

Detección de zonas potenciales de aguas subterráneas mediante el procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética en Sucre (Bolivia)

Detection of Potential Groundwater Zones through Synthetic Aperture Radar Imagery Processing in Sucre (Bolivia)

Ivan X. Peñaranda¹ , Wilber A. Jesús² , Juan P. Díaz³ * 

- 1 Facultad Técnica, Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca. Sucre, Bolivia.
- 2 Centro de Interacción Social, Investigación y Desarrollo CISID, Facultad Técnica, Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca. Sucre, Bolivia.
- 3 Centro de Interacción Social, Investigación y Desarrollo CISID, Facultad Técnica, Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca. Sucre, Bolivia.



Citar como: Peñaranda, I. et al. (2026). «Detección de zonas potenciales de aguas subterráneas mediante el procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética en Sucre (Bolivia)». *South Sustainability*, 7(2), e161. DOI: 10.21142/SS-0702-2026-e161

Recibido: 18/3/2026
Revisado por pares
Aceptado: 4/8/2026



© Los autores, 2026. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
diaz.juan@usfx.bo

Editora asociada:
Sonia Valle Rubio

RESUMEN

La escasez de agua potable en zonas urbanas de regiones semiáridas exige métodos de prospección de aguas subterráneas rápidos, económicos y replicables. Este estudio integró imágenes radar de apertura sintética Sentinel-1 (SAR, por las siglas en inglés de Synthetic Aperture Radar) procesadas en Google Earth Engine (GEE) con sondeos eléctricos verticales (SEV) para identificar zonas con potencial hidrogeológico en el Distrito 3 de Sucre (Bolivia). Se desarrolló un *script* en GEE que calcula el índice de cambio (VH-VV) sobre una serie temporal de imágenes, lo que genera una máscara de umbral que detecta anomalías de humedad superficial. La validación consistió en un análisis de correlación espacial mediante coeficientes de Pearson y de raíz del error cuadrático medio (RMSE, por las siglas en inglés de Root Mean Square Error), con 54 pozos registrados por la Empresa Local de Agua Potable y Alcantarillado de Sucre (ELAPAS) y 25 SEV, que obtuvieron coeficientes de Pearson $\geq 0,997$ y errores RMSE de 30,52 m y 77,59 m, respectivamente. Se identificaron 25 zonas con potencial de presencia de agua subterránea, de las cuales 8 resultaron viables para diseño de pozos. Los resultados demuestran que la sinergia SAR-SEV-GEE constituye una herramienta de cribado eficaz para la identificación preliminar de zonas con potencial de aguas subterráneas, orientada a la planificación de recursos hídricos subterráneos en municipios con recursos técnicos limitados.

Palabras clave: aguas subterráneas, radar de apertura sintética, Sentinel-1, Google Earth Engine, sondeos eléctricos verticales, Sucre

ABSTRACT

The scarcity of drinking water in urban areas of semi-arid regions requires fast, cost-effective, and replicable groundwater prospecting methods. This study integrated Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery processed in Google Earth Engine (GEE) with vertical electrical sounding (VES) to identify areas with hydrogeological potential in District 3 of Sucre, Bolivia. A GEE script was developed to calculate the change index (VH-VV) over a time series of images, generating a threshold mask to detect surface moisture anomalies. Validation consisted of a spatial correlation analysis using Pearson correlation coefficients and root mean square error (RMSE), based on 54 wells registered by the Local Drinking Water and Sewerage Company of Sucre (ELAPAS) and 25 VES points, obtaining Pearson coefficients ≥ 0.997 and RMSE values of 30.52 m and 77.59 m, respectively. A total of 25 areas with potential groundwater occurrence were identified, of which 8 were found to be viable for well design. The results demonstrate that the SAR-VES-GEE synergy constitutes a preliminary screening tool for the identification of areas with groundwater potential, aimed at supporting groundwater resource planning in municipalities with limited technical resources.

Keywords: Groundwater, Synthetic Aperture Radar, Sentinel-1, Google Earth Engine, Vertical Electrical Sounding, Sucre



1. Introducción

El agua subterránea es clave para regiones con acceso limitado a fuentes superficiales, debido a la variabilidad climática y la creciente demanda (Adams *et al.*, 2022). En ciudades con déficit hídrico como Sucre (Bolivia), se requieren alternativas económicas y no invasivas para prospección con fines de abastecimiento. En este contexto, la teledetección mediante radar de apertura sintética (SAR) ofrece una opción eficiente para explorar recursos hídricos (Adams *et al.*, 2022; Hernández, 2010). Las imágenes SAR recopilan datos independientemente de la nubosidad y la iluminación solar. Uno de los primeros trabajos en hidrogeología fue el de Galloway y Hoffmann (2007), quienes usaron interferometría diferencial SAR (DInSAR), integrada con datos de campo y modelos numéricos para monitorear y caracterizar cuencas con acuíferos no consolidados. La combinación de SAR con imágenes ópticas y altimetría por detección y medición de distancias mediante luz (LiDAR) también ha sido útil para mapear aguas superficiales (Irwin *et al.*, 2017; Kavats *et al.*, 2022). En Ecuador, Hernández (2010) utilizó imágenes satelitales para identificar formaciones hidrogeológicas en las cuencas de Puyango y Catamayo.

La integración de sensores remotos con métodos geofísicos de campo ha demostrado ser efectiva para la prospección de aguas subterráneas. Khoshlahjeh Azar *et al.* (2022) usaron datos Sentinel-1 SAR junto con información geológica e hidrológica para analizar deformación en una llanura aluvial de Irán, a fin de demostrar que tal sinergia permite caracterizar acuíferos complejos. Genedi *et al.* (2025) combinaron teledetección con resistividad eléctrica para mapear potencial hídrico subterráneo en el desierto oriental de Egipto, y validaron sus resultados mediante el proceso de jerarquía analítica (AHP). Estos antecedentes respaldan que, aunque SAR no detecta directamente agua subterránea, su integración con geofísica aporta indicadores indirectos confiables para detectar zonas acuíferas.

