espacial y temporal, sino también reducir costos y tiempos de campaña, lo cual amplía la aplicabilidad de los estudios en regiones con escasa infraestructura.

Se identifican, además, vacíos de conocimiento en la aplicación de enfoques interdisciplinarios que integren datos geofísicos con información socioeconómica y de gestión territorial. Avanzar hacia modelos híbridos que combinen prospección geofísica, sensores remotos, modelación numérica y participación comunitaria permitirá diseñar políticas de gestión hídrica más robustas y socialmente inclusivas.

En síntesis, los futuros desafíos en este campo incluyen: (i) democratizar el acceso a tecnologías avanzadas mediante la reducción de costos y el desarrollo de herramientas de código abierto; (ii) consolidar metodologías híbridas que potencien la precisión y la escalabilidad de los resultados; y (iii) promover marcos de cooperación internacional que impulsen el intercambio de buenas prácticas y la formación de capacidades en países con mayor vulnerabilidad hídrica.

REFERENCIAS

- [1] H. El Ayady *et al.*, «Investigation of groundwater potential using geomatics and geophysical methods: Case study of the Anzi sub-basin, western Anti-Atlas, Morocco», *Advances in Space Research*, vol. 72, n.º 9, pp. 3960-3981, nov. 2023, doi: 10.1016/j.asr.2023.08.044.

- [2] P. Szűcs, N. P. Szabó, M. Zubair, y S. Szalai, «Innovative Hydrogeophysical Approaches as Aids to Assess Hungarian Groundwater Bodies», *Applied Sciences*, vol. 11, n.º 5, p. 2099, feb. 2021, doi: 10.3390/app11052099.
- [3] R. B. King, W. R. Danskin, S. Constable, y J. M. Maloney, «Identification of fresh submarine groundwater off the coast of San Diego, USA, using electromagnetic methods», *Hydrogeol J*, vol. 30, n.º 3, pp. 965-973, may 2022, doi: 10.1007/s10040-022-02463-y.
- [4] A. T. Alaydrus, A. Susilo, A. Naba, S. Minardi, y A. P. Azhari, «Investigation of Seawater Intrusion in Mandalika, Lombok, Indonesia Using Time-Lapse Geoelectrical Resistivity Survey», *IJDNE*, vol. 19, n.º 1, pp. 1-11, feb. 2024, doi: 10.18280/ijdne.190101.
- [5] J. C. García, P. C. García, D. P. Sanchiz, I. M. Nieto, C. S. Blázquez, y P. H. Hurtado, «Drone Magnetic and Time Domain Electromagnetic Exploration in Metamorphic Formations: Tool for the Identification of Strategic Sites for Aquifer Exploitation», *Applied Sciences*, vol. 13, n.º 19, p. 10949, oct. 2023, doi: 10.3390/app131910949.
- [6] A. Masria, T. O. Alshammari, M. Ghareeb, A. K. Seif, M. E. Abd-Elmaboud, y A. I. Ammar, «2D and 3D Modeling of Resistivity and Chargeability to Identify the Type of Saturated Groundwater for Complex Sedimentary Facies», *Hydrology*, vol. 11, n.º 8, p. 120, ago. 2024, doi: 10.3390/hydrology11080120.
- [7] C. Du, Y. Chen, H. Xie, X. Lai, y J. Lin, «Epikarst water detection using integrated geophysical methods», *Heliyon*, vol. 9, n.º 7, p. e17596, jul. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17596.
- [8] F. Z. Echogdali *et al.*, «Application of Analytical Hierarchy Process and Geophysical Method for Groundwater Potential Mapping in the Tata Basin, Morocco», *Water*, vol. 14, n.º 15, p. 2393, ago. 2022, doi: 10.3390/w14152393.
- [9] Y. Liu, M. Liu, J. Xing, y Y. Ye, «Dual-Parameter Simultaneous Full Waveform Inversion of Ground-Penetrating Radar for Arctic Sea Ice», *Remote Sensing*, vol. 15, n.º 14, p. 3614, jul. 2023, doi: 10.3390/rs15143614.
