

**EFFECTIVIDAD Y APLICACIONES DE IMÁGENES SATELITALES Y SENSORES  
REMOTOS EN LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS: ANÁLISIS Y  
RECOMENDACIONES PARA EL CONTEXTO COLOMBIANO.**

**Effectiveness and Applications of Satellite Imagery and Remote Sensing in  
Groundwater Exploration: Analysis and Recommendations for the Colombian  
Context.**

**JUAN ANDRÉS VARGAS AGUDELO**

**Trabajo de grado**

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA**

**GEOLOGÍA**

**MEDELLÍN**

**2024**

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. BASES TEÓRICAS Y PRINCIPIOS DE TELEDETECCIÓN EN LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	3
3. PRINCIPALES MÉTODOS DE TELEDETECCIÓN UTILIZADOS .....	4
3.1. MÉTODOS SATELITALES .....	4
3.1.1. LANDSAT .....	5
3.1.2. MODIS .....	6
3.1.3. SMAP .....	6
3.1.4. Satélites Sentinel .....	7
3.1.5. TerraSAR-X.....	8
Tecnología de radar de apertura sintética (SAR):.....	8
Tecnología de imágenes satelitales multiespectrales e hiperespectrales: .....	9
3.2. MÉTODOS SATELITALES BASADOS EN GRAVIMETRÍA .....	10
3.3. MÉTODOS DE OBTENCIÓN AÉREA .....	10
3.3.1. LiDAR .....	11
3.3.2. AEM .....	11
4. PARÁMETROS CLAVE EN LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS MEDIANTE TELEDETECCIÓN.....	13
4.1. CONDICIONES GEOLÓGICAS.....	14
4.2. FACTORES CLIMÁTICOS.....	15
4.3. RESOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL .....	15
4.4. INSTRUMENTOS Y SENSORES.....	15
5. EFECTIVIDAD DE LOS MÉTODOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	16

6. ADAPTACIÓN DE MÉTODOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN COLOMBIA. ....	20
7. SELECCIÓN ESTRATÉGICA DE MÉTODOS DE TELEDETECCIÓN EN COLOMBIA.....	21
7.1. PRIMER ESCENARIO:.....	22
7.2. SEGUNDO ESCENARIO: .....	22
7.3. TERCER ESCENARIO: .....	22
7.4. CUARTO ESCENARIO: .....	23
8. CONCLUSIONES.....	24
9. REFERENCIAS .....	26

#### LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Propiedades técnicas de cada método de teledetección. ....	12
<b>Tabla 2.</b> Fortalezas y limitaciones de los métodos de teledetección.....	18
<b>Tabla 3.</b> Métodos más adecuados para distintos escenarios en el contexto colombiano. ....	23

#### LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Alcance máximo en cada uno de los escenarios planteados. ....	24
--	----

## RESUMEN

Este trabajo explora cómo las imágenes satelitales y los sensores remotos pueden ayudar en la exploración de aguas subterráneas, con un enfoque especial en Colombia. Se analizan varias tecnologías que han demostrado ser eficaces para identificar zonas de recarga de acuíferos y evaluar el potencial de agua subterránea. Estas herramientas, que tienen diferentes niveles de detalle y alcance, son clave para obtener información valiosa sobre los recursos hídricos en áreas extensas de forma eficiente. Aunque en Colombia su uso ha sido limitado, han sido especialmente útiles en zonas como La Guajira, donde proporcionan datos fundamentales para gestionar el agua en regiones áridas. Sin embargo, su aplicación enfrenta obstáculos, como la nubosidad persistente en algunas zonas del país, la geología compleja de los Andes, y el elevado costo de algunas de estas tecnologías avanzadas, lo que restringe su uso en ciertos contextos. Se concluye que una combinación inteligente de estos métodos, adaptada a los recursos disponibles y a las características geográficas de cada región, puede mejorar significativamente la precisión en la exploración de acuíferos. Integrar diversas tecnologías, tanto aéreas como satelitales, es clave para obtener una visión más completa del subsuelo y apoyar una gestión sostenible del agua subterránea en Colombia.

**Palabras clave:** Exploración de aguas subterráneas, Teledetección, Gestión sostenible del agua, Potencial de acuíferos, Imágenes satelitales.

## ABSTRACT

This study explores how satellite imagery and remote sensors can aid in the exploration and management of groundwater, with a particular focus on Colombia. Various technologies that have proven effective in finding aquifer recharge zones and assessing groundwater potential are analyzed. These tools, which differ in their level of detail and coverage, are key to efficiently obtaining valuable information about water resources over large areas. Although their use in Colombia has been limited, they have been particularly useful in regions such as La Guajira, where they provide crucial data for water management in arid zones. However, their application faces challenges, including persistent cloud cover in some areas of the country, the complex geology of the Andes, and the high cost of some advanced technologies, which limits their use in specific contexts. It is concluded that a strategic combination of these methods, tailored to the available resources and the geographical characteristics of each region, can significantly improve the accuracy of aquifer exploration. Integrating various technologies, both aerial and satellite-based, is key to gaining a more comprehensive understanding of the subsurface and supporting sustainable groundwater management in Colombia.

**Key words:** Groundwater exploration, Remote sensing, Sustainable water management, Aquifer potential, Satellite images.

## 1. INTRODUCCIÓN.

El uso de métodos de teledetección (sensores remotos e imágenes satelitales) ha transformado la exploración del agua subterránea, permitiendo la recopilación de datos hidrogeológicos a gran escala ([Suganthi et al. 2013](#)). Estas tecnologías facilitan la evaluación de la calidad del agua, la identificación de zonas de recarga y descarga de los acuíferos, la medición de niveles de humedad, el potencial de agua subterránea y el monitoreo de cambios en el uso del suelo, factores cruciales en un contexto de creciente demanda de recursos hídricos debido al cambio climático y el crecimiento poblacional ([Ahmad et al., 2005](#); [Preeja et al., 2011](#); [Suganthi et al. 2013](#)).

Las técnicas de teledetección para la exploración de aguas subterráneas han sido utilizadas desde finales del siglo XX, pero su desarrollo más significativo ha ocurrido desde los años 2000 hasta la actualidad. Diferentes estudios han demostrado la efectividad de estos métodos, integrando diversas capas temáticas como geología, topografía, geomorfología y uso del suelo para identificar zonas de recarga y/o con potencial de agua subterránea ([Magesh et al., 2012](#); [Suganthi et al., 2013](#); [Shahsavari et al., 2024](#)). Adicionalmente, investigaciones sobre la gestión de recursos hídricos han resaltado las ventajas de combinar teledetección y SIG para una evaluación más precisa de los fenómenos hidrogeológicos, permitiendo optimizar la gestión del recurso hídrico ([Revueltas-Martínez et al., 2020](#)). Estos enfoques han permitido una mejor comprensión de los sistemas acuíferos, especialmente en regiones donde la disponibilidad de agua subterránea es crítica para el desarrollo sostenible ([Ishola et al., 2023](#)).

En Colombia, el uso de técnicas de teledetección para la exploración de aguas subterráneas ha sido limitado, no obstante, su aplicación ha ido en aumento en la gestión del agua, especialmente en la identificación de zonas potenciales para la recarga de acuíferos, investigaciones como la de [Revueltas-Martínez et al., \(2020\)](#) han aplicado estas metodologías para mapear áreas de recarga en la región norte del país, utilizando imágenes satelitales y análisis de factores geológicos y de uso del suelo. Por otro lado, el estudio de [Fernández et al., \(2017\)](#) realizó un análisis de la potencialidad de aguas subterráneas en la región de Alta Guajira. También, estudios como el de [Moreno, \(2019\)](#) han aplicado imágenes de satélites como LANDSAT y ALOS-PALSAR para observar los efectos de los cambios en el uso del suelo en la capacidad de recarga de los acuíferos.

A pesar de los avances en el uso de técnicas de teledetección para la exploración de aguas subterráneas, persisten limitaciones y vacíos en el conocimiento que afectan su aplicación efectiva, por ejemplo, la falta de información hidrogeológica detallada en ciertas regiones restringe la capacidad de correlacionar las interpretaciones con mapas o mediciones que representen con precisión el fenómeno físico (Salazar, 2022). Además, la dependencia en datos de calidad variable y la escasez de estudios que integren de manera adecuada los diversos factores que influyen en la recarga de acuíferos pueden llevar a interpretaciones subjetivas o erróneas (Jha et al., 2007; Salazar, 2022). Estas limitaciones resaltan la necesidad de realizar investigaciones más exhaustivas y de mejorar la calidad de los datos disponibles para optimizar el uso de la teledetección en la gestión de recursos hídricos.