Estudios recientes destacan el potencial de SAR para monitorear aguas subterráneas y detectar inundaciones. Orellana *et al.* (2023) utilizaron DInSAR para monitorear la deformación asociada a la extracción de agua y anticipar subsidencia en acuíferos de Chillán (Chile). Asimismo, Ambrosio-Ambrosio y González-Camacho (2023) aplicaron algoritmos de aprendizaje automático a imágenes SAR para mapear inundaciones en Tabasco y Chiapas (México), mientras que Martínez-Barbáchano (2023) demostró la eficacia de la polarimetría SAR con polarización cruzada para estimar la extensión de inundaciones en la cuenca del río Frío (Costa Rica), usando imágenes SAR/Sentinel-1 (SAR/S1). Una ventaja de SAR es su independencia de condiciones meteorológicas y del horario, a diferencia de imágenes ópticas como las usadas por Sulle *et al.* (2023), cuyo análisis puede verse afectado por factores atmosféricos y de resolución.

Para la identificación y el monitoreo de aguas subterráneas a escala regional, la misión GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) permite identificar anomalías gravimétricas asociadas a fluctuaciones en su almacenamiento. Sin embargo, su resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ ($111 \times 111 \text{ km}^2$) limita el análisis a pequeña escala (Long *et al.*, 2015). Aunque Ali *et al.* (2021) mejoraron esta resolución a $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, continúa siendo insuficiente para monitorear aguas subterráneas a escala municipal.

El procesamiento de grandes volúmenes de datos satelitales constituye otro desafío. Aunque actualmente existe abundante información gratuita, como las imágenes SAR/S1, la capacidad de análisis puede limitar su aprovechamiento (Perilla y Mas, 2020). Hoy, plataformas como Google Earth Engine (GEE) permiten procesar información geoespacial en la nube y gestionar grandes volúmenes de datos sin saturar los recursos informáticos locales. Además, GEE se integra directamente con programas satelitales para incorporar imágenes recién adquiridas. GEE constituye una solución para el manejo de datos masivos, que permite abordar problemas globales y obtener resultados de forma rápida (Gorelick *et al.*, 2017).

A pesar de los avances en teledetección, la integración de múltiples fuentes de datos y la limitada resolución espacial siguen siendo desafíos para la prospección de agua subterránea. Esta investigación aborda estas limitaciones mediante una metodología basada en imágenes SAR procesadas en GEE. En la literatura actual son escasos los enfoques simplificados que, usando solo SAR, ofrezcan resultados rápidos para la detección de agua subterránea. Considerando la escasez de agua potable en ciudades como Sucre, este estudio plantea: ¿cómo detectar zonas con potencial de aguas subterráneas mediante una metodología no invasiva y de bajo costo? Para responderla, se desarrolló una metodología con imágenes SAR/S1 procesadas en GEE, que utilizó registros históricos de pozos de la Empresa Local de Agua Potable y Alcantarillado de Sucre (ELAPAS) y sondeos eléctricos verticales (SEV) para su validación.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde al área urbana del municipio de Sucre (Figura 1), capital constitucional de Bolivia, ubicada al sur del país, en los valles interandinos, a 2799,5 m s. n. m. Presenta clima semiárido, temperatura media anual de $15,8^\circ \text{C}$ y precipitación promedio de 626,1 mm, concentrada entre diciembre y marzo. Su topografía es montañosa, y su red hidrográfica es tributaria de la cuenca del Plata. Los suelos presentan problemas de erosión y desertificación.

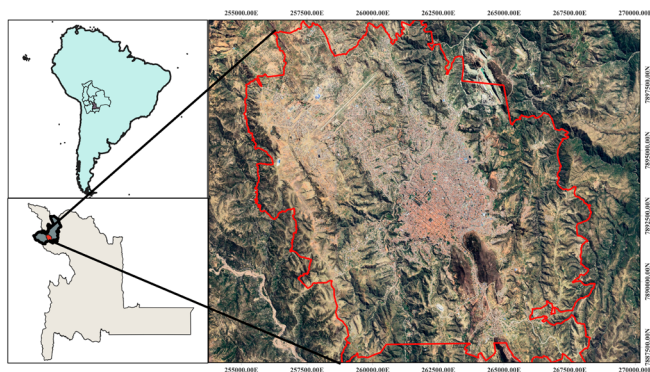


Figura 1. Área de estudio: ciudad de Sucre (Bolivia)

El área urbana concentra el 86 % de la población del municipio. La ciudad es bilingüe: predomina el castellano y como segunda lengua el quechua. La actividad económica está dominada por el comercio, la construcción y la agricultura. El acceso a agua potable es deficiente en zonas altas. Por ello, el estudio se enfoca en la zona alta del Distrito 3, con mayor demanda insatisfecha.

2.2. Etapas de la investigación

Con base en datos de la misión GRACE y del Sistema Global de Asimilación de Datos Terrestres de la NASA versión 2 (GLDAS, por las siglas en inglés de Global Land Data Assimilation System), se evaluó a macroescala el potencial de aguas subterráneas en la región que incluye el área de estudio. Este análisis reveló tendencias promisorias de almacenamiento de agua subterránea en la región de interés (Figura S1 del material suplementario). Este diagnóstico inicial sirvió como fundamento para realizar un análisis de mayor resolución espacial utilizando imágenes SAR/S1, para detectar, a microescala, la localización aproximada de zonas potenciales de aguas subterráneas en la ciudad de Sucre.

La investigación se desarrolló en cuatro etapas descritas a continuación:

La primera etapa consistió en recopilar datos del área de estudio: mapas, imágenes SAR/S1 preprocesadas y datos históricos de ELAPAS de pozos operativos para aprovechamiento de aguas subterráneas, cuyas coordenadas se presentan en la Tabla S1 del material suplementario.

La segunda etapa comprendió el procesamiento de imágenes SAR/S1 en GEE. Mediante un *script* desarrollado, se analizó la serie temporal seleccionada y se filtró según las polarizaciones definidas. Posteriormente se calculó el índice de cambio entre polarizaciones. El índice resultante se visualizó con capas y parámetros personalizados para identificar zonas con potencial de aguas subterráneas. Finalmente, la aplicación de una máscara de umbral permitió generar mapas temáticos de los sitios detectados.

La tercera etapa correspondió a la validación de las detecciones. Primero se realizó un análisis de

correlación con los datos históricos de pozos de ELAPAS. Posteriormente se realizaron SEV para verificar *in situ* las detecciones e inferir la presencia de acuíferos a distintas profundidades (ver Tabla 1). Dado que los SEV son técnicas indirectas sujetas a interpretación, se contrastaron sus resultados con datos de pozos operativos de ELAPAS. Este análisis mostró una elevada correspondencia espacial entre las detecciones por SEV y los pozos existentes, lo que sugiere una alta confiabilidad de los resultados.

La cuarta etapa consistió en generar mapas definitivos con la ubicación precisa de los sitios con potencial de agua subterránea para apoyar su gestión, aprovechamiento y conservación.