- [10] S. Zhang, P. Jiang, L. Lu, S. Wang, y H. Wang, «Evaluation of Compressive Geophysical Prospecting Method for the Identification of the Abandoned Goaf at the Tengzhou Section of China's Mu Shi Expressway», *Sustainability*, vol. 14, n.º 21, p. 13785, oct. 2022, doi: 10.3390/su142113785.
- [11] S. H. I. A. Shah *et al.*, «Classification of Aquifer Vulnerability by Using the DRASTIC Index and Geo-Electrical Techniques», *Water*, vol. 13, n.º 16, p. 2144, ago. 2021, doi: 10.3390/w13162144.
- [12] R. Moua, N. Lesparre, J.-F. Girard, B. Belfort, F. Lehmann, y A. Younes, «Coupled hydrogeophysical inversion of an artificial infiltration experiment monitored with ground-penetrating radar: synthetic demonstration», *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 27, n.º 23, pp. 4317-4334, dic. 2023, doi: 10.5194/hess-27-4317-2023.
- [13] H. Nouradine, C. Schamper, D. Valdes, I. Moussa, D. Ramel, y V. Plagnes, «Integrating geological, hydrogeological and geophysical data to identify groundwater resources in granitic basement areas (Guéra Massif, Chad)», *Hydrogeol J*, vol. 32, n.º 3, pp. 759-784, may 2024, doi: 10.1007/s10040-024-02766-2.
- [14] E. Giammarinaro, N. Baldini, U. Covani, M. Menini, P. Pesce, y S. Marconcini, «Does platelet-rich fibrin enhance the outcomes of peri-implant soft tissues? A systematic review», *BMC Oral Health*, vol. 25, n.º 1, p. 615, abr. 2025, doi: 10.1186/s12903-025-05922-6.
- [15] E. J. Chocobar Reyes y R. F. Barreda Medina, «Estructuras metodológicas PICO y PRISMA 2020 en la elaboración de artículos de revisión sistemática: Lo que todo investigador debe conocer y dominar», *Ciencia Latina*, vol. 9, n.º 1, pp. 8525-8543, mar. 2025, doi: 10.37811/cl_rcm.v9i1.16491.
- [16] J. Baas, M. Schotten, A. Plume, G. Côté, y R. Karimi, «Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies», *Quantitative Science Studies*, vol. 1, n.º 1, pp. 377-386, feb. 2020, doi: 10.1162/qss_a_00019.
- [17] C. Birkle, D. A. Pendlebury, J. Schnell, y J. Adams, «Web of Science as a data source for research on scientific and scholarly activity», *Quantitative Science Studies*, vol. 1, n.º 1, pp. 363-376, feb. 2020, doi: 10.1162/qss_a_00018.
- [18] M. J. Page *et al.*, «Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas», *Revista Española de Cardiología*, vol. 74, n.º 9, pp. 790-799, sep. 2021, doi: 10.1016/j.recesp.2021.06.016.
- [19] S. Sánchez-Serrano, I. Pedraza-Navarro, y M. Donoso-González, «¿Cómo hacer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA?: Usos y estrategias fundamentales para su aplicación en el ámbito educativo a través de un caso práctico», *Bordón*, vol. 74, n.º 3, pp. 51-66, sep. 2022, doi: 10.13042/Bordon.2022.95090.
- [20] R. Moua, N. Lesparre, J.-F. Girard, B. Belfort, F. Lehmann, y A. Younes, «Coupled hydrogeophysical inversion of an artificial infiltration experiment monitored with ground-penetrating radar: synthetic demonstration», *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 27, n.º 23, pp. 4317-4334, dic. 2023, doi: 10.5194/hess-27-4317-2023.
- [21] E. Colica *et al.*, «Evaluating Characteristics of an Active Coastal Spreading Area Combining Geophysical Data with Satellite, Aerial, and Unmanned Aerial Vehicles Images», *Remote Sensing*, vol. 15, n.º 5, p. 1465, mar. 2023, doi: 10.3390/rs15051465.
- [22] M. Mishra y A. K. Patidar, «Post-drill geophysical characterization of two deep-water wells of Cauvery Basin, East Coast of India», *J Petrol Explor Prod Technol*, vol. 13, n.º 1, pp. 275-295, ene. 2023, doi: 10.1007/s13202-022-01550-w.