El objetivo del siguiente trabajo es evaluar la efectividad de las imágenes satelitales y otros sensores remotos en la exploración de zonas de recarga de acuíferos o con potencial de aguas subterráneas, identificando los métodos más aplicados y recomendables para el contexto colombiano. A partir de un análisis detallado, se busca proporcionar recomendaciones fundamentadas que optimicen el uso de estas tecnologías en la búsqueda y gestión de recursos hídricos subterráneos en Colombia.

## 2. BASES TEÓRICAS Y PRINCIPIOS DE TELEDETECCIÓN EN LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

Los métodos de teledetección han transformado la exploración de aguas subterráneas al proporcionar herramientas esenciales para la identificación, monitoreo y gestión de estos recursos (Suganthi et al. 2013). Estas técnicas, que emplean sensores remotos instalados en satélites, aeronaves y drones, permiten recolectar datos geológicos y ambientales sin necesidad de contacto directo con el terreno (Ibrahim et al., 2024). En la exploración de aguas subterráneas, resultan fundamentales para identificar zonas con potencial de almacenamiento, evaluar la extensión de acuíferos y monitorear los cambios en los niveles de agua a lo largo del tiempo (Rodell et al., 2009; Nanteza et al., 2016). Una de sus principales ventajas es la capacidad para cubrir grandes áreas de manera eficiente y rentable, lo que las convierte en herramientas imprescindibles para la toma de decisiones informadas, especialmente en regiones de difícil acceso o con escasez de estaciones de monitoreo convencionales.

Comparada con los métodos tradicionales basados en tierra, la teledetección ofrece importantes ventajas para el monitoreo de recursos hídricos. En primer lugar, su amplia cobertura espacial permite recopilar datos sobre vastas regiones, incluidas áreas remotas que los métodos terrestres no alcanzan debido a la distribución limitada de estaciones de observación (Becker, 2005). Además, proporciona una alta frecuencia temporal, lo que facilita el monitoreo continuo de eventos como inundaciones o sequías (Ghamisi et al., 2017; Chawla et al., 2020). Este enfoque es más rentable para el monitoreo a gran escala en comparación con la instalación y mantenimiento de sensores en tierra, lo que resulta particularmente útil en regiones con limitados recursos financieros (Chawla et al., 2020). Los sensores satelitales también permiten la recopilación de datos en diferentes bandas espectrales, lo que posibilita la evaluación de diversos parámetros relacionados con la cantidad y calidad del agua (Ibrahim et al., 2024). No obstante, es necesario tener en cuenta limitaciones como las inexactitudes derivadas de las condiciones atmosféricas (Nanteza et al., 2016; Chawla et al., 2020).

Dado que este trabajo evalúa la exploración de aguas subterráneas mediante el estudio de su potencial, es crucial definir claramente este concepto. Una revisión detallada de la literatura revela que la interpretación del potencial de aguas subterráneas varía significativamente entre

los autores, para la mayoría, este tipo de exploración refleja las variaciones en el almacenamiento de agua subterránea dentro de una región (Díaz-Alcaide & Martínez-Santos, 2019). Enfoques más específicos, como el adoptado por Martín-Loeches et al., (2018), se centran en la delimitación de ubicaciones óptimas para la perforación de pozos a escala local. Otros, como Siddha & Sahu, (2018), lo ven como una herramienta para estimar la probabilidad de encontrar agua subterránea o identificar las áreas con mayor rendimiento potencial para satisfacer necesidades específicas, enfoque que se adopta como referente en este estudio.

El cálculo del potencial de agua subterránea se facilita con la integración de diversos métodos geológicos, geofísicos y de teledetección. Los estudios geológicos identifican formaciones permeables, como acuíferos, y barreras impermeables mediante mapeo geológico y análisis estructural (Rajaveni et al., 2017). Métodos geofísicos, como la resistividad eléctrica y la gravimetría, detectan variaciones en la conductividad y densidad del suelo que pueden indicar la presencia de agua subterránea (Khalil et al., 2014). Finalmente, las técnicas de teledetección ayudan a identificar zonas de recarga y acuíferos al analizar la humedad del suelo, la vegetación, la topografía, entre otras variables (Rodell et al., 2009). Estos enfoques combinados ofrecen una evaluación integral del potencial de aguas subterráneas.

### **3. PRINCIPALES MÉTODOS DE TELEDETECCIÓN UTILIZADOS**

La teledetección ha demostrado ser una herramienta esencial en la exploración de aguas subterráneas, permitiendo la identificación y monitoreo de recursos hídricos de manera eficiente y no invasiva (Adams et al., 2022). Diversos métodos, que varían en su resolución espacial y temporal, ofrecen capacidades complementarias que permiten obtener una visión integral del subsuelo (Adams et al., 2022). A continuación, se presentan los principales métodos de teledetección empleados en este campo, destacando sus aplicaciones más relevantes.

#### **3.1.MÉTODOS SATELITALES**

Los métodos satelitales han demostrado ser herramientas indispensables en la exploración de aguas subterráneas, proporcionando información detallada sobre la estructura geológica, la cobertura del suelo y la dinámica hídrica en grandes extensiones geográficas (Nanteza et al.,

2016; Ibrahim et al., 2024). Estos métodos se basan en la detección y análisis de diversos parámetros físicos a través de sensores instalados en satélites, lo que permite monitorear características relevantes del terreno sin la necesidad de contacto directo (Nanteza et al., 2016). La capacidad de los satélites para recopilar datos de forma continua y a gran escala facilita la identificación zonas de recarga de acuíferos y de áreas con potencial de aguas subterráneas, además del seguimiento de cambios en los niveles de agua subterránea, incluso en regiones remotas o de difícil acceso (Scanlon et al., 2012). Los satélites actuales ofrecen una cobertura amplia y una resolución espacial y temporal que complementa otros métodos de teledetección, proporcionando una visión integral de los recursos hídricos subterráneos (Chawla et al., 2020; Ibrahim et al., 2024). Seguidamente, se presentan los principales satélites y técnicas de observación espacial utilizados en la exploración hidrogeológica.

### **3.1.1. LANDSAT**

Los satélites LANDSAT capturan imágenes multispectrales de alta resolución que permiten monitorear y estudiar cambios en la superficie terrestre, incluida la vegetación, cuerpos de agua y estructuras geológicas (Masood et al., 2022; Ibrahim et al., 2024). Con una resolución espacial de entre 30 y 100 metros, dependiendo de la banda espectral, LANDSAT es adecuado para el análisis regional de características relacionadas con la disponibilidad de agua subterránea (Roy et al., 2014). Estas imágenes se han utilizado ampliamente para identificar áreas de recarga de acuíferos, monitorear el uso del suelo y detectar patrones de sequía y cambios en los niveles de agua superficial, proporcionando información valiosa sobre los sistemas de agua subterránea (Ozdogan et al., 2010). Adicionalmente, las imágenes de los satélites LANDSAT-8 han demostrado ser útiles para la demarcación de lineamientos estructurales entre diferentes unidades geológicas, los cuales pueden jugar un papel fundamental como sellos o puntos de recarga localizada a los acuíferos (Adiri et al., 2017). A pesar de su utilidad, la resolución temporal de LANDSAT es limitada, ya que cada satélite revisita la misma área aproximadamente cada 16 días, lo que puede restringir el monitoreo continuo de cambios rápidos en los recursos hídricos (Alpert et al., 2012). Sin embargo, los datos de LANDSAT son gratuitos y están disponibles públicamente, lo que lo convierte en una herramienta accesible y rentable para estudios a pequeña y gran escala (Wulder et al., 2012; Roy et al., 2014).

### **3.1.2. Espectroradiómetro de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés)**

El sensor MODIS captura datos en 36 bandas espectrales, que van desde el espectro visible hasta el infrarrojo, lo que permite monitorear una amplia gama de condiciones en la Tierra (Alpert et al., 2012). Ofrece una resolución espacial más baja en comparación con LANDSAT, con píxeles de entre 250 y 1000 metros dependiendo de la banda espectral, pero su alta resolución temporal lo hace excepcionalmente útil para el monitoreo frecuente de grandes áreas geográficas (Alpert et al., 2012). MODIS revisita el mismo lugar cada 1-2 días, proporcionando datos continuos que son críticos para el seguimiento de cambios dinámicos en el uso del suelo, la vegetación, la humedad del suelo y la temperatura de la superficie terrestre (Justice et al., 2002; Gao et al., 2012; Alpert et al., 2012).