2.3. Teledetección mediante Sistemas de Radar de Apertura Sintética

A diferencia de la teledetección pasiva, SAR es una tecnología activa que permite monitorear continuamente la superficie terrestre, independientemente de las condiciones atmosféricas y la iluminación solar. Según Bustos (2021), el radar emite señales de microondas y, al capturar el eco retrodisperso, permite calcular distancias y propiedades del terreno con precisión, al operar eficazmente de día o de noche. La señal retrodispersada es sensible a la banda, polarización, ángulo de incidencia y propiedades geométricas y dieléctricas del objetivo, lo que convierte al SAR en una herramienta versátil para detectar anomalías del suelo asociadas con la humedad. Para discriminar objetivos en una imagen SAR, sus componentes de retrodispersión deben diferir y la resolución espacial ser suficiente para distinguirlos (Daboor y Brisco, 2018).

Los sistemas SAR transmiten y reciben señales polarizadas linealmente en orientación horizontal (H) y vertical (V). La polarización corresponde a la orientación del campo eléctrico de la onda electromagnética transmitida o recibida. Según esta configuración, los sistemas SAR pueden ser de:

- **Polarización simple:** transmite y recibe señales en una sola polarización (HH o VV).
- **Polarización dual:** transmite en una polarización y recibe dos señales retrodispersadas, una en la misma polarización y la otra en polarización ortogonal (HH, HV o VV, VH).
- **Polarización completa:** transmite alternativamente en polarización horizontal o vertical y recibe la señal retrodispersada en ambas polarizaciones (HH, VV, HV, VH).

Arango (2020) sostiene que la orientación de la señal puede ser horizontal (H) o vertical (V), según la configuración del sensor. La onda emitida y su eco reflejado permiten medir *amplitud y fase*. Los sistemas SAR actuales controlan la dirección del campo eléctrico y configuran la transmisión y recepción de señales en distintos modos de polarización:

- *Co-polarizada*: transmisión y recepción ocurren en la misma orientación:
 - HH: Horizontal - Horizontal.
 - VV: Vertical - Vertical.
- *Cross-polarizada*: Transmisión en un sentido y recepción en sentido ortogonal:
 - HV: Horizontal - Vertical.
 - VH: Vertical - Horizontal.

Con base en el estudio de Islam y Meng (2022), quienes evaluaron diez combinaciones de polarización para el mapeo rápido de inundaciones urbanas, este estudio utilizó la diferencia entre las polarizaciones VH y VV, a fin de detectar anomalías en el terreno que pueden relacionarse con posibles zonas de acumulación de agua. La banda VH responde muy bien a la estructura volumétrica del suelo, mientras que VV es un excelente indicador de humedad al modificarse la constante dieléctrica del material por la presencia de agua. Esta diferencia constituye un indicador indirecto útil para identificar zonas potencialmente asociadas a la presencia de agua subterránea. Aunque las microondas de banda C no penetran hasta los acuíferos, la detección puede ser indirecta, ya que el agua subterránea puede alterar propiedades superficiales detectables por el radar, por lo que el sensor detecta trazadores de superficie (Bauer-Marschallinger et al., 2019; Meijerink et al., 2007).

2.4. Imágenes SAR del satélite Sentinel-1

Se utilizaron imágenes SAR de los satélites Sentinel-1A y 1B del Catálogo de Datos de GEE, con una resolución espacial de 10 m, disponibles gratuitamente mediante el programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). La misión proporciona datos SAR de banda C con doble polarización a 5,405 GHz y escenas S1 Ground Range Detected (GRD), cuya colección se actualiza diariamente y recibe nuevos recursos en GEE en un plazo de dos días.

2.5. Uso de plataforma GEE y desarrollo del script

Perilla y Mas (2020) describen GEE como una plataforma de análisis geoespacial en la nube que permite procesar grandes volúmenes de datos sin depender de recursos locales. Está integrada con programas satelitales como Landsat, Sentinel y MODIS, lo que permite analizar imágenes actualizadas con rapidez, con la incorporación de cerca de 6000 nuevas escenas diarias.

En este estudio, el procesamiento multitemporal de imágenes SAR/S1 para Sucre demandó una capacidad de cómputo superior a los métodos locales convencionales. Por ello se optó por GEE, cuyo procesamiento en paralelo permitió ejecutar algoritmos de detección de humedad en fracciones de tiempo inviables con flujos tradicionales. Si bien GEE presenta restricciones en manipulación de datos vectoriales y en la rigidez de funciones predefinidas, su API en JavaScript facilitó un *script* personalizado que

integra consulta, filtrado y visualización directamente en la nube. Esta eficiencia fue clave para iterar rápidamente en la identificación de anomalías hídricas sin descargar ni almacenar grandes volúmenes de datos. A continuación, se describe su desarrollo:

- Identificar el área de interés*: se define el área de interés mediante un archivo shapefile (.shp), que contiene la geometría y los atributos geográficos de las características espaciales. En esta etapa se consulta en el catálogo de GEE la colección de imágenes SAR/S1.
- Importar el área de interés y definir el rango temporal*: se importa la geometría del área desde el archivo shapefile y se define el rango de fechas para la consulta.
- Filtrado de imágenes SAR Sentinel-1*: se seleccionan las imágenes SAR/S1 con polarizaciones VV y VH, tomadas en modo Interferometric Wide Swath (IW), modo principal sobre tierra, que proporciona imágenes de calidad homogénea. Los datos cubren franjas de 250 km con resolución espacial de 5 × 20 m.
- Cálculo del índice de cambio (ChangelIndex)*: se define una función que recibe las imágenes SAR/S1 filtradas. La función extrae los valores de retrodispersión en polarizaciones VH y VV, expresados en escala logarítmica de base 10 en decibelios (dB), y calcula la diferencia VH-VV. Todas las imágenes de la colección incluyen la banda ChangelIndex. Valores positivos del índice, en rango de -10 a 10 dB, se interpretan como anomalías superficiales asociadas a agua subterránea.
- Filtro de mediana*: tras aplicar el índice de cambio, se realiza una reducción estadística mediante la mediana píxel a píxel de la serie temporal de las 55 imágenes SAR/S1 obtenidas para este estudio. Para reducir el efecto *speckle* y anomalías de adquisición propias de las imágenes de radar, se utiliza una ventana temporal de las 55 imágenes. Cada píxel se reemplaza por la mediana de sus valores a lo largo de toda la serie procesada en GEE. Esto reduce las variaciones y destaca los patrones persistentes, lo que garantiza consistencia en las detecciones y reproducibilidad del procesamiento.
- Visualización*: se generan capas con parámetros personalizados para visualizar el índice de cambio en las imágenes SAR/S1 procesadas, en una escala de -10 a 10 dB. Los valores negativos se representan en verde, los próximos a cero en blanco, y los positivos con alto potencial para aguas subterráneas en rojo (Figura S2 del material suplementario).
- Máscara de umbral*: como los valores positivos del índice de cambio (VH-VV) representan zonas propensas a agua subterránea, se definió un umbral de 0,01 ligeramente superior a cero, crítico para maximizar la sensibilidad del método. Científicamente, esta configuración permite al algoritmo detectar incluso las anomalías de humedad sutiles o «trazadores de superficie» generados por ascenso capilar, señales que con umbrales más restrictivos podrían descartarse como ruido. Al permitir que la constante dieléctrica del suelo, alterada por la humedad subyacente, actúe como un indicador temprano y sensible, se obtiene una herramienta de cribado sensible. La máscara se aplica al índice de cambio para visualizar en azul los sitios con potencial hídrico (Figura S3 del material