- [23] X. Huang *et al.*, «Multi-Step Combined Control Technology for Karst and Fissure Water Inrush Disaster During Shield Tunneling in Spring Areas», *Front. Earth Sci.*, vol. 9, p. 795457, dic. 2021, doi: 10.3389/feart.2021.795457.
- [24] I. Ahmed *et al.*, «Geothermal Resource Exploration in Reshi Town by Integrated Geophysical Methods», *Energies*, vol. 17, n.º 4, p. 856, feb. 2024, doi: 10.3390/en17040856.
- [25] F. Lin, H. Ren, J. Yang, Y. Li, B. Kang, y Y. Tao, «Tracking chlorinated contaminants in the subsurface using analytical, numerical and geophysical methods», *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, p. 1002372, sep. 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.1002372.
- [26] B. Vittecoq *et al.*, «Montagne Pelée volcano (Martinique, in the French Lesser Antilles) hydrogeological system revealed by high-resolution helicopter-borne electromagnetic imagery», *Hydrogeol J*, vol. 31, n.º 5, pp. 1331-1352, ago. 2023, doi: 10.1007/s10040-023-02642-5.
- [27] Q. Kong *et al.*, «A Clutter Removal Method Based on the F-K Domain for Ground-Penetrating Radar in Complex Scenarios», *Remote Sensing*, vol. 16, n.º 6, p. 935, mar. 2024, doi: 10.3390/rs16060935.
- [28] T. Gołębowski, B. Piwakowski, M. Ćwiklik, y A. Bojarski, «Application of Combined Geophysical Methods for the Examination of a Water Dam Subsoil», *Water*, vol. 13, n.º 21, p. 2981, oct. 2021, doi: 10.3390/w13212981.
- [29] A. Abordán y N. P. Szabó, «Machine learning based approach for the interpretation of engineering geophysical sounding logs», *Acta Geod Geophys*, vol. 56, n.º 4, pp. 681-696, dic. 2021, doi: 10.1007/s40328-021-00354-4.
- [30] S. Grassi *et al.*, «Integration of Geophysical Survey Data for the Identification of New Archaeological Remains in the Subsoil of the Akrai Greek Site (Sicily, Italy)», *Heritage*, vol. 6, n.º 2, pp. 979-992, ene. 2023, doi: 10.3390/heritage6020055.
- [31] S. Liu *et al.*, «Particle Swarm Optimization-Based Variational Mode Decomposition for Ground Penetrating Radar Data Denoising», *Remote Sensing*, vol. 14, n.º 13, p. 2973, jun. 2022, doi: 10.3390/rs14132973.
- [32] I. Arpacı, A. Kaya, y M. Bahari, «Investigating the Influence of an Arduino-Based Educational Game on the Understanding of Genetics among Secondary School Students», *Sustainability*, vol. 15, n.º 8, p. 6942, abr. 2023, doi: 10.3390/su15086942.
- [33] H. Hapich, O. Orlinska, D. Pikarenia, I. Chushkina, A. Pavlychenko, y H. Roubik, «Prospective methods for determining water losses from irrigation systems to ensure food and water security of Ukraine», *Nauk. visn. nat. hirn. univ.*, n.º 2, pp. 154-160, abr. 2023, doi: 10.33271/nvngu/2023-2/154.
- [34] T. Gołębowski, B. Piwakowski, y M. Ćwiklik, «Application of Complex Geophysical Methods for the Detection of Unconsolidated Zones in Flood Dikes», *Remote Sensing*, vol. 14, n.º 3, p. 538, ene. 2022, doi: 10.3390/rs14030538.
- [35] Y. Ding, B. Yang, G. Xu, y X. Wang, «Improved Dempster-Shafer Evidence Theory for Tunnel Water Inrush Risk Analysis Based on Fuzzy Identification Factors of Multi-Source Geophysical Data», *Remote Sensing*, vol. 14, n.º 23, p. 6178, dic. 2022, doi: 10.3390/rs14236178.
- [36] R. Maharaj, S. Kumar, N. Rollings, y A. Antoniou, «Groundwater Detection Using Resistivity at Nubutautau Village in Viti Levu in Fiji», *Water*, vol. 15, n.º 23, p. 4156, nov. 2023, doi: 10.3390/w15234156.