Este sensor ha sido ampliamente utilizado para estudios hidrológicos a gran escala, permitiendo la identificación de áreas de recarga y monitoreo de la extensión de la vegetación que indica la presencia de humedad en el suelo, lo que puede señalar potenciales acuíferos subterráneos (Wan et al., 2004). Además, MODIS permite realizar estudios sobre la evaporación y transpiración, parámetros clave para la gestión de los recursos hídricos (Zhang et al., 2010). Aunque su resolución espacial no es adecuada para estudios locales detallados, la cobertura global y la frecuencia temporal de los datos MODIS compensan esta limitación, haciéndolo ideal para análisis regionales y globales (Justice et al., 2002). Al igual que los datos de LANDSAT, los datos de MODIS están disponibles de manera gratuita, lo que facilita su uso en investigaciones sobre la exploración de aguas subterráneas y otros recursos naturales (Zhang et al., 2010).

### **3.1.3. Satélite activo-pasivo para medición de humedad del suelo (SMAP, por sus siglas en inglés)**

El satélite SMAP es una herramienta esencial para la teledetección de la humedad del suelo, un indicador clave de potencial de aguas subterráneas (Ibrahim et al., 2024). Equipado con un radar y un radiómetro, SMAP proporciona datos globales sobre la humedad del suelo con una resolución espacial de aproximadamente 9 km para su producto pasivo y 3 km para su producto activo, aunque la misión perdió su radar activo poco después del lanzamiento, lo que limitó su resolución espacial (Entekhabi et al., 2010). A pesar de esta limitación, según Entekhabi et al., (2010) & Ibrahim et al., (2024), SMAP sigue siendo una fuente valiosa para

la monitorización de las condiciones del suelo en grandes áreas geográficas, particularmente en regiones donde los métodos tradicionales de observación son difíciles de aplicar.

Una de las principales ventajas de SMAP es su capacidad para medir la humedad del suelo en la capa superficial (hasta 5 cm de profundidad), lo que permite inferir patrones de recarga de agua subterránea y ayudar a identificar zonas de mayor infiltración, además, el satélite tiene un ciclo de revisita de dos a tres días, lo que facilita el monitoreo continuo y la detección de cambios temporales en la humedad del suelo, un aspecto crucial en la evaluación de acuíferos y la gestión de recursos hídricos (Entekhabi et al., 2010). Los datos proporcionados por SMAP son de acceso gratuito lo que los convierte en una herramienta asequible para estudios hidrológicos a escala global (Das et al., 2018).

#### **3.1.4. Satélites Sentinel**

Los satélites Sentinel-1 y Sentinel-2 juegan un papel crucial en la exploración de aguas subterráneas debido a sus capacidades avanzadas de monitoreo del terreno y evaluación de características geológicas y ambientales (Immitzer et al., 2016; Zhao et al., 2023). Sentinel-1, equipado con tecnología de Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés), es particularmente útil para detectar deformaciones del terreno mediante interferometría (InSAR), lo que permite identificar subsidencias relacionadas con la extracción excesiva de aguas subterráneas y otros procesos geológicos, además, Sentinel-1 ofrece una resolución espacial de hasta 5 metros, con imágenes disponibles en cualquier condición meteorológica y de iluminación, lo que garantiza su uso continuo y preciso en estudios hidrogeológicos (Zhao et al., 2023).

Por otro lado, Sentinel-2 proporciona imágenes ópticas multiespectrales de alta resolución (10-20 metros) en 13 bandas espectrales, lo que es útil para evaluar la vegetación, la humedad del suelo y las características superficiales que influyen en la recarga de acuíferos. Las imágenes multiespectrales de Sentinel-2 permiten identificar patrones de vegetación indicativos de la presencia de aguas subterráneas y zonas potenciales de recarga (Immitzer et al., 2016). Al combinar los datos de Sentinel-1 y Sentinel-2, los investigadores pueden obtener una visión más completa de los procesos subterráneos y de la superficie terrestre, lo que facilita la gestión y monitoreo de los recursos hídricos en amplias áreas geográficas.

Una de las principales ventajas de los datos de los satélites Sentinel es su disponibilidad gratuita, lo que permite su uso en proyectos de exploración de aguas subterráneas sin costos adicionales (ESA, 2020).

### **3.1.5. Satélite TerraSAR-X**

El satélite TerraSAR-X ofrece datos SAR con una resolución espacial muy alta, que puede llegar hasta 1 metro, lo que lo convierte en una herramienta poderosa para la exploración hidrogeológica y el monitoreo de aguas subterráneas. Tiene un ciclo de revisita de 11 días para cualquier punto de la Tierra en el ecuador (Zhang et al., 2023). TerraSAR-X es especialmente útil para detectar deformaciones del terreno mediante InSAR, lo que permite identificar subsidencias vinculadas a la extracción de aguas subterráneas y la compactación de acuíferos, capacidad crucial en áreas urbanas o agrícolas, donde el uso intensivo de los recursos hídricos puede causar hundimientos del terreno, afectando tanto la infraestructura como el entorno natural (Zhang et al., 2023).

TerraSAR-X proporciona imágenes de alta resolución en cualquier condición meteorológica y de iluminación, lo que garantiza la obtención de datos consistentes y fiables, incluso en zonas donde la cobertura nubosa o la oscuridad podrían dificultar el uso de otras tecnologías de teledetección (Zhang et al., 2023). Su precisión espacial y temporal lo hace adecuado para estudios locales detallados, permitiendo identificar con precisión áreas de deformación que podrían estar relacionadas con la recarga o la extracción de agua subterránea (Hu et al., 2021). Aunque los datos de TerraSAR-X no son de acceso gratuito, su alta resolución y precisión justifican el costo en proyectos críticos donde se requiere un análisis detallado del terreno y sus cambios (Airbus, 2019).

Dentro de los métodos satelitales es importante mencionar las dos principales técnicas por las cuales se obtienen los datos, siendo estas:

- **Tecnología de radar de apertura sintética (SAR):**

El SAR es una tecnología satelital clave para la exploración de aguas subterráneas, especialmente en la identificación de deformaciones del terreno y en la evaluación de la humedad del suelo (Nanteza et al., 2016; Ibrahim et al., 2024). Los satélites equipados con SAR proporcionan imágenes de alta resolución que permiten mapear la topografía

detalladamente, detectar cambios en el suelo y variaciones en la estructura subterránea, lo que es crucial para identificar áreas de recarga de acuíferos y zonas afectadas por la subsidencia debido a la extracción excesiva de agua subterránea (Farr et al., 2007).

El SAR utiliza señales de radar de microondas para obtener imágenes de la superficie terrestre en cualquier condición meteorológica y de iluminación, lo que lo convierte en una herramienta eficaz incluso en áreas con frecuentes nubes o en zonas remotas donde la recopilación de datos tradicionales es limitada, además, esta tecnología tiene la capacidad de medir desplazamientos milimétricos en la superficie del terreno mediante la técnica InSAR (Ferretti et al., 2001).

El radar SAR es particularmente útil en la exploración de aguas subterráneas al proporcionar datos sobre la subsidencia del terreno, que puede indicar la sobreexplotación de acuíferos, y en la detección de cambios en la humedad del suelo en amplias áreas geográficas (Farr et al., 2007). Esta tecnología es utilizada por satélites como Sentinel-1 y TerraSAR-X, incluso existen alternativas como el satélite ALOS PALSAR.

- **Tecnología de imágenes satelitales multispectrales e hiperespectrales:**

Estas imágenes permiten la observación de la superficie terrestre a través de múltiples bandas del espectro electromagnético, lo que facilita la identificación de características geológicas y ambientales relevantes para la exploración de aguas subterráneas. Las imágenes multispectrales, como las obtenidas por los satélites Landsat, cubren un rango más limitado de bandas espectrales (3 a 15), pero son útiles para monitorear la vegetación, la humedad del suelo y otros factores que pueden indicar la presencia de agua subterránea (Govender et al., 2007). En comparación, las imágenes hiperespectrales ofrecen una resolución espectral mucho más alta, capturando cientos a miles de bandas, lo que permite una diferenciación precisa de minerales, suelos y vegetación, factores cruciales para identificar zonas de recarga y áreas propensas a contener recursos hídricos subterráneos (Clark et al., 2003).

Se recomienda el uso de múltiples sensores para recopilar datos en diferentes bandas espectrales, lo que mejora la precisión y la capacidad de análisis de los recursos subterráneos (Peighambari & Zhang, 2021). Estas tecnologías son especialmente valiosas en la exploración hidrogeológica, ya que permiten detectar anomalías superficiales relacionadas

con el almacenamiento y flujo de agua subterránea, así como las propiedades del terreno que influyen en la recarga de acuíferos. Sin embargo, la cantidad masiva de datos generados por las imágenes hiperspectrales presenta desafíos en términos de procesamiento y análisis, lo que requiere sistemas avanzados de procesamiento de datos (Asner et al., 2012).