suplementario), mapeando de esta manera la ubicación de los lugares detectados.

- h) *Exportación*: la imagen resultante, que integra la máscara de umbral que delimita geográficamente los sitios de potencial hídrico detectados, se exporta a Google Drive en formato GeoTIFF para su posterior uso en Sistemas de Información Geográfica.

Lo descrito se detalla en la Figura S4 del material suplementario, que muestra el contenido del *script* desarrollado. Las fechas de inicio y fin están como variables abiertas para su réplica. Para este estudio el rango fue del 1 de enero al 31 de diciembre de 2024, con el procesamiento de 55 imágenes SAR/S1.

2.6. Validación de resultados

La validación de los resultados de detección de zonas potenciales de aguas subterráneas con el *script* desarrollado se realizó mediante dos métodos con enfoque complementario:

- Comparación con registros de ELAPAS de pozos existentes.
- Prospección mediante SEV.

2.6.1. Protocolo de validación espacial

Para cuantificar la precisión espacial de las detecciones con imágenes SAR/S1 en GEE, se diseñó un protocolo de validación punto a punto frente a coordenadas de referencia terrestre (pozos ELAPAS y estaciones SEV). Se siguieron estándares de evaluación de precisión en teledetección (Foody, 2002). Cada detección satelital se vinculó al punto de referencia más cercano (pozo o estación) mediante algoritmo de vecino más cercano dentro de un radio de búsqueda definido. Las coordenadas satelitales corresponden a centroides de las áreas detectadas, mientras que las coordenadas de referencia corresponden a las posiciones georreferenciadas de los pozos o estaciones de prospección geofísica. Con estos pares se calcularon dos métricas complementarias.

La primera, el coeficiente de correlación de Pearson (r), evalúa la correspondencia a escala macroestructural entre el patrón espacial de las detecciones y los puntos de referencia. Se calculó de forma independiente para cada eje de coordenadas proyectadas Norte y Este mediante:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x'_i - \bar{x}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (x'_i - \bar{x}')^2}}$$

Donde x_i y x'_i representan las coordenadas (Norte o Este) del centroide de la detección satelital y del punto de referencia, respectivamente; $\bar{x}$ y $\bar{x}'$ son sus medias aritméticas; y n es el número total de pares de puntos. Un valor de r cercano a 1 indica que la distribución espacial de las detecciones sigue el mismo patrón regional que los puntos de referencia, descartando un comportamiento aleatorio del algoritmo.

La segunda, la raíz del error cuadrático medio (RMSE), cuantifica la precisión posicional del modelo mediante la distancia euclidiana entre cada par de puntos, integrando el error en ambos ejes (XY). Se calculó mediante:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2]}$$

Donde (x_i, y_i) son las coordenadas UTM (Este y Norte) del centroide de la i -ésima detección satelital y (x'_i, y'_i) , las coordenadas del punto de referencia asociado, y n es el número total de pares. El RMSE penaliza cuadráticamente desviaciones mayores, por lo que la presencia de valores atípicos puede sobreestimar el error global. Adicionalmente, se realizó un análisis de dispersión mediante diagramas de caja y bigotes para caracterizar la distribución de errores de ubicación por cuartiles, mediana y valores atípicos.

2.6.2. Comparación con registros de ELAPAS de pozos existentes

Se hizo un análisis de precisión espacial entre los resultados SAR/S1 procesados en GEE y datos de pozos georreferenciados proporcionados por ELAPAS. En la Figura 2, los puntos naranjas representan los registros históricos de ELAPAS y las cruces azules, las detecciones SAR/S1 con GEE. La correspondencia espacial entre ambos conjuntos de datos evidencia la confiabilidad del método desarrollado.

2.6.3. Prospección mediante SEV

Se realizaron ensayos SEV para medir la resistividad eléctrica del subsuelo a diferentes profundidades. Esta técnica, ampliamente utilizada en hidrogeología, permite inferir la presencia de agua subterránea a partir de variaciones en las propiedades físicas del terreno. Los resultados de los SEV y las detecciones SAR/S1 con GEE fueron igualmente sometidos a un análisis de precisión espacial para validar la efectividad del método. En la Figura 2, las estrellas celestes representan las detecciones SAR/S1 con GEE y los cuadros verdes las posiciones de los SEV.

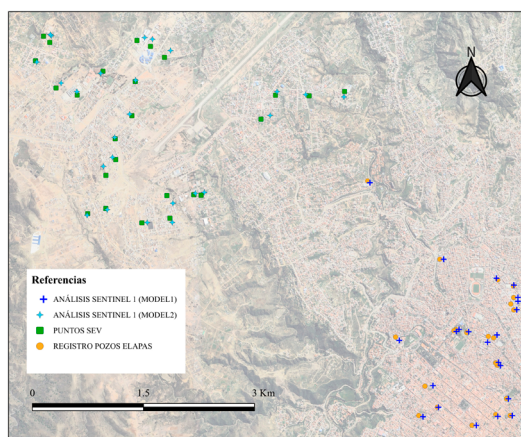


Figura 2. Sobreposición de información de pozos registrados por ELAPAS y ensayos SEV con las detecciones obtenidas por el código GEE

Para reforzar la interpretación de los SEV se realizaron ensayos en pozos activos del registro de ELAPAS. Estos ensayos mostraron correspondencia total entre la presencia de agua subterránea en los pozos y las detecciones derivadas de la interpretación de los SEV, lo que aporta mayor confiabilidad a la interpretación geofísica utilizada en la validación.