- [37] L. M. Puzzilli *et al.*, «Natural Sinkhole Monitoring and Characterization: The Case of Latera Sinkhole (Latium, Central Italy)», *Geosciences*, vol. 14, n.º 1, p. 18, ene. 2024, doi: 10.3390/geosciences14010018.
- [38] A. M. Abudeif *et al.*, «Geophysical Prospecting of the Coptic Monastery of Apa Moses Using GPR and Magnetic Techniques: A Case Study, Abydos, Sohag, Egypt», *Sustainability*, vol. 15, n.º 14, p. 11119, jul. 2023, doi: 10.3390/su151411119.
- [39] C. A. Moreira, M. F. S. Casagrande, F. M. De Siqueira Büchi, y D. A. Targa, «Hydrogeological characterization of a waste rock pile and bedrock affected by acid mine drainage from geophysical survey», *SN Appl. Sci.*, vol. 2, n.º 7, p. 1236, jul. 2020, doi: 10.1007/s42452-020-3021-8.
- [40] M. Cozzolino *et al.*, «The Contribution of Geophysics to the Knowledge of the Hidden Archaeological Heritage of Montenegro», *Geosciences*, vol. 10, n.º 5, p. 187, may 2020, doi: 10.3390/geosciences10050187.
- [41] S. Bagriy y Eduard KUZMENKO, «Assessment of the influence of technogenically triggered hydrodynamic processes on groundwater contamination in the area of Kalush mining industry by applying geophysical methods», *JGD*, vol. 1(32)2022, n.º 1(32), pp. 119-135, jun. 2022, doi: 10.23939/jgd2022.02.119.
- [42] M. A. A. Mohammed *et al.*, «Investigation of petrophysical and hydrogeological parameters of the transboundary Nubian Aquifer system using geophysical methods», *Front. Earth Sci.*, vol. 11, p. 1295213, ene. 2024, doi: 10.3389/feart.2023.1295213.
- [43] Q. Mehmood *et al.*, «Optimizing groundwater quality exploration for irrigation water wells using geophysical technique in semi-arid irrigated area of Pakistan», *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 11, p. 100397, oct. 2020, doi: 10.1016/j.gsd.2020.100397.
- [44] G. Li, W. Ma, S. Tian, Z. Hongbo, F. Huabin, y W. Zou, «Groundwater Inrush Control and Parameters Optimization of Curtain Grouting Reinforcement for the Jingzhai Tunnel», *Geofluids*, vol. 2021, pp. 1-10, ene. 2021, doi: 10.1155/2021/6634513.
- [45] N. Iftimie, A. Savin, R. Steigmann, y G. S. Dobrescu, «Underground Pipeline Identification into a Non-Destructive Case Study Based on Ground-Penetrating Radar Imaging», *Remote Sensing*, vol. 13, n.º 17, p. 3494, sep. 2021, doi: 10.3390/rs13173494.
- [46] Z. Huang, G. Xu, J. Tang, H. Yu, y D. Wang, «Research on Void Signal Recognition Algorithm of 3D Ground-Penetrating Radar Based on the Digital Image», *Front. Mater.*, vol. 9, p. 850694, mar. 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.850694.
- [47] Q. Dai, H. Zhang, y B. Zhang, «An Improved Particle Swarm Optimization Based on Total Variation Regularization and Projection Constraint with Applications in Ground-Penetrating Radar Inversion: A Model Simulation Study», *Remote Sensing*, vol. 13, n.º 13, p. 2514, jun. 2021, doi: 10.3390/rs13132514.
- [48] A.-F. Plata-Galvis, J.-O. Serrano-Luna, A.-B. Ramirez-Silva, y S.-A. Abreo-Carrillo, «Characterization of a ground penetrating radar shielded antenna using laboratory measurements, FDTD modeling and swarm global optimization», *CT&F Cienc. Tecnol. Futuro*, vol. 12, n.º 1, pp. 57-67, jun. 2022, doi: 10.29047/01225383.361.
- [49] Y. Jin y Y. Duan, «Wavelet Scattering Network-Based Machine Learning for Ground Penetrating Radar Imaging: Application in Pipeline Identification», *Remote Sensing*, vol. 12, n.º 21, p. 3655, nov. 2020, doi: 10.3390/rs12213655.