### **3.2. MÉTODOS SATELITALES BASADOS EN GRAVIMETRÍA**

Estas técnicas ofrecen métodos eficientes y rentables para la medición de aguas subterráneas, basándose en el principio de que el campo gravitacional de la Tierra se ve afectado por las masas de agua subterránea, permitiendo estimar la variabilidad en el almacenamiento de agua en los sistemas acuíferos (Nanteza et al., 2016; Ibrahim et al., 2024). El método más comúnmente empleado para esta técnica es el Experimento de Recuperación de Gravedad y Clima (GRACE, por sus siglas en inglés) (Niu et al., 2007). GRACE es la única misión satelital capaz de detectar con precisión anomalías en el campo gravitacional terrestre, causadas por variaciones en la distribución de masas de agua, hielo y otros elementos, lo que hace que sus datos sean valiosos no solo para monitorear el almacenamiento de aguas subterráneas, sino también para otras aplicaciones, como el seguimiento de la pérdida de masa de las capas de hielo y el cambio climático (Rodell et al., 2009; Scanlon et al., 2012; Ibrahim et al., 2024).

Los satélites de la misión GRACE cubren la superficie terrestre cada 30 días, con una resolución espacial aproximada de 300 x 300km (Vishwakarma et al., 2018; Tapley et al., 2019). Esto significa que los datos proporcionados son promedios en áreas de ese tamaño, lo que limita su aplicabilidad para estudios locales, pero es útil para análisis a gran escala, especialmente en combinación con datos de mayor resolución. Aunque su resolución temporal no es suficientemente detallada para ciertos estudios locales, los datos de GRACE son gratuitos y están disponibles a través de plataformas abiertas administradas por la NASA y otros centros de investigación (Tapley et al., 2019).

### **3.3. MÉTODOS DE OBTENCIÓN AÉREA**

Los métodos de obtención aérea juegan un papel crucial en la exploración de aguas subterráneas debido a su capacidad para cubrir grandes áreas de forma rápida y eficiente. Estos enfoques permiten recolectar datos precisos sobre las características del subsuelo y del

entorno geológico sin la necesidad de un contacto directo con el terreno, lo que los hace particularmente útiles en regiones de difícil acceso (Siemon et al., 2009; Viezzoli et al., 2010). Además, las tecnologías aéreas ofrecen una resolución espacial más detallada que muchas técnicas satelitales, lo que facilita la identificación de estructuras acuíferas y variaciones en la calidad del agua (Siemon et al., 2009; Viezzoli et al., 2010; Ibrahim et al., 2024). A continuación, se detallan los principales métodos de obtención aérea utilizados en la exploración de aguas subterráneas.

### **3.3.1. Método de detección y medición de distancias por luz (LiDAR, por sus siglas en inglés)**

También conocido como escaneo láser aerotransportado (ALS), este método utiliza pulsos de luz láser para medir distancias, creando modelos tridimensionales detallados del terreno y de la vegetación, por lo que es altamente efectivo para el mapeo topográfico y la identificación de características geológicas y ambientales (Baltsavias, 1999; Liu, 2008). Esta tecnología avanzada ofrece una alta precisión y resolución espacial, que típicamente oscila entre 0.5 y 2 metros, convirtiéndose en una herramienta esencial para mapear minuciosamente la topografía superficial y detectar características geológicas que influyen en la recarga y el flujo de agua subterránea (Liu et al., 2007). Aunque el LiDAR no proporciona datos continuos como los satélites, su precisión vertical, que varía entre 10 y 20 centímetros, permite identificar cambios sutiles en el terreno relacionados con el almacenamiento de agua subterránea (Liu et al., 2007; Fernandez-Diaz et al., 2014).

Es importante considerar que los datos obtenidos mediante LiDAR no son gratuitos; su costo puede variar entre \$200 y \$800 por kilómetro cuadrado, dependiendo de la resolución y la extensión del área estudiada (Fernandez-Diaz et al., 2014). A pesar de estas consideraciones económicas, el LiDAR se utiliza ampliamente en la identificación de zonas de recarga y en la evaluación de patrones de flujo, especialmente en regiones donde los métodos tradicionales no pueden ofrecer la misma precisión y detalle (Ibrahim et al., 2024).

### **3.3.2. Método electromagnético aerotransportado (AEM, por sus siglas en inglés)**

El método AEM utiliza sensores electromagnéticos montados en aeronaves para mapear la conductividad eléctrica del subsuelo, lo que lo convierte en una herramienta eficaz para la detección de acuíferos y la caracterización de estructuras geológicas asociadas con la

presencia de agua subterránea (Siemon et al., 2009). Este método tiene una resolución lateral que va desde los 10 hasta los 100 metros, y vertical de entre 20 y 30 metros, permitiendo obtener una imagen detallada de las capas subterráneas hasta profundidades de unos 500 metros (Lane, 2002; Auken et al., 2015).

Aunque los costos del AEM pueden ser elevados, con rangos de entre \$100 y \$500 por kilómetro cuadrado dependiendo de la escala y la resolución del estudio, sigue siendo una opción rentable para estudios en áreas extensas, donde sería inviable utilizar métodos terrestres (Viezzoli et al., 2008). El AEM es particularmente útil para identificar acuíferos confinados y semiconfinados, y ha demostrado ser efectivo en regiones con complejas estructuras hidrogeológicas (Siemon et al., 2009; Auken et al., 2015).

A continuación, se presenta una tabla resumen de todos los aspectos relevantes mencionados anteriormente para cada método.

**Tabla 1.** Propiedades de cada método de teledetección.

Tipo de obtención	Método	Resolución Temporal	Resolución espacial	Costo de adquisición	Referencias
<b>8Satelital</b>	LANDSAT	16 días	30 - 100m	Gratuito	Alpert et al., 2012; Wulder et al., 2012; Roy et al., 2014.
	MODIS	2 días	250 - 1000m	Gratuito	Justice et al., 2002; Zhang et al., 2010; Alpert et al., 2012.
	SMAP	2-3 días	9km Pasivo 3Km Activo	Gratuito	Entekhabi et al., 2010; Das et al., 2018.

	Sentinel 1	6 días	5m	Gratuito	Immitzer et al., 2016; ESA, 2020; Zhao et al., 2023.
	Sentinel 2	5 días	10 - 20m	Gratuito	Immitzer et al., 2016; ESA, 2020; Zhao et al., 2023.
	TerraSAR-X	11 días	1 - 40m	Costo variable 5 - 30\$ por km <sup>2</sup>	Airbus, 2019; Zhang et al., 2023.
<b>Gravimetría satelital</b>	GRACE	30 días	300km	Gratuito	Vishwakarma et al., 2018; Tapley et al., 2019.
<b>Aéreo</b>	LiDAR	Por solicitud	0.5 - 2m	Costo variable 200 - 800\$ por km <sup>2</sup>	Liu et al., 2007; Fernandez-Díaz et al., 2014.
	AEM	Por solicitud	Lateral 10 - 100m Vertical 20 - 30m	Costo variable 100 - 500\$ por km <sup>2</sup>	Lane, 2002; Viezzoli et al., 2008; Auken et al., 2015.

#### 4. PARÁMETROS CLAVE EN LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS MEDIANTE TELEDETECCIÓN

La exploración de aguas subterráneas mediante teledetección depende de una serie de parámetros clave que afectan la precisión y efectividad de los resultados obtenidos. Estos factores permiten adaptar las técnicas de teledetección a las características específicas de cada área de estudio, optimizando así la identificación de recursos hídricos subterráneos y facilitando su gestión sostenible (Nanteza et al., 2016; Ibrahim et al., 2024).

#### 4.1. CONDICIONES GEOLÓGICAS

Las características geológicas de una región juegan un papel fundamental en la aplicación de la teledetección para la exploración de aguas subterráneas. Factores como la composición del subsuelo, la estructura geológica, y la presencia de fallas o fracturas influyen en la capacidad de los métodos de teledetección para detectar acuíferos y zonas de recarga (Becker, 2005). Por ejemplo, formaciones geológicas permeables, facilitan la infiltración y almacenamiento de agua subterránea, mientras que estructuras impermeables actúan como barreras (Nanteza et al., 2016). Además, la variabilidad en la litología y la presencia de minerales específicos pueden afectar la reflectancia y respuesta de los sensores, lo que impacta la precisión de los modelos de distribución del agua subterránea (Becker, 2005; Ibrahim et al., 2024).

Las rocas sedimentarias suelen mostrar alta reflectancia en bandas visibles y cercanas al infrarrojo en las imágenes satelitales, pueden revelar patrones homogéneos en áreas extensas, principalmente debido a su horizontalidad (Clark et al., 2003; Govender et al., 2007). Mediante teledetección, estas rocas se diferencian por su textura homogénea y su alta reflectancia en bandas infrarrojas, especialmente en rocas ricas en carbonato y areniscas, también es posible identificar patrones de erosión en imágenes multiespectrales (Clark et al., 2003; Govender et al., 2007).