3. Resultados

3.1. Validación espacial detecciones SAR/S1 con registros de ELAPAS de pozos existentes

El coeficiente de Pearson fue de 0,999 tanto para el eje Norte como para el Este (Figura S5 del material suplementario), lo que indica que la distribución espacial de las detecciones reproduce con alta fidelidad el patrón regional de los pozos existentes.

El RMSE entre los centroides de las detecciones SAR/S1 y los pozos de referencia fue de 30,52 m (Figura S6 del material suplementario). La media del desplazamiento fue 24,66 m y la mediana, 20,08 m, por lo que el 50 % de las detecciones tuvo error $\leq 20,08$ m. El primer y tercer cuartil fueron 12,55 m y 30,60 m; así, el 75 % de los errores estuvo por debajo de 30,60 m. El RMSE fue mayor a la media y mediana por tres valores atípicos con desplazamientos de 60,27 m, 70,43 m y 92,45 m, que incrementaron el error por la penalización cuadrática. En conjunto, los resultados muestran correspondencia espacial aceptable entre detecciones y puntos de validación, respaldando la confiabilidad del método.

3.2. Validación espacial detecciones SAR/S1 con ensayos SEV

El análisis de correlación con las 25 estaciones SEV arrojó coeficientes de Pearson de 0,9969 (Norte) y 0,9981 (Este) (Figura S7 del material suplementario), y ello confirma la correspondencia espacial entre las detecciones satelitales y los puntos de prospección geofísica.

El RMSE entre centroides de las detecciones SAR/S1 y puntos SEV fue de 77,59 m (Figura S8 del material suplementario). La media del desplazamiento fue 67,88 m y la mediana 57,30 m, por lo que el 50 % de las detecciones tuvo error $\leq 57,30$ m. El primer y tercer cuartil fueron 36,13 m y 96,29 m; así, el 75 % de los errores estuvo por debajo de 96,29 m. Estos resultados muestran mayor dispersión posicional respecto a la validación de la Figura S6; no obstante, la correspondencia espacial general entre detecciones y puntos de referencia se mantiene consistente a escala regional.

3.3. Sitios potenciales de aguas subterráneas detectados en el Distrito 3 del municipio de Sucre

Con el análisis SAR/S1 en GEE y las validaciones realizadas mediante SEV, se detectaron 25 zonas potenciales de aguas subterráneas en el Distrito 3 del municipio de Sucre. La Figura 3 muestra en color celeste las detecciones obtenidas mediante el *script*. A partir de estas detecciones y su validación, se caracterizaron además las formaciones geológicas subyacentes. Esto proporcionó información útil para estudiar la variabilidad hidrogeológica en la zona de estudio.

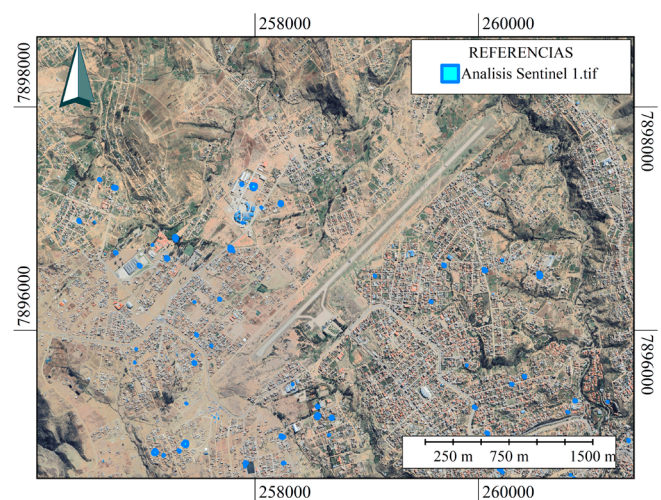


Figura 3. Detección de zonas potenciales de aguas subterráneas en el Distrito 3 del municipio de Sucre, con el procesamiento de imágenes SAR/S1 mediante el *script* en GEE

La Tabla 1 resume la evidencia de detección de agua subterránea y destaca la variabilidad en la profundidad de los acuíferos detectados. Esta información no se infiere del análisis SAR/S1, pero sí mediante SEV, y es fundamental para planificar futuras perforaciones para el aprovechamiento eficiente de recursos hídricos. La tabla incluye tipo de suelo, nivel freático y tipo de perforación en cada sitio, lo que permitió identificar 8 puntos con alta factibilidad de aprovechamiento hídrico. Se consideró alta factibilidad cuando el nivel freático era menor a 50 m y la perforación técnica y económicamente viable (suave o media), y baja factibilidad para niveles freáticos mayores a 65 m o suelos duros que incrementan costos de perforación. Estos puntos prioritarios se presentan en la Figura 4.

Tabla 1. Resultados de prospecciones geofísicas en los 25 puntos detectados en el Distrito 3 del municipio de Sucre

Pto.	Coordenadas UTM		Profundidad estudio (m)	Tipo de suelo	Nivel freático (m)	Tipo de perforación	Factibilidad
	E	N					
1	259648,90	7896531,01	100	Areniscas, margas y sedimentos	10	dura	buena
2	260103,23	7896523,38	100	Bolones, areniscas, margas y sedimentos	30	media	media
3	260581,38	7896582,17	100	Areniscas, margas y sedimentos	35	suave	media
4	259453,04	7896208,06	100	Areniscas, margas y sedimentos	65	dura	baja
5	257490,17	7895661,68	100	Areniscas, margas y sedimentos	65	dura	baja
6	257482,94	7895943,27	100	Areniscas, margas y sedimentos	65	media	baja
7	257708,38	7896255,20	100	Areniscas, margas y sedimentos	10	suave	buena
8	257753,64	7896716,77	100	Areniscas, margas y sedimentos	60	dura	baja
9	258148,88	7897042,72	100	Areniscas, margas y sedimentos	30	suave	buena
10	257960,59	7897191,05	100	Areniscas, margas y sedimentos	20	media	buena
11	257777,00	7897271,29	100	Areniscas, margas y sedimentos	65	suave	media
12	257318,44	7896855,57	100	Areniscas, margas y sedimentos	65	dura	baja
13	256969,91	7896533,14	100	Areniscas, margas y sedimentos	70	suave	media
14	256683,59	7896629,01	100	Areniscas, margas y sedimentos	65	media	media
15	256406,76	7896996,23	100	Areniscas, margas y sedimentos	90	dura	baja
16	256515,47	7897328,37	100	Areniscas, margas y sedimentos	30	suave	buena
17	256598,77	7897244,74	100	Areniscas, margas y sedimentos	65	suave	media
18	258545,83	7895187,50	100	Areniscas, margas y sedimentos	75	suave	media
19	258643,52	7895180,83	100	Areniscas, margas y sedimentos	105	suave	baja
20	258181,93	7895176,30	100	Areniscas, margas y sedimentos	40	suave	buena
21	257843,05	7894807,34	100	Areniscas, margas y sedimentos	60	suave	media
22	258222,04	7894870,09	100	Areniscas, margas y sedimentos	50	dura	media
23	257357,13	7895448,61	100	Areniscas, margas y sedimentos	40	dura	media
24	257355,67	7895002,42	100	Areniscas, margas y sedimentos	45	suave	buena
25	257111,19	7894930,98	100	Areniscas, margas y sedimentos	35	dura	buena