Por otro lado, las rocas metamórficas presentan menor reflectancia que las sedimentarias, aunque esta varía según el grado de metamorfismo y los minerales presentes (Chawla et al., 2020). Las rocas metamórficas cristalinas, por ejemplo, pueden reflejar en altas longitudes de onda del infrarrojo; Su identificación en teledetección se basa en los patrones irregulares que muestran en las imágenes multiespectrales, provocados por la recristalización y la foliación de estas rocas, adicionalmente, la textura rugosa característica de este tipo de rocas también puede captarse con imágenes de mayor resolución espacial (Liu et al., 2007; Chawla et al., 2020).

Finalmente, las rocas ígneas, como las volcánicas, tienen una baja reflectancia en bandas visibles y cercanas al infrarrojo, aunque pueden mostrar mayor reflectancia debido a la composición de minerales específicos (Nanteza et al., 2016). En las imágenes satelitales, las rocas ígneas se diferencian por su textura masiva y por la variabilidad en la reflectancia según el contenido mineral, las rocas volcánicas frescas presentan una alta reflectancia, mientras

que las ígneas intrusivas exhiben patrones más uniformes (Rodell et al., 2009; Nanteza et al., 2016).

#### **4.2. FACTORES CLIMÁTICOS.**

Los factores climáticos son determinantes en la efectividad de la teledetección para la exploración de aguas subterráneas, ya que influyen tanto en la disponibilidad de agua como en las condiciones de observación. Variables como la precipitación, la evaporación, y la temperatura afectan los procesos de recarga y el movimiento del agua dentro de los acuíferos (Scanlon et al., 2012). En regiones áridas o semiáridas, los métodos de teledetección pueden ser especialmente útiles para identificar zonas de recarga limitadas, mientras que, en áreas con alta cobertura vegetal o nubosidad frecuente, la precisión de los sensores ópticos puede verse reducida (Chawla et al., 2020). Además, las condiciones atmosféricas, como la nubosidad y la humedad, pueden afectar la adquisición de datos, particularmente en métodos basados en imágenes ópticas (Ibrahim et al., 2024).

#### **4.3. RESOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL**

La resolución temporal y espacial son parámetros clave que determinan la precisión y utilidad de los métodos de teledetección en la exploración de aguas subterráneas. La resolución espacial define el nivel de detalle con el que se pueden observar las características del terreno, siendo crucial para identificar estructuras geológicas, zonas de recarga y variaciones locales en el terreno, como la vegetación (Nanteza et al., 2016; Ibrahim et al., 2024). Una mayor resolución espacial permite un análisis más detallado, pero puede estar limitada por la extensión del área a cubrir o el coste de los datos, como ocurre con tecnologías como LiDAR o AEM (Liu et al., 2007). Por otro lado, la resolución temporal se refiere a la frecuencia con la que se capturan los datos, lo cual es esencial para monitorear cambios dinámicos en los niveles de agua o procesos estacionales, por ejemplo, sistemas satelitales como GRACE y SMAP, aunque tienen resoluciones espaciales bajas, son efectivos para observar patrones a gran escala y cambios a lo largo del tiempo (Tapley et al., 2019).

#### **4.4. INSTRUMENTOS Y SENSORES**

Los instrumentos y sensores utilizados en teledetección juegan un papel fundamental en la efectividad de la exploración de aguas subterráneas, ya que determinan el tipo de datos que

se pueden obtener y su precisión. Cada sensor está diseñado para capturar información específica, como el SAR que mide la superficie terrestre a través de microondas, o los sensores hiperespectrales que detectan una amplia gama de bandas espectrales, lo que permite identificar diferentes materiales geológicos (Govender et al., 2007). La elección del instrumento depende de las características del terreno y de los objetivos del estudio: algunos sensores proporcionan una resolución espacial alta y detalles finos, mientras que otros priorizan la cobertura de grandes áreas o la detección de cambios temporales (Tapley et al., 2019). La selección adecuada del sensor es crucial para maximizar la eficiencia y precisión en la identificación de zonas de recarga y recursos hídricos subterráneos.

## **5. EFECTIVIDAD DE LOS MÉTODOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

La teledetección ha demostrado ser altamente efectiva en la exploración de aguas subterráneas, especialmente para identificar el potencial hídrico subterráneo y detectar zonas de recarga. Esta tecnología permite observar características geológicas y ambientales de manera no invasiva, lo que la convierte en una herramienta clave para estudios hidrogeológicos en áreas extensas y de difícil acceso (Ibrahim et al., 2024).

Uno de los métodos más utilizados es el análisis de imágenes satelitales multiespectrales e hiperespectrales, que permiten identificar patrones en la vegetación y el suelo relacionados con la recarga de acuíferos (Govender et al., 2007; Ibrahim et al., 2024). Las imágenes hiperespectrales, en particular, ofrecen una mayor capacidad para diferenciar materiales en el suelo y detectar características geológicas clave para evaluar el potencial hídrico (Clark et al., 2003). Las imágenes multiespectrales, por su parte, han sido efectivas en la identificación de zonas de vegetación que indican humedad, lo que puede señalar la presencia de agua subterránea o zonas de recarga activa (Peighambari & Zhang, 2021).

Las misiones satelitales como GRACE han sido esenciales para monitorear cambios en el almacenamiento de agua subterránea a gran escala. Aunque su resolución espacial es limitada, GRACE es efectivo para evaluar tendencias a largo plazo en grandes acuíferos y en áreas con escasez de estaciones de monitoreo (Rodell et al., 2009; Scanlon et al., 2012).

El uso de LiDAR ha sido igualmente valioso para mapear la topografía de la superficie y detectar zonas de recarga. Las variaciones sutiles en el terreno, asociadas con procesos

hidrológicos como la infiltración, proporcionan información crucial para la gestión de recursos hídricos (Liu et al., 2007; Fernandez-Diaz et al., 2014). Adicionalmente, LiDAR ofrece una resolución espacial precisa que otros métodos no logran (Baltsavias, 1999).

Finalmente, la tecnología AEM ha mostrado ser efectiva en el mapeo de la resistividad del subsuelo, permitiendo inferir la presencia de acuíferos y características geológicas que afectan el flujo de agua subterránea, siendo útil para mapear zonas de recarga y el espesor de acuíferos en diferentes formaciones geológicas (Siemon et al., 2009).

En Colombia, el estudio de Jáuregui, (2019) evaluó la efectividad de los métodos de teledetección para la exploración de aguas subterráneas, con un enfoque particular en la región árida de La Guajira, que enfrenta severas condiciones de sequía. Utilizando los satélites LANDSAT y GRACE, el estudio proporcionó información clave para identificar el potencial hídrico subterráneo de la zona, destacando el valor de estas tecnologías para comprender la dinámica de los acuíferos en contextos climáticos complejos.

Si bien la teledetección ofrece beneficios significativos para la exploración de aguas subterráneas, cada método tiene sus fortalezas y limitaciones que influyen en su desempeño en distintos escenarios. Algunos enfoques, como la gravimetría o los datos satelitales, destacan por su amplia cobertura y capacidad de penetrar en zonas remotas (Becker, 2005; Ghamisi et al., 2017), mientras que los métodos aéreos ofrecen una mayor precisión en áreas específicas (Chawla et al., 2020). Sin embargo, estos métodos también enfrentan desafíos, tales como la dependencia de condiciones ambientales favorables, los altos costos de equipamiento y la complejidad en la interpretación de los datos en terrenos difíciles (Preeja et al., 2011; Nanteza et al., 2016; Ibrahim et al., 2024). A continuación, se presenta una tabla que resume las principales fortalezas y limitaciones de los métodos más utilizados en la teledetección de aguas subterráneas, proporcionando una visión comparativa de su aplicabilidad en distintos escenarios hidrogeológicos.

**Tabla 2.** Fortalezas y limitaciones de los métodos de teledetección.

<b>Tecnología de teledetección</b>	<b>Fortalezas</b>	<b>Limitaciones</b>	<b>Referencia</b>
<i>Imágenes satelitales:</i>			
<b>LANDSAT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cobertura global.</li> <li>- Datos gratuitos y abiertos.</li> <li>- Útil para la identificación de zonas de recarga y análisis de vegetación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resolución espacial moderada (30 metros).</li> <li>- Menor precisión en comparación con técnicas de mayor resolución.</li> <li>- No detecta directamente aguas subterráneas, solo indicios en la superficie y la neblina.</li> </ul>	<a href="#">Roy et al., 2014;</a> <a href="#">Masood et al., 2022</a>
<b>MODIS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta frecuencia temporal.</li> <li>- Amplia cobertura global.</li> <li>- Útil para monitorear grandes áreas de humedad del suelo y cambios en la vegetación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja resolución espacial (250-1000 metros).</li> <li>- No adecuado para estudios locales o detallados.</li> <li>- Datos superficiales, no específicos de aguas subterráneas.</li> </ul>	<a href="#">Justice et al., 2002;</a> <a href="#">Gao et al., 2012;</a> <a href="#">Alpert et al., 2012.</a>
<b>SMAP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta precisión en la medición de la humedad del suelo.</li> <li>- Cobertura global y datos abiertos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resolución espacial limitada (9-36 km).</li> <li>- No proporciona información directa sobre el agua subterránea, solo indirectamente a través de la humedad superficial.</li> </ul>	<a href="#">Entekhabi et al., 2010.</a>
<b>Sentinel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Datos gratuitos y abiertos.</li> <li>- Sentinel-1: útil para monitorear la deformación del terreno y la extracción de agua subterránea.</li> <li>- Sentinel-2: alta resolución óptica para estudios de vegetación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sentinel-1: resolución espacial media (~20 metros).</li> <li>- Sentinel-2: menor capacidad para observar el subsuelo directamente.</li> <li>- Limitado para estudios locales detallados.</li> </ul>	<a href="#">Immitzer et al., 2016;</a> <a href="#">Zhao et al., 2023.</a>
<b>TerraSAR-X</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta resolución espacial (~1 metro).</li> <li>- Útil para monitorear</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto costo de adquisición de datos.</li> <li>- Requiere</li> </ul>	<a href="#">Zhang et al., 2023.</a>

	deformaciones del terreno y la extracción de agua subterránea.	procesamiento especializado. - No adecuado para estudios a gran escala debido a su limitado alcance espacial.	
<b>Métodos de obtención aérea:</b>			
<b>LiDAR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta resolución espacial (0.5 a 2 metros).</li> <li>- Mapea con precisión la topografía superficial y detecta características geológicas.</li> <li>- Detecta cambios en el terreno relacionados con la recarga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto costo de adquisición y procesamiento de datos.</li> <li>- No proporciona datos continuos como los satélites.</li> <li>- Limitada a áreas con vegetación baja o sin vegetación densa que pueda bloquear las señales.</li> </ul>	<a href="#">Liu et al., 2007;</a> <a href="#">Fernandez-Diaz et al., 2014.</a>
<b>AEM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mapea detalladamente la resistividad del subsuelo.</li> <li>- Útil para identificar acuíferos y zonas de recarga.</li> <li>- Proporciona datos de alta resolución a nivel local.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto costo operativo.</li> <li>- Requiere infraestructura aérea especializada.</li> <li>- Menor cobertura espacial en comparación con métodos satelitales.</li> </ul>	<a href="#">Lane, 2002;</a> <a href="#">Auken et al., 2015.</a>
<b>Métodos satelitales basados en gravimetría</b>			
<b>GRACE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monitorea cambios en el almacenamiento de aguas subterráneas a gran escala.</li> <li>- Detecta variaciones temporales en acuíferos.</li> <li>- Útil para análisis de grandes regiones y tendencias a largo plazo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja resolución espacial (300 km).</li> <li>- No es adecuado para estudios locales.</li> <li>- No proporciona información detallada sobre la distribución exacta del agua subterránea.</li> </ul>	<a href="#">Vishwakarma et al., 2018;</a> <a href="#">Tapley et al., 2019.</a>

## 6. ADAPTACIÓN DE MÉTODOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN COLOMBIA.

En Colombia, la complejidad geológica y la presencia de fenómenos climáticos como el Niño Southern-Oscillation (ENSO) y la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), crean desafíos únicos para la exploración de aguas subterráneas. La nubosidad persistente y el terreno accidentado de los Andes dificultan la aplicación de muchos métodos de teledetección convencionales. Sin embargo, existen diversas tecnologías que, con las adaptaciones adecuadas, son altamente recomendables para enfrentar estas dificultades.

LiDAR es una herramienta clave para mapear la topografía y la vegetación con alta precisión, ya que con su alta resolución es especialmente útil en la identificación de características geológicas que influyen en la recarga y el flujo de agua subterránea (Liu et al., 2007; Fernandez-Diaz et al., 2014). Sin embargo, su mayor limitación es el costo, que puede variar entre \$200 y \$800 por kilómetro cuadrado. A pesar de ello, en áreas montañosas como los Andes colombianos, donde los métodos ópticos enfrentan dificultades, el LiDAR destaca como una opción viable para obtener datos precisos del terreno.

Por otro lado, el AEM se recomienda especialmente para estudios hidrogeológicos en áreas con alta variabilidad geológica, como las presentes en los Andes colombianos. Este método permite mapear las propiedades eléctricas del subsuelo y tiene una profundidad de penetración que puede alcanzar hasta los 500 metros, lo que lo convierte en una excelente opción para identificar acuíferos profundos (Viezzoli et al., 2010). Sin embargo, su aplicación está limitada por factores como el costo elevado y la dificultad logística, especialmente en regiones de difícil acceso. No obstante, en áreas críticas donde otros métodos no pueden proporcionar datos sobre el subsuelo, el AEM ofrece un enfoque complementario efectivo.

En cuanto a las imágenes espectrales (tanto multiespectrales como hiperespectrales) presentes en satélites como LANDSAT y Sentinel-2, ofrecen una capacidad única para identificar diversos materiales en el suelo, incluyendo minerales y vegetación. En particular, las imágenes hiperespectrales permiten capturar cientos de bandas espectrales, lo que ofrece una precisión superior en la detección de zonas de recarga y propiedades geológicas (Clark et al., 2003). A pesar de sus grandes ventajas, estas técnicas requieren una infraestructura computacional avanzada para procesar el volumen masivo de datos generado, lo que puede ser un desafío en regiones con menos recursos.

Para superar las limitaciones climáticas y obtener una visión más integral, el uso de satélites como TerraSAR-X y Sentinel-1, que emplean tecnología SAR, es altamente recomendable. Estos satélites pueden penetrar la nubosidad y proporcionar datos tanto de día como de noche, con una resolución espacial de hasta 1 metro, ideal para detectar deformaciones del terreno relacionadas con el almacenamiento de agua subterránea. Mientras tanto, Landsat y Sentinel-2, con una resolución espacial de entre 10 y 30 metros, pueden ser útiles en zonas despejadas como los llanos orientales, pero su eficacia disminuye en áreas con nubosidad persistente, como las zonas montañosas y selváticas (Adiri et al., 2017). Por ello, la combinación de diferentes sensores es esencial para lograr una cobertura precisa y completa en todo el territorio colombiano.

Por último, satélites como GRACE y SMAP no son los más adecuados para la exploración de aguas subterráneas en Colombia debido a la baja resolución espacial de sus datos, que resulta en píxeles de gran tamaño, los cuales pueden generar sesgos e imprecisiones al capturar datos en un país con gran variabilidad geológica y tectónica. Sin embargo, estos satélites podrían ser útiles en regiones de geología más homogénea y menos accidentada, como los Llanos Orientales, la Amazonía o la región Caribe, donde las variaciones locales no son tan pronunciadas. De manera similar, el satélite MODIS, con una resolución espacial entre 250 metros y 1 km, podría no ser la opción más adecuada en algunos contextos. Aun así, su alta resolución temporal lo hace valioso para análisis frecuentes y detallados en el tiempo, lo que lo convierte en una opción recomendable en zonas como las mencionadas anteriormente.

## **7. SELECCIÓN ESTRATÉGICA DE MÉTODOS DE TELEDETECCIÓN EN COLOMBIA.**

Como análisis final, propondré una metodología que recomiende los métodos de teledetección más adecuados para distintos escenarios. En el ámbito comercial e industrial, los proyectos suelen enfrentar variaciones significativas en términos de presupuesto y tiempo disponible, por ello, en esta propuesta trataré el tiempo y los recursos económicos como variables clave para definir la estrategia más eficiente en cada caso.

### **7.1. PRIMER ESCENARIO: POCA DISPONIBILIDAD DE TIEMPO Y RECURSOS ECONÓMICOS MUY LIMITADOS.**

En este caso, el método más adecuado sería Sentinel-2, ya que sus datos son gratuitos, ofrece una resolución de hasta 10 metros y repite la toma de información cada 5 días. LANDSAT a pesar de también ser gratuito y contar con una resolución llamativa (30 metros), proporciona imágenes cada 16 días, lo que podría no ser adecuado dependiendo del tiempo pactado para la realización de un proyecto.

Dado el tiempo limitado, los métodos que proporcionan datos rápidamente y a bajo costo son los más indicados. Aunque la resolución no es extremadamente alta, son suficientes para obtener una visión preliminar de la zona de estudio.