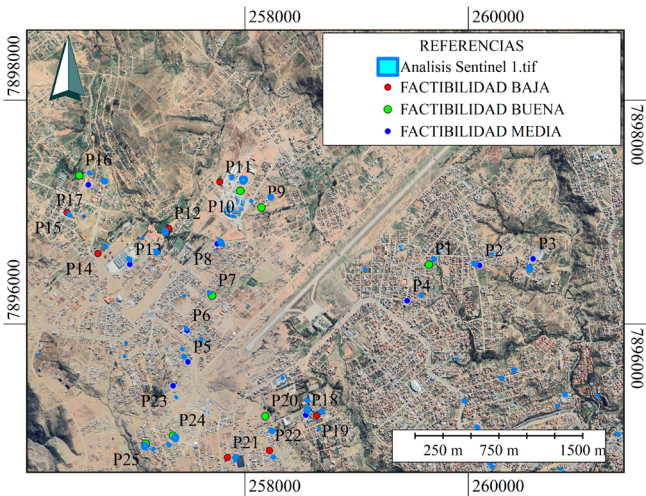


Figura 4. Validación y priorización de acuíferos detectados a partir del procesamiento de imágenes SAR/S1 en el Distrito 3 del municipio de Sucre, con estudios SEV

4. Discusión

4.1. Limitaciones de GRACE y justificación del enfoque SAR

El diagnóstico inicial con GRACE permitió identificar la presencia de agua subterránea en la región y fundamentar el análisis de mayor resolución mediante imágenes SAR/S1. Sin embargo, su resolución espacial limita la aplicación de esta técnica en estudios municipales. Adams *et al.* (2022) señalan que las técnicas gravimétricas como GRACE permiten inferir cambios en el almacenamiento de agua subterránea, pero su resolución (~300 km) es adecuada para cuencas extensas. Long *et al.* (2015) confirmaron que las incertidumbres aumentan al reducir la escala espacial de análisis. Aunque se han propuesto métodos para mejorar la resolución de GRACE, estos aún resultan insuficientes para aplicaciones municipales (Ali *et al.*, 2021). Por ello, las imágenes SAR/S1, con resolución



de 5 × 20 m, constituyen una alternativa adecuada para superar las limitaciones de escala de GRACE.

4.2. Mecanismo físico de detección con Sentinel-1

El análisis SAR/S1 en GEE permitió detectar variaciones en la textura superficial y el contenido de humedad del suelo asociadas a la presencia de aguas subterráneas en Sucre. La banda C del radar (5,405 GHz) penetra aproximadamente ~5 cm en suelo seco, pero cuando la humedad incrementa, la constante dieléctrica del suelo aumenta, la señal se dispersa más y aumenta la retrodispersión. Bauer-Marschallinger *et al.* (2019) demostraron que el monitoreo global de humedad del suelo con Sentinel-1 es viable por la sensibilidad del coeficiente de retrodispersión (σ^0) a variaciones de humedad en los primeros centímetros del suelo. En suelos húmedos y saturados, la señal VV puede atenuarse más que VH, lo que hace positiva la diferencia (VH-VV) e indica posibles anomalías asociadas a aguas subterráneas. Arango (2020) reportó resultados similares en el análisis de humedad del suelo en cultivos de caña de azúcar utilizando sensores SAR, donde la polarización cruzada mostró mayor sensibilidad al contenido de agua. Aunque la penetración de ondas de la banda C es baja, mecanismos como el ascenso capilar pueden conectar acuíferos profundos con la superficie y modificar la constante dieléctrica al nivel de penetración de las ondas del radar. Galloway y Hoffmann (2007) demostraron que la respuesta SAR puede verse influenciada por condiciones subsuperficiales cuando existen mecanismos de conexión hidráulica entre el acuífero y la superficie. Martínez-Barbáchano (2023) evidenció que la polarimetría con imágenes SAR/S1 permite distinguir cuerpos de agua con alta precisión. Así, los cambios sutiles en humedad superficial detectados por SAR/S1 pueden constituir indicadores indirectos de la presencia de acuíferos profundos.

4.3. Comparación con estudios previos en la región

La metodología desarrollada presenta similitudes con enfoques previos de teledetección para la prospección de aguas subterráneas. Hernández (2010) integró imágenes satelitales, datos tradicionales y capas vectoriales en un SIG para identificar sitios con mayor probabilidad de agua subterránea en Ecuador. Aunque se basó en imágenes ópticas, sus resultados confirmaron la viabilidad de integrar teledetección con datos de campo en zonas áridas y semiáridas de Latinoamérica. Galloway y Hoffmann (2007) aplicaron DInSAR para monitorear cuencas con acuíferos no consolidados, y demostraron que las técnicas SAR contribuyen a identificar límites estructurales, heterogeneidades hidráulicas y propiedades de almacenamiento de los sistemas acuíferos. Orellana *et al.* (2023) utilizaron 145 imágenes SAR/S1 y validación GNSS para monitorear el deterioro de acuíferos en Chillán (Chile), y así registraron deformaciones superiores a -10 mm/año y una tendencia de deterioro de hasta 60 mm.

Khoshlahjeh Azar *et al.* (2022) integraron datos SAR/S1 con información geológica e hidrológica para caracterizar la respuesta de acuíferos a la extracción de agua en la llanura de Hashtgerd (Irán). A diferencia de estos estudios enfocados principalmente en deformación del terreno, el presente trabajo propone un enfoque complementario basado en el índice de cambio (VH-VV) para detectar zonas potenciales de agua subterránea, lo que representa una contribución diferenciada al campo.