### **7.2. SEGUNDO ESCENARIO: POCA DISPONIBILIDAD DE TIEMPO Y RECURSOS ECONÓMICOS ILIMITADOS.**

En este escenario, se recomendaría el uso de LiDAR y AEM. El LiDAR aéreo es ideal para obtener un mapeo rápido y detallado de la superficie, permitiendo identificar zonas de recarga y características topográficas con alta precisión en poco tiempo. Al mismo tiempo, el AEM permite la identificación rápida de acuíferos subterráneos, especialmente si se requieren profundidades mayores. Ambos métodos son efectivos para obtener resultados precisos y detallados en un corto plazo. Sentinel-2 también podría llegar a ser útil en esta ocasión debido a su rapidez en la toma de datos, brindando información de apoyo a los métodos aéreos.

### **7.3. TERCER ESCENARIO: RECURSOS ECONÓMICOS MUY LIMITADOS Y GRAN DISPONIBILIDAD DE TIEMPO.**

En este escenario, los satélites como Sentinel-1, Sentinel-2 y Landsat son los más adecuados. Sentinel-1, utilizando radar, es ideal para obtener datos a pesar de la nubosidad, y su acceso gratuito lo hace accesible en proyectos de bajo presupuesto. Aunque la resolución no es la más alta comparada con métodos como LiDAR, su tiempo de repetición y costo lo hacen viable en este contexto, al igual que Sentinel-2. Landsat, por su bajo costo y accesibilidad, sigue siendo una opción válida para análisis prolongados. Si hay mucho tiempo disponible, estos satélites pueden ser utilizados para obtener y analizar datos de manera constante. Adicionalmente, dependiendo de la zona de estudio, MODIS podría llegar a representar otra fuente valiosa de información.

#### 7.4. CUARTO ESCENARIO: GRAN DISPONIBILIDAD DE TIEMPO Y RECURSOS ECONÓMICOS ILIMITADOS.

Con tiempo y recursos abundantes, la mejor opción sería emplear una combinación multimodal de métodos. El uso de LiDAR aéreo proporcionaría un mapeo extremadamente detallado de la topografía, mientras que el AEM permitiría obtener un perfil preciso del subsuelo. Además, satélites como TerraSAR-X y Sentinel-1 serían clave por su capacidad para penetrar la nubosidad, y al combinarlos con imágenes multiespectrales o hiperespectrales, tanto aéreas como satelitales (LANDSAT, MODIS y Sentinel-2), se podrían obtener valiosos detalles sobre la composición del suelo y la vegetación. Esta integración tecnológica maximizaría la precisión tanto en la superficie como en el subsuelo, permitiendo un análisis exhaustivo de los acuíferos y las características geológicas de la región. A esta estrategia se le añadiría el uso de métodos geofísicos convencionales, completando así un diagnóstico integral del área de estudio.

Para finalizar se presenta una tabla resumen con los métodos más adecuados para cada escenario.

**Tabla 3.** Métodos más adecuados para distintos escenarios en el contexto colombiano.

	Variable		Método								
	Dinero	Tiempo	Sentinel 1	Sentinel 2	LANDSAT	MODIS	TerraSAR-X	LiDAR	AEM	GRACE	SMAP
Esc. 1	No disponible	No disponible	✗	✓	—	—	✗	✗	✗	✗	✗
Esc. 2	Disponible	No disponible	✗	—	✗	—	✗	✓	✓	✗	✗
Esc. 3	No disponible	Disponible	✓	✓	✓	—	✗	✗	✗	✗	✗
Esc. 4	Disponible	Disponible	✓	✓	✓	—	✓	✓	✓	✗	✗

✗ No recomendable.     
 — Puede usarse, pero no es ideal.     
 ✓ Recomendable.

Es importante destacar que, debido a la variabilidad de condiciones entre los diferentes escenarios, el alcance máximo esperado en cada caso varía considerablemente. Esto implica que cada situación tendrá diferentes limitaciones y oportunidades, ajustándose a las restricciones de tiempo y recursos disponibles (**Figura 1.**).

**Figura 1.** Alcance máximo en cada uno de los escenarios planteados.

	Tiempo limitado	Tiempo ilimitado
Dinero limitado	<p><b>Esc. 1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Estudios preliminares usando datos satélites gratuitos.</li> <li>Se podrían mapear zonas potenciales de recarga superficial, pero con limitaciones en precisión y sin validación exhaustiva en campo.</li> </ul>	<p><b>Esc. 3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Estudios detallados con tecnologías económicas, con mayor profundidad en el análisis de datos y tiempo para validar variaciones físicas del terreno, aunque con menos precisión que métodos avanzados.</li> <li>Apoyándose en visitas a campo para validación de información (de poder ser realizado).</li> </ul>
Dinero ilimitado	<p><b>Esc. 2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Investigación de alta precisión con métodos avanzados.</li> <li>Resultados detallados, modelos tridimensionales del terreno y subsuelo, con validación en campo y cobertura completa.</li> <li>No habría evaluación temporal de las variables en la zona.</li> </ul>	<p><b>Esc. 4</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Investigación completa usando todas las tecnologías disponibles.</li> <li>Modelos detallados del terreno y del subsuelo.</li> <li>Predicción a futuro de los recursos hídricos, con validación intensiva en campo a partir de métodos geofísicos y análisis exhaustivo.</li> </ul>

## 8. CONCLUSIONES

El uso de teledetección, a través de imágenes satelitales y sensores remotos, se ha consolidado como una herramienta eficaz y eficiente en la exploración de aguas subterráneas, especialmente en regiones donde los métodos convencionales son costosos o ineficaces. En Colombia, aunque su aplicación ha sido limitada, los avances en la identificación de zonas de recarga y la evaluación del potencial hídrico han demostrado ser prometedores, particularmente en zonas áridas como La Guajira.

Sin embargo, la implementación de estas tecnologías enfrenta desafíos significativos. La complejidad geológica de las zonas andinas, junto con la persistente nubosidad en varias regiones del país, limita la precisión de algunos métodos. Además, el alto costo de tecnologías avanzadas como LiDAR y AEM restringe su uso a proyectos con mayores recursos económicos.

A pesar de estas limitaciones, se concluye que la combinación estratégica de diferentes métodos de teledetección, adaptada a las características geográficas y los recursos

disponibles, puede maximizar la efectividad de la exploración de acuíferos en Colombia. La integración de tecnologías satelitales y aéreas puede proporcionar una visión más completa del subsuelo y mejorar la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

Finalmente, se recomienda seguir investigando y aplicando estas tecnologías en un marco de colaboración entre entidades académicas, gubernamentales y privadas, con el fin de optimizar su uso y hacer frente a los retos derivados del cambio climático y la creciente demanda de agua en el país, esto permitirá mejorar la planificación y gestión de los recursos hídricos en Colombia.

## 9. REFERENCIAS

- Adams, K. H., Reager, J. T., Rosen, P., Wiese, D. N., Farr, T. G., Rao, S., & Rodell, M. (2022). Remote sensing of groundwater: current capabilities and future directions. *Water Resources Research*, 58(10), e2022WR032219.
- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Lhissou, R., Maacha, L., Azmi, M., & Bachaoui, E. M. (2017). Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. *Advances in Space Research*, 60(11), 2355-2367.
- Ahmad, M. U. D., Bastiaanssen, W. G., & Feddes, R. A. (2005). A new technique to estimate net groundwater use across large irrigated areas by combining remote sensing and water balance approaches, Rechna Doab, Pakistan. *Hydrogeology Journal*, 13, 653-664.
- Airbus. (2019). TerraSAR-X Mission - High-Resolution Radar Imaging. Available at: <https://www.intelligence-airbusds.com/en/8688-terrasar-x>
- Alpert, P., Shvainshtein, O., & Kishcha, P. (2012). AOD trends over megacities based on space monitoring using MODIS and MISR.
- Asner, G. P., Knapp, D. E., Boardman, J., Green, R. O., Kennedy-Bowdoin, T., Eastwood, M., & Field, C. B. (2012). Carnegie Airborne Observatory-2: Increasing science data dimensionality via high-fidelity multi-sensor fusion. *Remote Sensing of Environment*, 124, 454-465.
- Auken, E., Christiansen, A. V., Kirkegaard, C., Fiandaca, G., Schamper, C., Behroozmand, A. A., & Vignoli, G. (2015). An overview of a highly versatile forward and stable inverse algorithm for airborne, ground-based and borehole electromagnetic and electric data. *Exploration Geophysics*, 46(3), 223-235.
- Baltsavias, E. P. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3), 199-214.
- Becker, M. W. (2005). Potential for satellite remote sensing of ground water. *Groundwater*, 44(2), 306-318.

- Chawla, I., Karthikeyan, L., & Mishra, A. K. (2020). A review of remote sensing applications for water security: Quantity, quality, and extremes. *Journal of Hydrology*, 585, 124826.
- Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Kokaly, R. F., Sutley, S. J., Dalton, J. B., & Gent, C. A. (2003). Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E12).
- Das, N. N., Entekhabi, D., Dunbar, R. S., Colliander, A., Chen, F., Crow, W., & Njoku, E. G. (2018). The SMAP mission combined active-passive soil moisture product at 9 km and 3 km spatial resolutions. *Remote sensing of environment*, 211, 204-217.
- Díaz-Alcaide, S., & Martínez-Santos, P. (2019). Advances in groundwater potential mapping. *Hydrogeology Journal*, 27(7), 2307-2324.
- Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., & Van Zyl, J. (2010). The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704-716.
- ESA. (2020). Sentinel Online - Copernicus Open Access Hub. Available at: <https://sentinel.esa.int>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., & Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, 45(2).
- Fernández, A., Iwashita, F., Montes, C. (2017). Mapping groundwater potential in a section of Cocinetas Basin, Alta Guajira, Colombia.
- Fernandez-Diaz, J. C., Carter, W. E., Shrestha, R. L., & Glennie, C. L. (2014). Now you see it... now you don't: Understanding airborne mapping LiDAR collection and data product generation for archaeological research in Mesoamerica. *Remote Sensing*, 6(10), 9951-10001.
- Gao, H., Birkett, C., & Lettenmaier, D. P. (2012). Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resources Research*, 48(9).

- Ghamisi, P., Yokoya, N., Li, J., Liao, W., Liu, S., Plaza, J., & Plaza, A. (2017). Advances in hyperspectral image and signal processing: A comprehensive overview of the state of the art. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5(4), 37-78.
- Govender, M., Chetty, K., & Bulcock, H. (2007). A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. *Water Sa*, 33(2), 145-151.
- Hu, B., Chen, L., Zou, Y., Wu, X., & Washaya, P. (2021). Methods for monitoring fast and large gradient subsidence in coal mining areas using SAR images: A review. *Ieee Access*, 9, 159018-159035.
- Ibrahim, A., Wayayok, A., Shafri, H. Z. M., & Toridi, N. M. (2024). Remote Sensing Technologies for Unlocking New Groundwater Insights: A Comprehensive Review. *Journal of Hydrology: X*, 23, 100175.
- Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016). First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central Europe. *Remote sensing*, 8(3), 166.
- Ishola, K. S., Fatoyinbo, A. A., Hamid-Mosaku, A. I., Okolie, C. J., Daramola, O. E., & Lawal, T. O. (2023). Groundwater potential mapping in hard rock terrain using remote sensing, geospatial and aeromagnetic data. *Geosystems and Geoenvironment*, 2(1), 100107.
- Jáuregui, L. A. (2019). Potencial de agua subterránea en el municipio de Manaure y la parte baja del municipio de Uribe en la Guajira, Colombia usando imágenes satelitales.
- Jha, M. K., Chowdhury, A., Chowdary, V. M., & Peiffer, S. (2007). Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints. *Water resources management*, 21, 427-467.
- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R. E., Saleous, N., & Morisette, J. T. (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote sensing of Environment*, 83(1-2), 3-15.

- Khalil, M. H., Ahmed, K. S., Elnahry, A. E. H., & Hasan, A. N. (2014). Integrated geophysical, remote sensing and GIS studies for groundwater assessment, Abu Zenima Area, West Sinai, Egypt. *International Journal of Geosciences*, 5(9), 882.
- Lane, R. (2002). Ground and airborne electromagnetic methods. *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration, CRCLEME Open File Report, 144*, 53-79.
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J., & Chandra, S. (2007). LiDAR-derived high quality ground control information and DEM for image orthorectification. *GeoInformatica*, 11, 37-53.
- Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in physical geography*, 32(1), 31-49.
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience frontiers*, 3(2), 189-196.
- Martín-Loeches, M., Reyes-López, J., Ramírez-Hernández, J., Temiño-Vela, J., & Martínez-Santos, P. (2018). Comparison of RS/GIS analysis with classic mapping approaches for siting low-yield boreholes for hand pumps in crystalline terrains. An application to rural communities of the Caimbambo province, Angola. *Journal of African Earth Sciences*, 138, 22-31.
- Masood, A., Tariq, M. A. U. R., Hashmi, M. Z. U. R., Waseem, M., Sarwar, M. K., Ali, W., & Ng, A. W. (2022). An overview of groundwater monitoring through point-to-satellite-based techniques. *Water*, 14(4), 565.
- Moreno, A. M. (2019). Efectos del cambio de uso de suelo en la capacidad de recarga de agua subterránea en la cuenca del Río Teusacá, subcuenca hidrográfica del Río Bogotá.
- Nanteza, J., de Linage, C. R., Thomas, B. F., & Famiglietti, J. S. (2016). Monitoring groundwater storage changes in complex basement aquifers: An evaluation of the GRACE satellites over East Africa. *Water Resources Research*, 52(12), 9542-9564.
- Niu, G. Y., Yang, Z. L., Dickinson, R. E., Gulden, L. E., & Su, H. (2007). Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity

- Recovery and Climate Experiment data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D7).
- Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G., & Cervantes, C. (2010). Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and challenges. *Remote sensing*, 2(9), 2274-2304.
- Peyghambari, S., & Zhang, Y. (2021). Hyperspectral remote sensing in lithological mapping, mineral exploration, and environmental geology: an updated review. *Journal of Applied Remote Sensing*, 15(3), 031501-031501.
- Preeja, K. R., Joseph, S., Thomas, J., & Vijith, H. (2011). Identification of groundwater potential zones of a tropical river basin (Kerala, India) using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 39, 83-94.
- Rajaveni, S. P., Brindha, K., & Elango, L. (2017). Geological and geomorphological controls on groundwater occurrence in a hard rock region. *Applied water science*, 7, 1377-1389.
- Revueltas-Martínez, J. E., Mercado-Fernández Ph D, T., & Aguirre-Forero Ph D, S. (2020). Potential Infiltration Determination in Areas of Influence of the Zona Bananera Aquifer in Northern Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería*, 29(54).
- Rodell, M., Velicogna, I., & Famiglietti, J. S. (2009). Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 460(7258), 999-1002.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., & Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote sensing of Environment*, 145, 154-172.
- Salazar Holguín, D. (2022). *Estimation of groundwater recharge potential using MIF techniques in the Tatacoa desert, Huila, Colombia* (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).
- Scanlon, B. R., Longuevergne, L., & Long, D. (2012). Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. *Water Resources Research*, 48(4).

- Shahsavari, H., Arefi, H., Farahani, M. D., alizadeh Pirbasti, M., & Shobairi, S. O. R. (2024). Mapping Groundwater Resource using Multispectral Sentinel 2 and Fuzzy Logic method, Case Study: Salafchegan, Qom, Iran. *Ecological Questions*, 35(2), 1-26.
- Siddha, S., & Sahu, P. (2018). Assessment of groundwater potential of Gandhinagar region, Gujarat. *Journal of the Geological Society of India*, 91, 91-98.
- Siemon, B., Christiansen, A. V., & Auken, E. (2009). A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration. *Near Surface Geophysics*, 7(5-6), 629-646.
- Suganthi, S., Elango, L., & Subramanian, S. K. (2013). Groundwater potential zonation by Remote Sensing and GIS techniques and its relation to the Groundwater level in the Coastal part of the Arani and Koratalai River Basin, Southern India. *Earth Sciences Research Journal*, 17(2), 87-95.
- Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., & Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature climate change*, 9(5), 358-369.
- Viezzoli, A., Tosi, L., Teatini, P., & Silvestri, S. (2010). Surface water–groundwater exchange in transitional coastal environments by airborne electromagnetics: the Venice Lagoon example. *Geophysical Research Letters*, 37(1).
- Vishwakarma, B. D., Devaraju, B., & Sneeuw, N. (2018). What is the spatial resolution of GRACE satellite products for hydrology?. *Remote Sensing*, 10(6), 852.
- Wan, Z., Wang, P., & Li, X. (2004). Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International journal of remote sensing*, 25(1), 61-72.
- Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., & Cook, B. D. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113195.

- Zhang, K., Kimball, J. S., Nemani, R. R., & Running, S. W. (2010). A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resources Research*, 46(9).
- Zhang, J., Ke, C., Shen, X., Lin, J., & Wang, R. (2023). Monitoring land subsidence along the subways in Shanghai on the basis of time-series InSAR. *Remote Sensing*, 15(4), 908.
- Zhao, Y., Zhou, L., Luo, H., Li, Y., Li, X., Pan, Y., & Huang, Y. (2023). Urban subsidence in rapid economic development: the case of Luoyang city, Henan Province. *All Earth*, 35(1), 252-271.