4.4. Validación cruzada: ELAPAS y SEV

Los resultados obtenidos tras implementar el *script* en el área de estudio revelan que los sitios detectados como posibles fuentes de agua subterránea coinciden con pozos registrados por ELAPAS y con los estudios geofísicos realizados. Esta consistencia evidencia una alta correspondencia entre el procesamiento de imágenes SAR/S1, los registros existentes y la interpretación geofísica. La coincidencia con los pozos registrados por ELAPAS constituye evidencia de la eficacia del método. Más que una validación puntual, este resultado respalda la posibilidad de aplicar la metodología en otros contextos. ELAPAS, como entidad responsable del agua potable, posee datos verificados que aportan valor a la validación.

La integración de teledetección y métodos geofísicos constituye una estrategia respaldada por estudios previos. Genedi *et al.* (2025) combinaron imágenes satelitales con datos de resistividad eléctrica para mapear zonas con potencial de aguas subterráneas en Wadi Diit (Egipto), y reportaron una correspondencia significativa entre las predicciones obtenidas mediante teledetección y las mediciones geofísicas de campo. Sulle *et al.* (2023) aplicaron un enfoque integrado SIG-teledetección en Indonesia, lo que demostró que combinar múltiples fuentes mejora la precisión en la detección de acuíferos. Meijerink *et al.* (2007) establecieron bases conceptuales de aplicación de teledetección en la evaluación de aguas subterráneas y su validación con datos de campo.

En el presente estudio, la concordancia entre los resultados de los SEV, los registros de ELAPAS y las detecciones SAR/S1 resalta la utilidad de combinar teledetección y prospección geofísica. Mientras los estudios geofísicos proporcionan información detallada a distintas profundidades, las imágenes satelitales ofrecen una perspectiva espacial amplia y rápida que puede orientar la toma de decisiones informadas.

4.5. Utilidad de GEE para el análisis de datos satelitales

GEE demostró ser una herramienta eficiente para procesar grandes volúmenes de datos satelitales. Gorelick *et al.* (2017) la describieron como una plataforma geoespacial a escala planetaria que permite acceder y procesar datos de observación de la Tierra sin almacenamiento local, mientras que Perilla y Mas (2020) destacaron su capacidad para integrar datos

masivos y procesamiento en la nube. Islam y Meng (2022) confirmaron su utilidad para procesar series temporales SAR/S1 de forma automatizada y eficiente. En este estudio, el procesamiento de 55 imágenes SAR/S1 permitió identificar patrones en la distribución de posibles fuentes de agua subterránea en Sucre mediante una metodología accesible y escalable. La integración de imágenes SAR/S1 procesadas en GEE con métodos geofísicos de validación constituye un enfoque replicable y de bajo costo frente a métodos tradicionales de exploración. Hernández (2010) propuso el uso de la teledetección para estructurar proyectos piloto de prospección de acuíferos en zonas áridas y semiáridas, enfoque que este estudio amplía mediante SAR y GEE.

4.6. Limitaciones del estudio

Aunque los resultados son alentadores, existen limitaciones a considerar. Las resoluciones: espacial de las imágenes SAR/S1 (10 m) y temporal (12 días con un solo satélite), pueden afectar la precisión en la detección de sitios potenciales de agua subterránea, especialmente en áreas con cambios rápidos de humedad superficial. Bauer-Marschallinger *et al.* (2019) señalaron que la banda C de Sentinel-1 es adecuada para monitoreo de humedad a escala regional, pero la rugosidad superficial y la cobertura vegetal pueden introducir incertidumbres en la retrodispersión. Además, la penetración limitada de banda C (~5 cm en suelo seco) implica que la detección se basa en mecanismos indirectos como el ascenso capilar, y no en detección directa del agua subterránea profunda. Adams *et al.* (2022) destacaron que, pese al avance en teledetección, la integración de múltiples enfoques y la validación con datos de campo siguen siendo esenciales para reducir incertidumbres. Interferencias por condiciones geomorfológicas y construcciones urbanas pueden influir en la interpretación; por ejemplo, áreas urbanizadas pueden generar señales falsas o atenuar las que indican la presencia de agua subterránea. Bustos (2021) reportó desafíos similares en detección de sequía con SAR en zonas de alta densidad de infraestructura. Se recomienda realizar estudios complementarios que aborden estas limitaciones para consolidar y reforzar los hallazgos iniciales.

5. Conclusiones

La integración de imágenes SAR/S1 procesadas en GEE con SEV permitió detectar 25 zonas con potencial de aguas subterráneas en el Distrito 3 de Sucre. La validación con pozos de ELAPAS arrojó una correlación de Pearson de 0,999 y un RMSE de 30,52 m, mientras que la validación con SEV alcanzó correlaciones de 0,997 (N) y 0,998 (E). Estos resultados respaldan el uso de la diferencia VH-VV como indicador para detectar zonas con potencial hidrogeológico a escala municipal.

El índice de cambio (VH-VV) procesado en GEE permitió reducir el área de búsqueda de GRACE (~300 km)

a una resolución de 5 × 20 m y priorizar 8 de los 25 sitios detectados como viables para perforación en el Distrito 3, según la profundidad del nivel freático (10-105 m) y las propiedades litológicas del subsuelo. Esto demuestra la utilidad del método como herramienta de cribado previo a la prospección de campo.

La metodología basada en SAR y GEE ofrece un enfoque replicable y de bajo costo para regiones con escasez hídrica y recursos técnicos limitados. La reproducibilidad del *script*, publicado en un repositorio abierto, y la concordancia con los registros de campo respaldan su potencial como herramienta de apoyo para la planificación y gestión hídrica municipal, así como para futuras investigaciones y estrategias de prospección de aguas subterráneas en contextos similares de Bolivia y Latinoamérica.

Contribución de los autores

Ivan X. Peñaranda: conceptualización, administración del proyecto y redacción.

Wilber A. Jesús: investigación, *software*, validación y visualización.

Juan Pablo Díaz: redacción, revisión y edición.

Fuente de financiamiento

Recursos de la Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca (USFX).

Potenciales conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses.

Declaración de uso de IA

Los autores declaran el uso de IA, es decir, modelos LLM como Gemini y ChatGPT, únicamente para la revisión de la redacción y control de coherencia en todo el documento.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca (USFX), que, por medio de la Dirección de Investigación, Ciencia y Tecnología (DICyT), a través del concurso de proyectos de investigación DICyT 2023-USFX, otorgó los recursos económicos para la realización de la presente investigación, lo que permitió, entre otras actividades, la validación de las detecciones de existencia de agua subterránea en las zonas altas del Distrito 3 de la ciudad de Sucre (Bolivia), mediante sondeos eléctricos verticales (SEV). De igual manera, a la Empresa de Agua Potable y Alcantarillado Sucre (ELAPAS), por su contribución en la información de los pozos existentes en la ciudad.



Referencias bibliográficas

- Adams, K. H., Reager, J. T., Rosen, P., Wiese, D. N., Farr, T. G., Rao, S., Haines, B. J., Argus, D. F., Liu, Z., Smith, R., Famiglietti, J. S. y Rodell, M. (2022). «Remote Sensing of Groundwater: Current Capabilities and Future Directions». *Water Resources Research*, 58(10), e2022WR032219. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2022WR032219>
- Ali, S., Liu, D., Fu, Q., Cheema, M. J. M., Pham, Q. B., Rahaman, Md. M., Dang, T. D. y Anh, D. T. (2021). «Improving the Resolution of GRACE Data for Spatio-Temporal Groundwater Storage Assessment». *Remote Sensing*, 13(17), 3513. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs13173513>
- Ambrosio-Ambrosio, J. P. y González-Camacho, J. M. (2023). «Algoritmos de aprendizaje automático para clasificar zonas de inundación a partir de imágenes de radar de apertura sintética». *Tecnología y Ciencias del Agua*, 14(4), pp. 107-154. Disponible en: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-04-03>
- Arango, E. (2020). *Análisis de la humedad del suelo en el cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca con sensores de radar de apertura sintética (SAR)*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Abierta y a Distancia Cead Palmira]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/36768/earango.pdf?sequence>
- Bauer-Marschallinger, B., Freeman, V., Cao, S., Paulik, C., Schauler, S., Stachl, T., Modanesi, S., Massari, C., Ciabatta, L., Brocca, L. y Wagner, W. (2019). «Toward Global Soil Moisture Monitoring With Sentinel-1: Harnessing Assets and Overcoming Obstacles». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(1), pp. 380-398. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2858004>
- Bustos, S. (2021). *Detección y mapeo de sequía utilizando imágenes ópticas y SAR*. [Tesis de Maestría, Instituto de Altos Estudios Especiales «Mario Gulich»]. Disponible en: https://ig.conae.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2021/08/Tesis_MAIIE_SantiagoBustosRevol.pdf
- Daboor, M. y Brisco, B. (2018). «Wetland Monitoring and Mapping Using Synthetic Aperture Radar». En: D. Gökçe (ed.), *Wetlands Management. Assessing Risk and Sustainable Solutions*. IntechOpen. Disponible en: <https://doi.org/10.5772/intechopen.80224>
- Foody, G. M. (2002). «Status of land cover classification accuracy assessment». *Remote Sensing of Environment*, 80(1), pp. 185-201. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
- Galloway, D. L. y Hoffmann, J. (2007). «The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology». *Hydrogeology Journal*, 15(1), pp. 133-154. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0121-5>
- Genedi, M., Gouhar, N., El-Qady, G., Gaafar, I. y Mahmoudi, A. E. (2025). «Integrating conventional and remote sensing with DC resistivity datasets to map groundwater potential areas using the analytical hierarchy process method, North Wadi Diit, Egypt». *Scientific Reports*, 15(1), 12786. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94598-7>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. y Moore, R. (2017). «Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone». *Remote Sensing of Environment*, 202, pp. 18-27. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hernández, M. (2010). «Metodología para la prospección de agua subterránea utilizando información satelital y datos obtenidos en forma tradicional». *Revista Politécnica*, 29, pp. 95-100. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/6887/688773660008.pdf>
- Irwin, K., Beaulne, D., Braun, A. y Fotopoulos, G. (2017). «Fusion of SAR, Optical Imagery and Airborne LiDAR for Surface Water Detection». *Remote Sensing*, 9(9), 890. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs9090890>
- Islam, T. y Meng, Q. (2022). «An exploratory study of Sentinel-1 SAR for rapid urban flood mapping on Google Earth Engine». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 113, 103002. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103002>
- Kavats, O., Khramov, D. y Sergieieva, K. (2022). «Surface Water Mapping from SAR Images Using Optimal Threshold Selection Method and Reference Water Mask». *Water*, 14(24), 4030. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/w14244030>
- Khoshlahjeh Azar, M., Shami, S., Nilfouroushan, F., Salimi, M., Ghayoor Bolorfroshan, M. y Reshadi, M. A. M. (2022). «Integrated analysis of Hashtgerd plain deformation using Sentinel-1 SAR, geological and hydrological data». *Scientific Reports*, 12(1), 21522. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25659-4>
- Long, D., Longuevergne, L. y Scanlon, B. R. (2015). «Global analysis of approaches for deriving total water storage changes from GRACE satellites». *Water Resources Research*, 51(4), pp. 2574-2594. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/2014WR016853>
- Martínez-Barbáchano, R. (2023). «Estimación de la superficie afectada por inundaciones mediante polarimetría con imágenes radar de apertura sintética (SAR) Sentinel 1A en la cuenca hidrográfica del río Frío (Costa Rica)». *Geographical Journal of Central America*, 1(70), pp. 273-296. Disponible en: <https://doi.org/10.15359/rgac.70-1.10>
- Meijerink, A. M. J., Bannert, D., Batelaan, O., Lubczynski, M. W. y Pointet, T. (2007). *Remote Sensing Applications to Groundwater*. IHP-VI, Series on Groundwater No. 16. UNESCO. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000156300>
- Orellana, F., Rivera, D., Montalva, G. y Arumi, J. L. (2023). «InSAR-Based Early Warning Monitoring Framework to Assess Aquifer Deterioration». *Remote Sensing*, 15(7), 1786. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs15071786>
- Perilla, G. A. y Mas, J.-F. (2020). «Google Earth Engine (GEE): Una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube». *Investigaciones Geográficas*, (101). Disponible en: <https://doi.org/10.14350/ig.59929>
- Sulle, B. A. C., Sunaryo, D. K. y Yulianandha, A. (2023). «Identification of groundwater potential using geographic information systems and remote sensing (Case Study: Mojokerto Regency)». *Journal of Marine-Earth Science and Technology*, 4(1), pp. 33-38. Disponible en: <https://doi.org/10.12962/j27745449.v4i1.700>